

# Comlessità Sviluppo

---

2006

**D**a dieci anni l'ENEA pubblica una selezione di articoli apparsi negli ultimi dodici mesi sulla rivista *Energia, Ambiente e Innovazione*.

Ovviamente sono molti i criteri che possono essere adottati per operare una selezione. Qualunque essi siano, ogni selezione nasconde un bilancio, anche se involontario, di quanto è apparso sulla rivista e in fin dei conti di quanto accaduto nell'Ente.

Questo anno la ricerca del "bilancio involontario" è piuttosto semplice.

Indubbiamente c'è una preponderanza di articoli nati in occasione dei workshop che l'ENEA ha organizzato lungo tutto l'arco del 2006. Si è trattato di una vasta e sistematica operazione che, riunendo molti operatori nazionali, ha avuto lo scopo di ridefinire o confermare la rete di relazioni e collaborazioni dell'ENEA con i soggetti pubblici e privati maggiormente impegnati nelle tematiche che costituiscono la missione istituzionale dell'Ente. Nei workshop – e nei contributi qui riproposti, relativi alle fonti rinnovabili, ai biocombustibili, al fotovoltaico – sono stati affrontati i temi di maggiore attualità, quelli su cui la domanda di ricerca nel Paese è maggiore, cercando di evidenziare, attraverso una specifica proposta ENEA, le aree dove è necessario il maggior impegno di sistema.

È sembrato opportuno riproporre, accanto agli interventi in campo energetico, un importante articolo sui cambiamenti climatici per confermare il fil rouge che lega ormai indissolubilmente le opzioni energetiche alle problematiche relative alle emissioni climalteranti; così come, in omaggio al titolo di questa pubblicazione a cadenza annuale, scegliere due interventi che hanno molto a che vedere con la complessità e lo sviluppo: la certificazione di un Centro di Ricerca e la presentazione dell'Istituto Nazionale di metrologia delle radiazioni ionizzanti sito nel Centro Ricerche ENEA della Casaccia. Qualità, affidabilità e accuratezza sono indubbiamente paradigmi essenziali per vincere la sfida della competitività.

Rientra nei termini della sfida, ed è indubbiamente parte della sua complessità, l'intersezione tecnologica tra diversi settori economici a volte anche molto distanti. L'articolo "L'ENEA e le tecnologie per la salute" si presta molto bene ad indicare le stimolanti ricadute che la fertilizzazione di un comparto come quello della salute con tecnologie proprie della fisica delle radiazioni. (ho solo questo dubbio: anche in questo caso si è trattato di un workshop ...)

È nostra convinzione che l'edizione 2006 di questa raccolta possa risultare interessante per chi la riceve, ma anche un'occasione in più per presentare l'ENEA e le sue attività.

**Mauro Basili**

Direttore Responsabile "Energia, Ambiente e Innovazione"

complessità & sviluppo

6

## CAMBIAMENTI CLIMATICI: IL CONGELAMENTO PER CALDO ECCESSIVO

Il riscaldamento che si sta verificando nella regione artica potrebbe comportare il collasso della corrente del Golfo e l'avvio di un'era di glaciazione. Uno scenario possibile se nei prossimi decenni si continuerà a bruciare combustibili ed emettere gas serra

*Vincenzo Ferrara*

Tratto da: ENERGIA, AMBIENTE E INNOVAZIONE 1/06

16

## I BIOCARBURANTI IN ITALIA: OSTACOLI DA SUPERARE E OPPORTUNITÀ DI SVILUPPO

I temi della produzione e dell'impiego dei biocarburanti rivestono un ruolo importante nella definizione della nuova politica energetica ed ambientale europea. Ma per ridurre i costi di produzione e ottimizzare l'uso del territorio sono necessarie nuove filiere produttive in grado di offrire significative opportunità nell'intero comparto agro-industriale del nostro Paese

*Vito Pignatelli, Chiara Clementel*

Tratto da: ENERGIA, AMBIENTE E INNOVAZIONE 2/06

28

## LA CERTIFICAZIONE DI QUALITÀ IN UN LABORATORIO DI RICERCA

La certificazione del Sistema di Gestione della Qualità per una Istituzione di Ricerca rappresenta una opportunità per migliorare il servizio nei confronti dei committenti, ma anche un'occasione per valorizzare le proprie qualità organizzative

*Maria Litido, Mauro Canè, Ruggero Lorenzelli, Stefano Salvi*

Tratto da: ENERGIA, AMBIENTE E INNOVAZIONE 2/06

39

## LO SVILUPPO DELLE RINNOVABILI: UNA OPPORTUNITÀ PER IL SISTEMA PAESE

L'impegno programmatico per lo sviluppo delle fonti rinnovabili è un'occasione strategica di crescita industriale soprattutto se si interviene nei settori ad alta innovazione tecnologica

*Carlo Manna*

Tratto da: ENERGIA, AMBIENTE E INNOVAZIONE 3/06

**61** **CICLI TERMOCHIMICI DI IDROLISI PER LA PRODUZIONE DI IDROGENO**  
 L'applicazione intensiva dell'idrogeno come vettore energetico porta in primo piano i processi di produzione alimentati da fonti energetiche rinnovabili e alternative. Tra i processi più promettenti, i cicli termochimici di idrolisi costituiscono una risposta sostenibile per la produzione di idrogeno da acqua  
*Alberto Giaconia, Pietro Tarquini, Mauro Vignolini*  
 Tratto da: ENERGIA, AMBIENTE E INNOVAZIONE 3/06

**78** **LA METROLOGIA NELLO SVILUPPO DELLE ATTIVITÀ UMANE**  
 La domanda di accuratezza e di affidabilità nei diversi settori di misura è crescente nel tempo. Questa domanda, a sua volta, richiede con continuità lo sviluppo di nuovi campioni sempre più accurati e di nuove procedure di taratura. In questo articolo viene presentato il ruolo che l'ENEA svolge come Istituto Metrologico Primario nel settore delle radiazioni ionizzanti  
*Raffaele Fedele Laitano*  
 Tratto da: ENERGIA, AMBIENTE E INNOVAZIONE 4/06

**99** **L' ENEA E LE TECNOLOGIE PER LA SALUTE**  
 Ricerca nel settore biomedico e sviluppo di tecnologie per la diagnosi e la terapia sono tra le priorità di questo secolo. Collegare l'offerta di tecnologie e i risultati delle ricerche ENEA con la domanda del mondo ospedaliero e del sistema delle imprese può risultare una sfida vincente  
*Donatella Tirindelli*  
 Tratto da: ENERGIA, AMBIENTE E INNOVAZIONE 5/06

**113** **IL FOTOVOLTAICO: SVILUPPO DELLA RICERCA E OPPORTUNITÀ PER L'INDUSTRIA**  
 Lo sviluppo delle fonti rinnovabili di energia è condizione necessaria per affrontare la transizione energetica imposta dalle problematiche sempre più pressanti connesse all'approvvigionamento dei combustibili fossili e ai rischi di cambiamento climatico. In questo ambito riveste un particolare rilievo lo sviluppo e la diffusione della tecnologia solare fotovoltaica che, seppure ancora lontana dalla maturità, è in grado di fornire un contributo sempre più rilevante alla produzione di energia elettrica  
*Anna De Lillo*  
 Tratto da: ENERGIA, AMBIENTE E INNOVAZIONE 6/06

# Cambiamenti climatici: il congelamento per caldo eccessivo

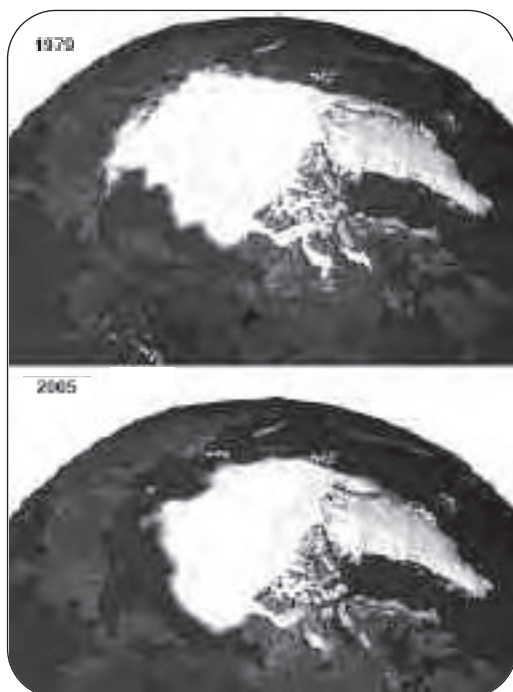
Il riscaldamento che si sta verificando nella regione artica potrebbe comportare il collasso della corrente del Golfo e l'avvio di un'era di glaciazione. Uno scenario possibile se nei prossimi decenni si continueranno a bruciare combustibili ed emettere gas serra

**VINCENZO FERRARA**

**ENEA**

Progetto Speciale Clima Globale

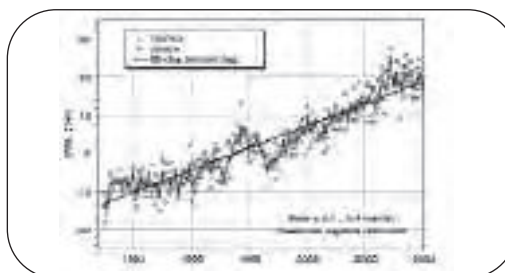
*Tratto da:* ENERGIA, AMBIENTE E INNOVAZIONE 1/06



**Figura 1**  
Variazione dell'estensione del ghiaccio artico tra il 1979 e il 2005  
Fonte: NASA

La regione artica si sta riscaldando con velocità doppia rispetto a quella media del resto del mondo. In Alaska, nel Nord del Canada e in Groenlandia, la temperatura media è cresciuta al ritmo di  $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  per decennio in questi ultimi 50 anni, e la crescita maggiore si è verificata in inverno. Le precipitazioni atmosferiche a partire dal 1900 sono aumentate in media di circa l'8%, ma con punte, in autunno ed inverno, anche del 50% soprattutto in Groenlandia, Nord del Canada e Siberia settentrionale. Il "permafrost" artico è in lento ma progressivo scongelamento ed il limite meridionale della presenza di ghiaccio permanente si è spostato, in questi ultimi decenni, di decine di km verso nord. Inoltre, il volume dei ghiacci artici è diminuito di circa il 10% negli ultimi 25 anni e, nel frattempo, la loro estensione si è ridotta di oltre un milione di km quadrati. Sono questi i principali risultati di un ampio studio sull'Artico che è stato oggetto di un Simposio Internazionale, tenuto nel novembre 2004 a Reykiavik in Islanda. Se il riscaldamento climatico in atto procederà a questi ritmi, o addirittura a ritmi superiori, come molte proiezioni future prospettano, non vi è dubbio che gli effetti più rilevanti, oltre che

più vistosi, dei cambiamenti climatici futuri saranno proprio nelle aree polari, che sono quelle più sensibili al riscaldamento climatico. Tra le possibili conseguenze, la maggiore preoccupazione sembra essere focalizzata principalmente su una drammatica accelerazione dell'innalzamento del livello del mare, che attualmente cresce al ritmo di circa 2 centimetri e mezzo per decennio (figura 2). Si temono, infatti, effetti catastrofici su tutte le aree costiere più basse, ma anche l'inondazione di molte metropoli costiere densamente popolate. Ma sarà proprio così? In realtà, sia la situazione di perdita dei ghiacci delle calotte polari, sia il futuro innalzamento del livello del mare causato dalla fusione dei ghiacci delle aree polari, non appaiono preoccupanti. Con il riscaldamento climatico, i ghiacci antartici tenderanno ad espandersi piuttosto che a diminuire, mentre i ghiacci artici, che continueranno, invece, a ridursi sempre più rapidamente, pur ponendo problemi molto limitati, e abbastanza secondari, di innalzamento del livello del mare, solleveranno principalmente il problema di un rischio molto serio della veloce glaciazione di gran parte dell'emisfero Nord. Tale rischio di glaciazione sarà tanto maggiore quanto maggiore sarà la velocità del riscaldamento climatico futuro. Si potrebbe, insomma, creare una situazione paradossale: mentre il resto del mondo andrebbe incontro ad un clima sempre più torrido, il nostro emisfero, ed in particolare quasi tutta l'Europa e l'America del Nord andrebbero incontro ad un freddo clima glaciale. Come sarà possibile tutto ciò? La risposta è nel ruolo critico che giocano i ghiacci artici sul mantenimento o sulla distruzione della corrente del Golfo che regola il clima del Nord Europa.



**Figura 2**  
Innalzamento del livello del mare (valori medi globali)  
Fonte: IPCC

## La criticità dei ghiacci dell'Artico

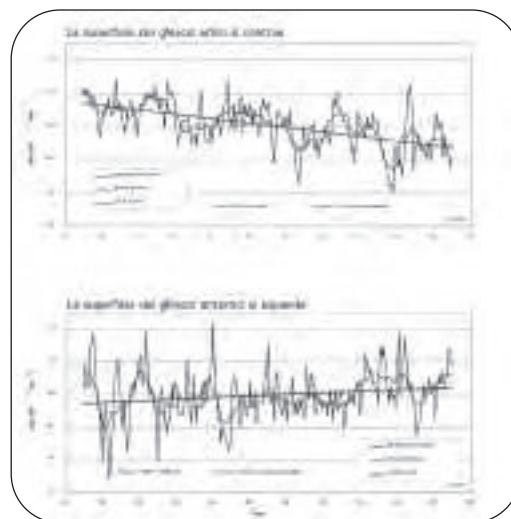
Il riscaldamento climatico porterà i ghiacci del nostro pianeta a giocare un ruolo differente in relazione alla latitudine ove essi sono ubicati, ma anche a seconda che siano artici o antartici. La valutazione della loro consistenza e della loro evoluzione va analizzata in termini di bilancio di massa, vale a dire in termini di bilancio complessivo tra perdite di ghiaccio causato principalmente dalla fusione in acqua e guadagni di ghiaccio causato principalmente dagli apporti delle precipitazioni atmosferiche.

L'evoluzione della situazione climatica attuale mostra che le temperature medie sono aumentate più alle alte latitudini (aree subpolari e polari) che alle basse (aree subtropicali ed equatoriali), sono aumentate più sui continenti che sugli oceani e più in inverno che in estate. L'andamento delle precipitazioni mostra che le precipitazioni totali annue, rispetto alle medie secolari, sono aumentate alle alte latitudini, ma sono diminuite alle basse, ed hanno modificato le loro caratteristiche: tendono ad estremizzarsi, cioè ad essere più intense ma di più breve durata, alternate a periodi, più o meno lunghi, di siccità.

In questo contesto, il bilancio di massa dei ghiacciai delle medie latitudini e basse latitudini (Alpi, Himalaya, Ande, Kilimangiaro ecc.) è negativo: questi ghiacciai sono, infatti, in fase di riduzione sia di superficie sia di volume, a causa della concomitanza di due fattori sfavorevoli: l'aumento delle temperature che hanno portato, tra l'altro, a quote più alte il limite dei ghiacci perenni, e la diminuzione delle precipitazioni con l'intensificazione di lunghi periodi di siccità. Con il prevedibile riscaldamento climatico futuro questa situazione di bilancio negativo non potrà che accentuarsi. Per i ghiacci polari, invece, la situazione è abbastanza differente: le temperature alle alte latitudini aumentano di più che in altre parti del mondo, ma le precipitazioni

ni aumentano ancora di più. Nel bilancio tra perdita e guadagno di ghiaccio dovrebbe, quindi, prevalere il guadagno (bilancio positivo) o, per lo meno, la stabilizzazione del volume complessivo dei ghiacci (bilancio nullo). E, invece, pur con gli stessi presupposti di variazione climatica, tra Artico e Antartico sussistono due situazioni diverse.

**Figura 3**  
La superficie dei ghiacci artici si contrae (grafico in alto)  
La superficie dei ghiacci antartici si espande (grafico in basso)  
Fonte: NOAA



In Antartide, nonostante le notevoli perdite di ghiaccio, per fusione (soprattutto nella penisola Antartica), e nonostante l'accelerato sgretolamento della piattaforma di ghiaccio (*ice-shelf*), il volume complessivo dei ghiacci della calotta antartica non solo non ha subito significative variazioni dal 1970 (da quando cioè esistono dati attendibili), ma tende ad aumentare.

In Artide, dove il ghiaccio non poggia del tutto su una piattaforma continentale come in Antartide (a parte la Groenlandia e l'Alaska), ma è prevalentemente marino o galleggiante (*ice-pack* e *ice sheet*), il bilancio di massa è negativo: la riduzione del volume e dell'estensione dei ghiacci artici sta proseguendo a ritmi sempre più veloci tanto che, soprattutto in questi ultimi cinque anni, la situazione appare piuttosto allarmante, nel 2005 la riduzione era del 16% rispetto al 2000.

Nella prospettiva di un futuro innalzamento del livello del mare causato dal riscaldamento



mento climatico globale, gli studi dell'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, un organismo scientifico consultivo delle Nazioni Unite) mostrano che, nello scenario medio di aumento della temperatura globale di circa 3 °C al 2100, l'aumento del livello marino, sarà composto dai seguenti contributi:

- per quasi il 60% a causa dell'espansione termica degli oceani (la dilatazione della massa oceanica a seguito del riscaldamento delle acque marine),
- per più del 30% a causa degli apporti di acqua proveniente dalla fusione dei ghiacciai delle medie e basse latitudini (Alpi, Himalaya, Ande ecc.)
- per il 12% a causa della fusione dei ghiacci artici.

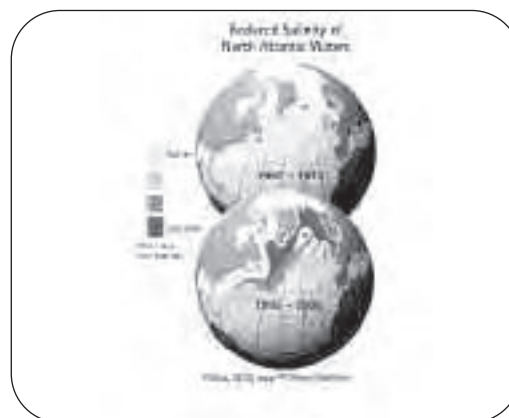


Siccome, però, il volume dei ghiacci antartici tenderà, anche se di poco, ad aumentare, la conseguenza sarà opposta, e cioè l'Antartide contribuirà ad abbassare il livello del mare, per circa il 2%.

Pertanto, il problema più importante che deriverà dalla fusione dei ghiacci artici non è l'innalzamento del livello del mare, ma è la riduzione della salinità delle acque marine del Nord Atlantico. La massiccia immissione di acqua dolce in mare, che potrebbe ulteriormente aumentare con il riscaldamento del clima, modificherà la concentrazione salina delle acque marine in un bacino, come quello del Nord Atlantico, che per quanto possa apparire esteso,

è abbastanza ristretto e tale da non permetterne un rapido rimescolamento e una omogeneizzazione con le acque più salate dei mari posti a più bassa latitudine.

Se, con il riscaldamento climatico, la velocità di immissione di acqua dolce nel Nord Atlantico sarà superiore alla velocità di diluizione e di omogeneizzazione con le acque salate dell'oceano Atlantico subtropicale, si creerà una differenza, o un gradiente, di salinità tra le acque dell'Atlantico settentrionale e quelle dell'Atlantico centro meridionale. Ebbene, la possibile futura glaciazione di gran parte dell'emisfero Nord sarà originata proprio da questa differenza di salinità delle acque atlantiche.



**Figure 4 e 5**  
A sinistra: innalzamento del livello del mare nello scenario medio elaborato dall'IPCC per il periodo 1990-2100  
A destra: riduzione della salinità nelle acque marine del Nord Atlantico

## Il ruolo della salinità delle acque marine nella corrente del Golfo

I primi sintomi di una diminuzione della salinità del Nord Atlantico già ci sono. In un articolo apparso sulla rivista *Science*, nel numero del 17 giugno 2005, alcuni ricercatori americani e norvegesi riportano gli studi e le ricerche condotte sul bilancio idrologico e glaciologico di tutto il Nord Atlantico, compreso fra i 50° e gli 85° di latitudine nord e l'andamento di questo bilancio negli ultimi 50 anni. I risultati di tali ricerche mostrano che, tra il 1965 ed il 1995, a causa della progressiva fusione dei ghiacci artici sono stati immessi nell'Atlantico del Nord circa 20 mi-

**Figura 6**  
La recente fase di interglaciazione: la parte in colore ocra indica lo "Younger Dryas"

la km cubici (20 mila miliardi di tonnellate) di acqua dolce in più rispetto a quelli che erano i normali apporti.

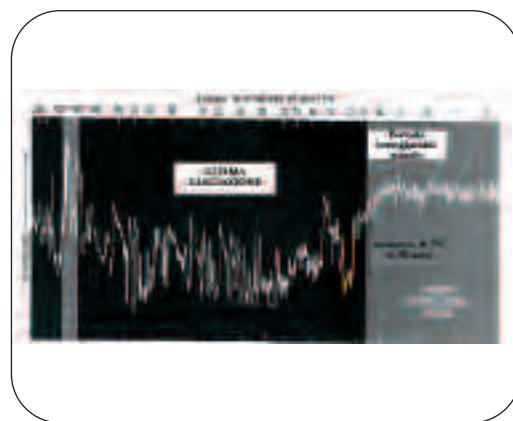
Questa maggiore immissione di acqua dolce ha determinato nei primi 1000 metri di profondità, una diminuzione media di circa 1,5 per mille della salinità dell'Atlantico del Nord in questi ultimi 40 anni. La modifica della salinità non appare per ora significativa o tale da destare preoccupazioni, ma è un sintomo che richiama alla memoria un evento del clima del passato del nostro pianeta, in cui la diminuzione della salinità del Nord Atlantico giocò un ruolo fondamentale.

Circa 13 mila anni fa il nostro pianeta stava uscendo dall'ultima grande glaciazione avvenuta circa 50 mila anni fa, e si stava avviando alla fase interglaciale calda, quella che stiamo vivendo tuttora e che ha permesso lo straordinario sviluppo dell'essere umano fino alla società umana moderna che conosciamo. In quel periodo, il nostro pianeta era in una fase di veloce riscaldamento climatico globale: i ghiacci che avvolgevano gran parte dell'emisfero Nord, ma anche dell'emisfero Sud, si stavano liquefacendo ed il livello del mare si innalzava sempre di più.

Tuttavia, accadde un fatto singolare. La fusione in acqua dolce dei ghiacci del Canada non finì nell'Atlantico settentrionale, ma si accumulò nelle valli deglacciate, nei laghi del Nord del Canada e nella baia di Hudson, finché 12.700 anni fa queste acque, ad un certo punto, traboccarono impetuosamente e si riversarono improvvisamente in mare.

La gran quantità di acqua dolce immessa nella parte settentrionale dell'Atlantico in un tempo troppo breve da permetterne un'adeguata diluizione con le acque salate preesistenti, portò ad una veloce diminuzione della salinità dell'Atlantico settentrionale. Ne seguì uno sconvolgimento delle correnti marine che causarono l'innescò di una nuova fase di glaciazione di gran parte dell'emisfero Nord: una glacia-

zione che durò circa 1300 anni. Questo evento è stato chiamato dai paleoclimatologi: "Younger Dryas".



Lo "Younger Dryas" è attualmente al centro di nuove e più approfondite ricerche paleoclimatiche per le possibili analogie con la situazione attuale di cambiamento climatico.

In pratica, era accaduto che l'eccesso di acqua dolce aveva modificato, e poi interrotto, la parte settentrionale della corrente del Golfo, detta anche corrente del Nord Atlantico, che si era ripristinata e stabilizzata dopo l'ultima glaciazione e che stava efficacemente concorrendo a riscaldare rapidamente l'emisfero Nord. La corrente del Golfo, la cui presenza stava giocando un ruolo cruciale nella deglaciazione, ebbe allora un ruolo altrettanto cruciale, ma per la sua assenza, nella successiva rapida glaciazione.

Le conoscenze scientifiche attuali non permettono di stabilire quale sia il valore limite di riduzione della salinità che determina la interruzione della corrente del Golfo. Quindi, questo problema viene attualmente affrontato in termini di rischio, e cioè si ipotizza che, quanto più è alta la differenza di salinità tra Nord Atlantico ed Atlantico subtropicale, tanto maggiore sarà la probabilità che il fenomeno possa realmente accadere. In ogni caso, prima di arrivare al collasso della corrente del Golfo ed ad un rapido cambiamento del clima verso una glaciazione di parte dell'emisfero Nord, ci sa-

rebbe una lunga serie di segnali premonitori, alcuni dei quali, secondo le ultime ricerche, sono già osservabili.

Nel convegno della EGU (European Geosciences Union), tenuto a Vienna nell'aprile 2005, sono stati presentati i risultati di una ricerca sperimentale condotta con strumentazione sottomarina, secondo la quale le colonne di acque dense discendenti nell'oceano Atlantico settentrionale tra la Norvegia e la Groenlandia, si erano indebolite e ridotte di numero rispetto ai decenni precedenti. Questo risultato può apparire come un chiaro segno di un indebolimento dei flussi d'acqua discendenti della corrente del Golfo, che proprio a quelle latitudini si inabissa fino a 3000 metri di profondità per tornare indietro, attraverso gli abissi marini, al punto di partenza (il golfo del Messico).

Per capire meglio questa problematica e la rilevanza della corrente del Golfo nelle problematiche del clima e dei cambiamenti climatici, è opportuno chiarire come funziona il meccanismo di questa corrente e come si può inceppare.

## Il meccanismo di funzionamento normale della corrente del Golfo

Il meccanismo di funzionamento di tutte le correnti marine, e più in generale, della grande corrente marina globale, detta "great ocean conveyor belt" di cui la corrente del Golfo fa parte integrante, si basa sulle differenze fra la temperatura e la salinità dell'acqua marina tra zone diverse del piano-



ta. La temperatura e la salinità, di una certa massa d'acqua, infatti, influenzano la densità di quella massa d'acqua, e quindi anche il suo peso e la sua dinamica, rispetto alle masse d'acqua circostanti.

In particolare, la densità aumenta o diminuisce in funzione di come aumenta o diminuisce ciascuno dei due fattori (la temperatura o la salinità), oppure di come aumenta o diminuisce la combinazione congiunta di temperatura e salinità. I movimenti delle masse d'acqua che si creano a causa delle differenze di densità determinano una circolazione complessiva delle acque oceaniche che si chiama termo-alina ("termo" indica la temperatura e "alina" indica la concentrazione di sale disciolto).

Il meccanismo di circolazione delle correnti marine è piuttosto complesso, anche in relazione alla morfologia dei fondali e delle forze di fluidodinamica che intervengono, ma per quanto riguarda la corrente del Golfo, esso può essere spiegato abbastanza semplicemente su base termodinamica, perché il normale movimento di questa corrente è generato essenzialmente dalla differenza di temperatura dell'oceano Atlantico tra la sua parte equatoriale e la sua parte polare.

Le acque più calde sono prodotte nella fascia subtropicale, ed in particolare nel golfo del Messico, dove il fenomeno del riscaldamento marino è esaltato dal fatto che si tratta di un mare piuttosto chiuso in cui si raggiungono temperature molto elevate (tra l'altro è anche la sede preferita degli uragani più violenti). Proprio perché calde, le acque sono meno dense, più leggere e viaggiano quindi in superficie. Una volta uscite dal golfo del Messico, tra la Florida e le isole Bahamas, si dirigono verso nord est in direzione della Norvegia, a causa dei venti occidentali prevalenti a quelle latitudini, ma soprattutto a causa della forza deviante (forza di Coriolis) generata dalla rotazione terrestre.

**Figura 7**  
Circuito della grande corrente oceanica globale

**Figura 8**  
Parte settentrionale della corrente del Golfo, detta anche corrente del Nord Atlantico



Nel loro cammino queste masse d'acqua calda perdono calore attraverso l'evaporazione, e trasferiscono il loro calore all'atmosfera ed all'ambiente circostante. Man mano che le acque della corrente evaporano, diventano, oltre che meno calde, anche sempre più salate (a causa dell'evaporazione), e cioè sempre più dense e più pesanti. Quando la densità delle acque diventa tale da non permettere la loro galleggiabilità in superficie, la corrente del Golfo (o le varie ramificazioni su cui si è suddivisa lungo il percorso), sprofonda verso gli abissi oceanici.

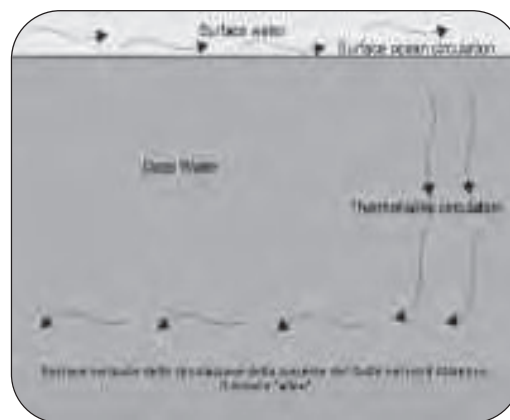
L'affondamento del ramo principale della corrente avviene non in un punto preciso, ma in un'area abbastanza estesa a ridosso delle coste della Norvegia (da quelle meridionali fino alla parte più settentrionale oltre il circolo polare artico). L'affondamento del ramo secondario che lambisce l'Islanda avviene anch'esso in una vasta zona tra l'Islanda, la Groenlandia e l'isola di Terranova, dove incontra la corrente fredda del Labrador.

Una volta sprofondate negli abissi oceanici, le acque della corrente del Golfo, ormai fredde e più salate, tendono a chiudere il circuito tornando verso il punto di partenza, anche se seguono un cammino diverso da quello di andata, a causa anche questa volta della forza deviante terrestre o forza di Coriolis.

Visto schematicamente nel suo insieme, il meccanismo di funzionamento della corrente del Golfo è basato su due moto-

ri di azione: uno posto nel golfo del Messico (risucchio dai fondali e pompaggio in superficie di acqua calda e più leggera) ed uno posto nella zona sub artica a ridosso della Norvegia (prelievo dalla superficie e pompaggio in profondità di acqua salata e più pesante). Analogamente alla grande "conveyor belt" mondiale, la corrente del Golfo, nell'Atlantico centro settentrionale, è un nastro trasportatore di calore che gira sotto la spinta di due grossi ingranaggi azionati da due motori: uno posto in zona subtropicale (motore termico) e l'altro in zona polare artica (motore alino).

**Figura 9**  
Sezione verticale della circolazione della corrente del Golfo del Nord Atlantico: il motore "Alino"



## L'inceppamento del meccanismo

Il nastro trasportatore, ovvero questo meccanismo di trasferimento del calore dalla zona subtropicale alla zona settentrionale e sub artica europea, si inceppa quando uno dei due motori di azione non funziona più, oppure uno dei due ingranaggi, azionati da questi motori, non si muove in modo più o meno sincrono con l'altro: la conseguenza finale è la rottura del nastro trasportatore. Pertanto, se il riscaldamento climatico in atto dovesse proseguire in futuro allo stesso ritmo o addirittura ritmo maggiore di quello attuale, esiste la possibilità concreta che il motore di azione polare vada fuori uso e l'ingranaggio polare artico (quello alino) non più faccia girare il nastro trasportatore di calore.



Il malfunzionamento del motore “alino” è originato dalla riduzione della salinità marina. Se le acque oceaniche dell'oceano Atlantico settentrionale diventeranno sempre meno salate e più dolci, cioè sempre meno dense (l'acqua dolce è più leggera dell'acqua salata) rispetto a quelle subtropicali, l'acqua a maggiore salinità, anche se più calda, della corrente del Golfo, non riuscirà più a galleggiare fino alle alte latitudini, perché tenderà a sprofondare negli abissi oceanici molto prima di raggiungere la Norvegia e il mare di Barents.

Ma, quanto prima? Dipenderà dalla differenza di salinità tra le acque della corrente del Golfo e le acque circostanti dell'oceano Atlantico settentrionale. Se la differenza di salinità sarà molto marcata la corrente del Golfo sprofonderà quasi subito dopo l'uscita del Golfo del Messico oppure si manterrà ancora sotto forma di corrente, ma circolando solo alle basse latitudini subtropicali.

Se la differenza di salinità non sarà molto marcata, la corrente potrebbe prima rallentare, allargarsi forse orizzontalmente lungo i paralleli in numerosi rami e vortici, e poi sprofondare molto prima di arrivare in Norvegia e probabilmente già all'altezza delle isole britanniche.

In ogni caso, non si sa esattamente cosa potrebbe succedere nella realtà e, tra l'altro, non si sa ancora se sarà possibile che la corrente del Golfo possa subire un significativo rallentamento ed una deviazione prima di sprofondare o se, invece, non possa subire un collasso immediato. Secondo gli scienziati che si occupano del problema, è probabile che il nastro trasportatore possa rallentare in fase iniziale, ma sicuramente non potrebbe resistere per un lungo periodo di tempo in condizioni integre dato il disequilibrio fra i due motori che governano il suo funzionamento e, dunque, alla fine dovrebbe rompersi.

Il meccanismo della corrente del Golfo appare, infatti, essere un meccanismo che, o funziona bene, o non funziona affatto,

Non è un meccanismo “lineare” che si modifica proporzionalmente al modificarsi della causa di funzionamento o malfunzionamento, ma un meccanismo “a soglia” tale, cioè, da modificarsi poco o nulla fino ad una certa soglia, per poi subire, superata tale soglia, una variazione improvvisa e rapida, che è irreversibile, oppure potrebbe essere reversibile ma solo in condizioni totalmente diverse dalle precedenti (comportamento ad “isteresi”). Pur non conoscendo ancora quale sia esattamente questa soglia di rottura, sappiamo, però, che è collegata fondamentalmente alla differenza di salinità tra acque della corrente del Golfo e acque oceaniche circostanti alla stessa corrente, e più in generale alla differenza di densità tra acque oceaniche subtropicali ed acque subpolari.

Le più recenti ricerche, come quella citata e pubblicata su *Science*, mostrano che la differenza di salinità, e quindi di densità, tra mari polari e mari subtropicali atlantici, è aumentata, anche se di poco. Ma, ciò che preoccupa di più è l'aumento aggiuntivo della differenza di densità, alla quale concorre, oltre che il fattore salinità, anche il fattore temperatura. In questi ultimi anni, infatti, l'oceano Atlantico settentrionale e tutti i mari artici, si stanno riscaldando ad un ritmo più elevato di quello dell'oceano Atlantico subtropicale ed equatoriale, e tale maggiore riscaldamento non fa che amplificare ulteriormente le diverse caratteristiche di densità complessiva delle acque fra Nord e centro Atlantico.

Inoltre, vanno tenute presenti anche le ricerche scientifiche dell'ENEA in corso in ambito mediterraneo, dalle quali risulta che il Mediterraneo in questi ultimi anni tende ad essere un mare sempre più caldo e più salato e sta già esportando, attraverso lo stretto di Gibilterra, questa sua maggiore salinità in Atlantico, in un'area cioè che è prospiciente alla zona subtropicale. Il Mediterraneo, quindi, potrebbe dare una mano a far inceppare il motore “alino” polare.

## Le conseguenze dell'inceppamento del meccanismo

Grazie alla presenza della corrente del Golfo le regioni nord europee godono di un clima molto più caldo di analoghe regioni poste alla stessa latitudine. Le isole britanniche, per esempio, sono alla stessa latitudine delle aree settentrionali del Quebec, dell'Ontario e di tutta la parte settentrionale del Canada, dove normalmente vi è "permafrost" e una coltre spessa di ghiacci durante tutto il semestre freddo. La Norvegia è alla stessa latitudine della Groenlandia, ma anche dello stretto di Davis, dell'isola di Baffin e dell'Alaska, dove predominano la tundra, i ghiacci polari permanenti ed il ghiaccio marino, tutte cose che, viceversa, non ci sono in Norvegia e nel mar di Norvegia. Ciò accade perché la differenza delle temperature medie al suolo tra le due coste opposte dell'Atlantico, pur situate alla stessa latitudine, può superare anche i 10 °C e le temperature medie sul mare possono differire perfino di 20 °C sugli opposti lati dell'Atlantico settentrionale. Con l'interruzione della corrente del Golfo queste differenze non esisterebbero più.

Tuttavia, l'interruzione della corrente del Golfo innescherebbe soprattutto la conseguenza più grave e più temuta: la glaciazione. Aumentando l'estensione e la permanenza dei ghiacci sul Nord Europa, aumenterebbe anche la riflettività della superficie terrestre gelata (e quindi bianca) alla radiazione solare. Se il suolo ed il mare non assorbono l'energia solare, ma la riflettono verso lo spazio, il raffreddamento climatico aumenta, ed ulteriori ghiacci vengono formati. Di conseguenza, aumenta ancor di più l'estensione delle aree ghiacciate, che a loro volta impediranno alla radiazione solare di essere assorbita dalla superficie terrestre, facendo crescere ancora di più l'estensione e la consistenza dei ghiacci in una spirale inarrestabile.

Nel frattempo le acque calde del Golfo, a causa della interruzione della corrente del Golfo, non smaltirebbero più il loro calore verso l'emisfero Nord, ma nella fascia intertropicale oppure, più probabilmente verso l'emisfero sud, che si surriscalderebbe ancora di più. Insomma, si innescherebbe un processo di glaciazione che si amplificherebbe autonomamente, andando molto al di là rispetto alla causa che lo ha scatenato. In tal caso, si arriverebbe, appunto, al paradosso che mentre l'emisfero sud, e la parte meridionale dell'emisfero Nord, andrebbero incontro ad un clima torrido, gran parte dell'Europa centro-settentrionale, compresa la Siberia, e gran parte dell'America settentrionale andrebbero incontro, invece, ad un progressivo congelamento.

## Cambiamento improvviso del clima e catastrofe immediata

Quantunque l'oceano Atlantico settentrionale stia diventando più caldo e meno salato, e quantunque esistano segnali di un indebolimento del motore "alino" nell'Artico, non sussiste, tuttavia, un pericolo immediato, o a breve termine, di una deviazione o di una rottura della corrente del Golfo. Il problema di un'attenuazione sensibile della corrente del Golfo o di una sua possibile deviazione, come hanno mostrato anche alcune ricerche italiane, si porrebbe non prima di un centinaio di anni e cioè dopo il 2100.

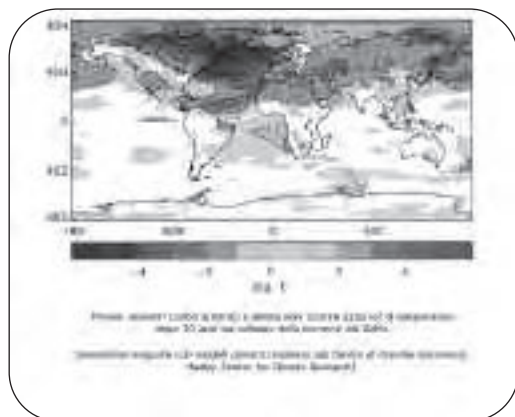
Secondo, invece, le valutazioni condotte da IPCC (l'organo scientifico consultivo delle Nazioni Unite prima citato), il rischio di un collasso della corrente del Golfo si potrebbe porre, qualora la temperatura media globale aumentasse di oltre 4 °C nel 2100 rispetto al 2000 (cioè per un tasso di incremento medio della temperatura pari a 0,4 °C per decennio).

Questa evenienza potrebbe diventare reale, secondo gli scenari IPCC, solo qualora nei prossimi 50 anni tutti gli abitanti

della Terra continuassero a bruciare combustibili fossili, e ad emettere gas di serra, secondo le attuali tendenze e non si facesse assolutamente nulla, né per ridurre le emissioni in atmosfera, né per rallentare la crescita delle concentrazioni atmosferiche di anidride carbonica e degli altri gas ad effetto serra.

Una volta che la corrente del Golfo effettivamente collassasse, la successiva glaciazione non potrebbe avvenire in tempi rapidi ma occorrerebbero probabilmente anche alcuni secoli prima di vedere gran parte dell'emisfero Nord sotto una spessa coltre di ghiacci. Secondo una simulazione modellistica effettuata dal "Hadley Center" britannico per le ricerche sul clima, occorrerebbero innanzitutto diversi decenni (30 anni secondo la simulazione), affinché il raffreddamento possa raggiungere valori tali da permettere l'avvio di una glaciazione.

Probabilmente tale fase di glaciazione avrebbe origine nel Nord America e nell'Atlantico settentrionale dove le temperature, secondo le proiezioni del modello climatico utilizzato, si raffredderebbero di più, per propagarsi poi nell'Europa settentrionale ed in gran parte della Siberia. Il tutto, comunque, richiederebbe centinaia di anni, come d'altra parte ci insegna la passata improvvisa glaciazione dello "Younger Dryas". Dunque, non si tratta di tempi brevi, almeno nella scala dei tempi umani, ma nella scala dei tempi geologici, invece, si tratta di tempi molto rapidi, anzi, addirittura istantanei.



## Bibliografia

ACIA, 2004 - International Scientific Symposium on climate change in the Arctic: Impact of a warming Arctic- Reykiavik, 9-12 November 2004, Cambridge University Press, Cambridge.

CLARK, P.U. ET AL., 2005 - The role of the thermohaline circulation in abrupt climate change - *Nature*, vol. 415, pp. 863-869 (21 Feb 2005).

CURRY, R. AND MAURITZEN, C., 2005 - Dilution of the Northern North Atlantic Ocean in Recent Decades - *Science*, vol. 308, Issue 5729, pp. 1772-1774 (17 June 2005).

IPCC, 2001 - *Climate Change: The Scientific Basis* - Cambridge University Press, New York.

IPCC, 2001 - *Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability* - Cambridge University Press, New York.

LUCARINI, V. e al., 2005 - Destabilization of the thermohaline circulation by transient changes in the hydrological cycle - *Climate Dynamics*, Vol. 24, Issue 2-3, pp. 253-262.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2004 - *Abrupt climate change: inevitable surprise* - National Academies Press, Washington DC (USA).

VELLINGA, M. AND WOOD, R.A., 2002 - Global climate impacts of the collapse of the Atlantic thermohaline circulation - *Climate Change*, Vol. 54, pp. 251-267.

WADHAMS, P. AND GOSSE, H., 2005 - Arctic Climate Change - Lecture on the climate of polar regions, EGU: European Geoscience Union, Vienna 24-29 April 2005.

**Figura 10**  
Aumenti previsti (colore ocra) e dimensioni (in nero) di temperatura dopo 30 anni dal collasso della corrente del Golfo (fonte: ECMWF)

# I biocarburanti in Italia: ostacoli da superare e opportunità di sviluppo

I temi della produzione e dell'impiego dei biocarburanti rivestono un ruolo importante nella definizione della nuova politica energetica ed ambientale europea.

Ma per ridurre i costi di produzione e ottimizzare l'uso del territorio sono necessarie nuove filiere produttive in grado di offrire significative opportunità nell'intero comparto agro-industriale del nostro Paese

**VITO PIGNATELLI  
CHIARA CLEMENTEL**

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

*Tratto da:* ENERGIA, AMBIENTE E INNOVAZIONE 2/06



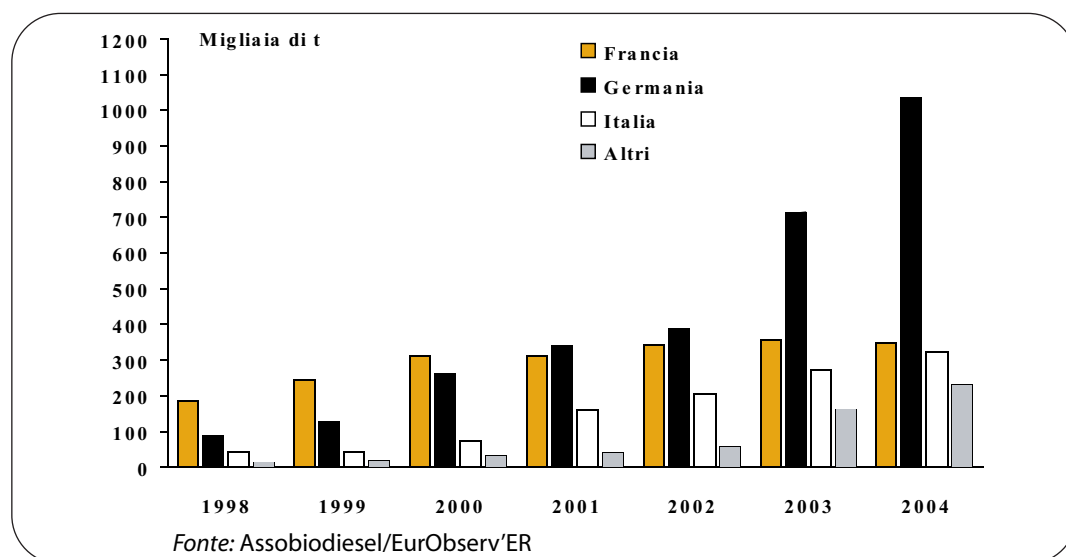
**N**ello scorso anno, sull'onda dei continui aumenti del prezzo del petrolio e del riacutizzarsi dei problemi ambientali legati all'uso crescente e pressoché esclusivo dei combustibili fossili nel settore dei trasporti, si è assistito ad una crescente ripresa di interesse per la produzione e utilizzazione, anche nel nostro Paese, dei cosiddetti "biocarburanti", carburanti liquidi o gassosi ottenuti da processi di trasformazione chimica o biologica di biomasse di varia natura (prodotti agricoli, residui e reflui agroindustriali e zootecnici ecc.).

Come è noto, la produzione di biocarburanti rappresenta in molti paesi europei ed extraeuropei una realtà diffusa e consolidata da molti anni, ed alimenta un mercato in continua espansione (basti pensare ai recentissimi accordi commerciali per la vendita di bioetanolo dal Brasile al Giappone o alla crescita dell'industria europea del biodiesel, evidenziata nel grafico di figura 1, che nel 2004 ha raggiunto una produzione complessiva di quasi 2 milioni di tonnellate). I motivi che hanno portato a questa situazione sono certamente molteplici, ma è fuori di dubbio che, oltre alle motivazioni di carattere ambientale e a quelle, quanto mai attuali, legate alla sicurezza e alla diversificazione delle fonti di approvvigionamento energetico, un fattore importante è rappresentato dalle nuove prospettive che la produzione di biocarburanti apre per il settore agricolo.

Per quel che riguarda in particolare l'Unione Europea, infatti, i temi della produzione e dell'impiego dei biocarburanti rivestono un ruolo importante nella definizione della nuova politica energetica ed ambientale europea.

L'importanza del settore è stata riconosciuta con l'emanazione della Direttiva n. 2003/30/CE dell'8 maggio 2003, che prevede il raggiungimento per ogni Stato membro di obiettivi indicativi di sostituzione dei carburanti derivanti dal petrolio con biocarburanti e/o altri carburanti da fonti rinnovabili per una quota pari al 2% (sulla base del contenuto energetico) nel 2005 fino al 5,75% nel 2010.

L'Italia ha recepito questa Direttiva con il decreto legislativo n. 128 del 30 maggio 2005 stabilendo, in un primo momento, obiettivi indicativi nazionali più bassi (pari rispettivamente all'1% entro il 31 dicembre 2005 e al 2,5% entro la fine del 2010) che sono stati successivamente riportati a valori sostanzialmente uguali a quelli della legge 11 marzo 2006, n. 81, che obbliga i distributori di carburante a immettere sul mercato benzina e gasolio contenenti percentuali crescenti di bio-



**Figura 1**  
Produzione di biodiesel in Europa nel periodo 1998 - 2004

carburanti (fino al 5% nel 2010) a partire dal 1° luglio 2006.

In ogni caso, il nuovo contesto ha indubbiamente contribuito a riaccendere l'interesse per l'argomento sia nella pubblica opinione, sia da parte delle principali associazioni di produttori agricoli (Confagricoltura, Coldiretti, CIA), sia nel mondo politico, con il dichiarato obiettivo di dar vita ad iniziative e adottare misure specifiche per favorire una rilevante crescita del settore rispetto alla realtà attuale, anche con riferimento a quanto accade nel contesto europeo e internazionale.

È però evidente che un tale fervore comporta un rischio concreto - soprattutto in un quadro di perdurante incertezza sulle strategie e conseguente mancata definizione delle priorità di intervento da parte dei decisori politici - di dispersione di risorse, sovrapposizione di iniziative o, peggio, scelte dettate più da convincimenti personali o interessi di parte che da una valutazione ragionata e per quanto possibile oggettiva della situazione reale e delle conoscenze disponibili.

Alla luce di tutto questo, si ritiene quindi opportuno evidenziare alcuni aspetti di particolare criticità che non possono essere sottaciuti se si vuole affrontare il problema in un'ottica complessiva e con una prospettiva che vada oltre il breve-medio termine, al fine di contribuire all'individuazione di soluzioni realisticamente praticabili. In particolare, a monte di qualunque decisione, dovrebbero essere presi in considerazione:

1. le dimensioni del mercato potenziale e le capacità produttive dell'industria;
2. le effettive capacità del sistema agricolo di produrre le necessarie materie prime;
3. le finalità, la praticabilità e l'efficacia delle misure di incentivazione di volta in volta proposte;
4. i reali benefici di carattere ambientale, in particolare per quel che riguar-

da le emissioni degli autoveicoli;

5. le strategie e gli obiettivi prioritari delle attività di ricerca e sviluppo tecnologico.

## Mercato potenziale e infrastrutture industriali

Sia la direttiva europea, sia il decreto legislativo n. 128/2005 contengono un lungo elenco di prodotti potenzialmente utilizzabili come biocarburanti (tabella 1) ma, allo stato attuale della tecnologia, gli unici realmente utilizzabili su larga scala sono il biodiesel, l'etanolo e l'ETBE, etere etil ter-butilico, ottenuto a partire da etanolo ed isobutene (in modo del tutto analogo all'etere MTBE, prodotto a partire da metanolo di sintesi) considerato come biocarburante per il 47% in peso, corrispondente al contenuto in etanolo.

In Italia, il consumo annuo stimato di carburanti liquidi per autotrazione è pari a circa 15 milioni di tonnellate (Mt) di benzina e 25 Mt di gasolio. Per quel che riguarda il contenuto energetico, 1 t di biodiesel corrisponde a circa 0,9 t di gasolio, mentre 1 t di etanolo equivale a 0,6 t di benzina.

Di conseguenza, le dimensioni potenziali dei rispettivi mercati, nell'ipotesi conservativa di voler conseguire solo gli obiettivi della legge 11 marzo 2006, n. 81, sono pari a circa 280.000 t/anno di biodiesel e 250.000 t/anno di bioetanolo per sostituire l'1% dei carburanti fossili

**Tabella 1 - Prodotti potenzialmente utilizzabili come biocarburanti citati nella direttiva n. 2003/30/CE e nel decreto legislativo n. 128/2005**

- Bioetanolo
- Biodiesel
- Biogas
- Biodimetiltere
- Bio-ETBE  
(basato sul bioetanolo,  
il 47% è considerato rinnovabile)
- Biocombustibili di sintesi derivanti da biomasse (FT-liquids)
- Bioidrogeno
- Oli vegetali puri

e a 1.400.000 t/anno di biodiesel e 1.250.000 t/anno di bioetanolo per il 5%. Nel nostro Paese, la produzione industriale di biodiesel (miscela di esteri metilici ottenuti per trasformazione chimica di oli vegetali) è stata avviata a partire dal 1993 e gli impianti oggi in funzione hanno una capacità produttiva stimata in circa 700.000-1.000.000 t/anno, ben superiore alle produzioni attuali (320.000 t nel 2004) e all'entità del "contingente" che può essere immesso al consumo con la totale esenzione dell'accisa sui carburanti (200.000 t nel 2004), e sufficiente a coprire, almeno per i prossimi due-tre anni, anche l'eventuale richiesta connessa al raggiungimento degli obiettivi sopra citati.

È però importante notare che l'attuale produzione di biodiesel deriva per la quasi totalità da materie prime (oli o semi oleosi) importate, e la constatazione del limitato contributo delle materie prime agricole nazionali era una delle principali ragioni per cui gli obiettivi indicativi di immissione al consumo di biocarburanti stabiliti dal citato decreto legislativo n. 128/2005 erano stati praticamente dimezzati rispetto a quelli previsti dalla Direttiva europea di riferimento.

Per quel che riguarda invece il bioetanolo, sono attualmente in fase di avvio iniziative industriali di rilevanti dimensioni per la sua produzione e trasformazione in ETBE, tenuto conto che anche per questi prodotti era già prevista una defiscalizzazione fino ad un tetto massimo corrispondente ad una produzione di circa 75-80 mila t/anno di etanolo, anche se la mancata emanazione del decreto interministeriale attuativo per la produzione e commercializzazione di bioetanolo in esenzione di accisa ha fatto sì che nello scorso anno solo 8.000 t circa di questo prodotto siano state effettivamente immesse sul mercato. È difficile fornire una stima attendibile dell'effettiva capacità produttiva di bioetanolo da parte del sistema industriale nazionale, in quanto non tutte le distillerie

presenti in Italia (circa 60) dispongono degli impianti necessari per la produzione di etanolo anidro, utilizzabile per l'incorporazione diretta nella benzina o per la trasformazione in ETBE. A puro titolo di riferimento, nel corso del 2004 sono state prodotte circa 120.000 t di etanolo di diversa qualità, parte delle quali utilizzate come biocarburante fuori dei confini nazionali. La capacità produttiva degli impianti per la conversione di etanolo in ETBE presenti sul territorio nazionale, di proprietà della società Ecofuel del Gruppo ENI e attualmente utilizzati per la produzione dell'MTBE, è stimata intorno alle 300-350 mila t/anno (corrispondenti a 140-170 mila tonnellate di bioetanolo). In sostanza, nel nostro Paese esistono infrastrutture industriali, adeguate per dimensioni e spesso all'avanguardia dal punto di vista delle tecnologie, per la trasformazione dei prodotti agricoli in biodiesel o bioetanolo, unitamente alla disponibilità, da parte dei produttori di carburanti, a distribuire il biodiesel miscelato con il gasolio e la benzina additivata con ETBE, ma manca quasi del tutto la parte iniziale della filiera, cioè la produzione delle materie prime agricole da destinare alla conversione in biocarburanti, in quanto l'industria trova più conveniente utilizzare materie prime di importazione rispetto a quelle prodotte dal sistema agricolo nazionale perché, allo stato attuale della tecnologia, i costi di produzione della materia prima in Italia sono ancora troppo elevati rispetto a quelli di analoghe produzioni di provenienza estera.

## Il sistema agricolo

Nei primi anni 80, l'agricoltura europea e, in misura minore, quella nazionale, si trovarono a dover fronteggiare il problema di una sovrapproduzione di cereali che, non più collocabile sul mercato internazionale per la presenza di concorrenti più agguerriti, rischiava di mettere in crisi l'intero compar-

to produttivo. Prese allora corpo l'ipotesi di utilizzare queste materie prime - in modo del tutto analogo a quanto accadeva negli Stati Uniti con il mais e pur nella consapevolezza dei maggiori costi rispetto all'uso della fonte fossile - per una produzione su larga scala di bioetanolo da utilizzare direttamente nella benzina (nella misura del 5% in volume stabilita al termine di un lungo e faticoso negoziato fra la Commissione Europea, l'industria automobilistica e quella petrolifera) come additivo altotecnico della benzina, anche in considerazione della necessità di dover procedere in tempi rapidi all'eliminazione degli additivi a base di piombo. Tale ipotesi, sostenuta da grandi gruppi agroindustriali, fu presa in considerazione anche in Italia e l'allora Ministero dell'Agricoltura e Foreste affidò all'ENEA il compito di coordinare un gruppo di esperti per valutare la reale fattibilità di una simile scelta. Lo studio in questione mise in evidenza, da un lato la fattibilità tecnica della produzione e impiego su larga scala del bioetanolo (ribadendo peraltro l'opportunità di diversificare le possibili materie prime in relazione alle peculiarità dei sistemi agricoli e alle condizioni pedoclimatiche dei diversi Paesi), dall'altro la necessità, da parte dello Stato, di intervenire con adeguate misure di incentivazione per rendere economicamente sostenibile tale impiego. Successivamente, con il venir meno dell'"emergenza eccedenze" in seguito all'introduzione massiccia della messa a riposo obbligatoria dei terreni agricoli - il cosiddetto "set-aside" - e la concomitante scelta, da parte dei produttori di carburanti, di seguire altre vie per l'eliminazione del piombo dalla benzina, l'argomento perse di interesse e l'impiego delle miscele benzina/etanolo si limitò ad alcune, anche se significative, prove di flotta (ad esempio i taxi di Bologna nella stagione invernale 1990-91), ma non divenne mai oggetto di iniziative industriali.

La situazione attuale è profondamente diversa in quanto oggi esiste, a livello

europeo e nazionale, la volontà politica di sostenere la crescita di un mercato dei biocarburanti, volontà che si esplicita nell'obiettivo della progressiva sostituzione di percentuali limitate, ma non trascurabili, di carburanti fossili con quelli di origine agricola. In questo senso, la competizione economica non è quindi più quella etanolo/benzina, ETBE/MTBE o biodiesel/gasolio ma, una volta stabilito il fatto che tali prodotti debbano essere comunque incorporati in qualche misura nei carburanti convenzionali, quella fra le diverse materie prime da utilizzare per la produzione dei predetti biocarburanti.

Come si è detto in precedenza, però, l'industria del settore trova e potrebbe trovare in futuro più conveniente utilizzare materie prime (semi oleosi, oli vegetali, melasso, cereali ecc.) di importazione rispetto a quelle prodotte dal sistema agricolo nazionale, dal momento che, per poter collocare sul mercato i propri prodotti in un regime di concorrenza, deve ovviamente ridurre il più possibile i costi di produzione (che, a seconda dei casi, dipendono per il 70-80% da quelli delle materie prime).

Questo è oggi il principale ostacolo che si frappone alla realizzazione di una filiera produttiva completa dei biocarburanti nel nostro Paese in quanto è evidente che, allo stato attuale della tecnologia, i costi di produzione della materia prima in Italia sono ancora troppo elevati rispetto a quelli di analoghe produzioni di provenienza estera. È importante sottolineare il fatto che, in realtà, sull'entità di tali diseconomie esistono solo stime, in quanto i dati disponibili sono scarsi e limitati per lo più alla produzione di oleaginose per il biodiesel in regime di "set-aside produttivo", su un arco di tempo di pochi anni. È evidente che l'impiego di varietà specificamente selezionate e adatte ai diversi areali produttivi o, in prospettiva, di colture diverse da quelle tradizionali (topinambur, sorgo zuccherino, cicoria per il bioetanolo, girasole ad alto tenore di acido oleico, brassi-

cacee diverse dal colza per il biodiesel), finora oggetto solo di prove sperimentali, potrebbe migliorare l'economicità complessiva della filiera, ma è altrettanto evidente che solo passando dalla sperimentazione alla produzione sarà possibile ottenere dati realmente attendibili.

Ma quanta materia prima occorre per soddisfare la prevedibile richiesta di biocarburanti in Italia nel prossimo futuro? La risposta a questa domanda dipende ovviamente sia dai prodotti agricoli utilizzati, sia dalle tecnologie di conversione. Considerando che le tecnologie di produzione di biodiesel da colza e di etanolo da cereali e barbabietole sono ormai consolidate, è facile ricavare con semplici calcoli delle stime attendibili. La situazione è invece diversa se si vuole partire da altre specie vegetali, anche se oggetto di sperimentazione da molti anni e in contesti differenti.

Qualunque sia la materia prima, i quantitativi in gioco sono decisamente rilevanti, dell'ordine delle centinaia di migliaia, e probabilmente superiori al milione di tonnellate/anno. Questo si traduce, ovviamente, nella necessità di destinare centinaia di migliaia (e, in prospettiva, milioni di ettari) alla produzione di colture dedicate e, in questo caso, la variabilità delle stime è ancora maggiore, in quanto legata a dati di produttività che, nella maggior parte dei casi, provengono da attività sperimentali o da colture praticate in altri Paesi (grano tenero in Francia, colza in Germania ecc.). Per citare, a puro titolo di esempio, un dato in qualche modo "ufficiale", nel 1999 il Programma Nazionale per la Valorizzazione delle Biomasse Agricole e Forestali (PNVBAF) del Ministero delle Politiche Agricole (MiPAF) e Forestali prevedeva per quest'anno un impegno di superficie agricola pari a 140.000 ha per colture da etanolo (produzione stimata 490.000 t) e 160.000 ha per colture da biodiesel (340.000 t).

In realtà, simili previsioni si sono rivelate in passato abbastanza inattendibili, e non si può ragionevolmente pensare che, nella situazione attuale, possano realizzarsi nel breve periodo, se non in misura molto limitata. Infatti, negli ultimi anni, le superfici coltivate a oleaginose per la produzione di biodiesel non hanno mai superato (sul finire degli anni 90) i 60.000 ha/anno e sono state caratterizzate da rese medie in olio - e, quindi, in biodiesel - inferiori ad 1 t/ha. Più recentemente, si è parlato diffusamente, soprattutto da parte di rappresentanti delle Confederazioni agricole, di un milione di ettari potenzialmente destinabili alla produzione di biocarburanti in sostituzione di colture alimentari non più remunerative a causa della riduzione delle integrazioni al reddito degli agricoltori prevista dalla nuova politica agricola comune (PAC), compresi i 120-150 mila ha circa non più utilizzabili per la coltivazione della barbabietola in seguito al forte ridimensionamento della produzione di zucchero conseguente alla recente riforma dell'OCM del settore bieticolo-saccarifero europeo.

La reale praticabilità di simili proposte è comunque tutta da verificare in quanto, anche se questi terreni fossero realmente disponibili, la produzione di materia prima da convertire in bioetanolo e/o biodiesel richiede la sottoscrizione di contratti di fornitura pluriennali con l'industria di trasformazione, ed è difficile pensare che un gran numero di coltivatori siano interessati ad impegnarsi in tal senso in mancanza di accordi chiari e di ampio respiro e di un quadro legislativo certo e stabile che assicuri un'equa ripartizione di costi e benefici fra tutti i soggetti interessati allo sviluppo della filiera produttiva.

## Le misure di incentivazione

Nei numerosi convegni, incontri e dibattiti sul tema dei biocarburanti, al di là degli aspetti di natura più propriamente



tecnica, il discorso finisce sempre col richiamare la necessità, per lo meno nel breve-medio periodo, di una qualche forma di incentivazione, citando le esperienze di tutti gli altri paesi che hanno già da tempo intrapreso questa strada. Se tutti concordano sulla necessità di un simile intervento, esiste una notevole confusione sulla sua entità, modalità e durata. In sostanza, le soluzioni proposte sono sostanzialmente le seguenti:

1. l'esenzione totale o parziale dall'imposta di fabbricazione sui carburanti (accisa); soluzione adottata da Francia, Germania, Svezia e, limitatamente a un "contingente" prefissato per il biodiesel, dal nostro Paese. Questa soluzione, rendendo i biocarburanti più convenienti rispetto agli analoghi prodotti di origine fossile, stimola la crescita del mercato, ma comporta una riduzione delle entrate fiscali via via più sensibile man mano che aumenta la quota di mercato dei biocarburanti. Per ovviare a questo problema, sono stati proposti meccanismi flessibili che legano l'entità della defiscalizzazione al prezzo del barile di petrolio o ne stabiliscono la progressiva riduzione in un certo numero di anni, nell'ipotesi ottimistica che il progresso tecnico-scientifico porti alla diminuzione, se non all'azzeramento, del differenziale di costo rispetto carburanti derivati dal petrolio (o in quella pessimistica che il prezzo del petrolio continui a crescere costantemente fino a livelli significativamente più alti di quelli attuali).
2. L'incorporazione obbligatoria, interpretando in senso cogente le prescrizioni della direttiva europea 2003/30/CE, con sanzioni per le compagnie petrolifere che immettono sul mercato carburanti non additivati con prodotti rinnovabili. Questo genere di misure obbliga l'industria petrolifera ad approvvigionarsi di biocarburanti ma, ovviamente, non può evitare

che detta industria vada ad acquistare biodiesel o etanolo dove costa meno cioè, in sostanza, da paesi terzi o da produttori nazionali che utilizzano materie prime a basso costo di provenienza estera. Inoltre, l'obbligo ad immettere comunque in commercio miscele contenenti una certa percentuale di biocarburanti o additivi da essi derivati (ETBE) più costosi rispetto agli analoghi prodotti di origine fossile rischia di tradursi - se non controbilanciato da altre misure - in un aumento di prezzo dei carburanti alla pompa del distributore.

3. Meccanismi analoghi a quello dei "certificati verdi", che premiano chi produce i biocarburanti e/o le relative materie prime in modo diretto o indiretto, tramite agevolazioni fiscali, stabilendo nel contempo un obbligo di acquisto da parte delle compagnie petrolifere. Tale meccanismo, per molti versi simile a quello in vigore in diversi paesi, Italia compresa, per incentivare la produzione di elettricità da fonti rinnovabili, comporta comunque un esborso da parte dello Stato, giustificabile solo in conseguenza dei vantaggi ambientali diretti e indiretti legati alla produzione e uso dei biocarburanti, che devono essere in qualche modo "monetizzati".

Per quel che riguarda l'Italia, la soluzione finora prescelta è stata quella dell'esenzione dall'accisa per un determinato "contingente" di biodiesel (la cui entità è variata nel tempo oscillando fra le 125.000 e le 300.000 t/anno) e, più di recente, di bioetanolo, ma è evidente che la pura e semplice defiscalizzazione del biocarburante non è di per sé in grado di promuovere l'uso di materie prime nazionali piuttosto che di importazione. Una soluzione proposta per questo problema è quella di vincolare l'effettiva erogazione degli incentivi alla realizzazione di specifici "accordi di filiera" che, con riferi-

mento ad uno specifico contesto territoriale più o meno esteso, impegnino tutti i soggetti interessati, dagli agricoltori agli utilizzatori dei biocarburanti e, in tale direzione, la Legge Finanziaria 2006 presenta, rispetto al passato, alcune significative novità, fra le quali il fatto di aver vincolato l'immissione al consumo di una frazione significativa del contingente defiscalizzato del biodiesel (20.000 tonnellate su un totale di 200.000) alla sottoscrizione di *"appositi contratti di coltivazione, realizzati nell'ambito di contratti quadro, o intese di filiera"*.

Un'altra importante novità della legge Finanziaria 2006 è costituita dalla decisione di impiegare i fondi residui, originariamente destinati alla defiscalizzazione del bioetanolo nel 2005 e non utilizzati allo scopo (pari a circa 42 M€), per incentivare la produzione, legata alla sottoscrizione di accordi di filiera, di altre 20.000 tonnellate di biodiesel in aggiunta al contingente di 200.000 t, mediante la costituzione di un fondo per la *"promozione e lo sviluppo delle filiere bioenergetiche, anche attraverso l'istituzione di certificati per l'incentivazione, la produzione e l'utilizzo di biocombustibili da trazione"*. È auspicabile che le modalità di emissione di tali certificati siano tali da premiare, per quanto possibile, le cosiddette *"filieri corte"*, che minimizzano le conseguenze ambientali negative dei mezzi di trasporto (consumo di energia, inquinamento ecc.) e favoriscono la produzione e l'uso della bioenergia e dei biocarburanti in uno specifico contesto territoriale.

Indipendentemente dall'esistenza e dall'entità del *"contingente"* defiscalizzato, gli sviluppi più recenti, legati all'entrata in vigore della legge 11 marzo 2006, n. 81, vanno comunque nella direzione di un deciso sostegno alla produzione di biocarburanti da materie prime agricole nazionali. Infatti, il decreto legge obbliga i produttori di carburanti ad immettere sul mercato benzina e gasolio additivati con percentuali progressivamente crescenti di

biocarburanti, a partire dal 1 luglio 2006 e fino al 30 giugno 2010, sino a raggiungere il 5% del totale. È importante sottolineare che tali biocarburanti dovranno essere prodotti nell'ambito di *"un'intesa di filiera, o di un contratto quadro, o di un contratto di programma agroenergetico"*, che saranno prevedibilmente stipulati in primo luogo con i produttori agricoli del contesto territoriale di riferimento. Per garantire il reale rispetto di tale disposizione, è prevista l'introduzione di uno specifico sistema di certificazione di provenienza (analogamente a quanto stabilito per i prodotti alimentari) delle materie prime agricole a destinazione energetica.

## I benefici ambientali

È opinione comune che l'uso dei biocarburanti comporti indubbi benefici di carattere ambientale, sia per quel che riguarda la riduzione delle emissioni inquinanti dei veicoli che li utilizzano sia, più in generale, perché sostituiscono quantitativi corrispondenti di combustibili fossili, contribuendo a ridurre la produzione di gas climalteranti, in primo luogo CO<sub>2</sub>.

Nella realtà dei fatti, pur esistendo una vasta letteratura tecnico-scientifica che documenta il minor impatto ambientale dei motori endotermici e dei bruciatori per caldaie alimentati a biodiesel rispetto a quelli alimentati a gasolio, non si possono purtroppo trarre conclusioni di carattere generale valide per i diversi tipi di inquinanti, perché ogni risultato è strettamente influenzato dalle condizioni di prova: tipo di impiego, ad esempio urbano o extraurbano, tipo di motorizzazione, anzianità del motore e stato di manutenzione ecc.

I dati disponibili per il biodiesel concordano generalmente nel mostrare, nell'utilizzazione di biodiesel puro, una consistente diminuzione del monossido di carbonio e degli idrocarburi incomposti e un aumento delle emissioni di aldeidi e particolato. L'analisi del parti-

colato mostra che l'uso del biodiesel comporta un incremento percentuale della frazione volatile del particolato (PM), che può però essere ossidata nei filtri anti-particolato recentemente introdotti, ed una conseguente diminuzione della frazione carboniosa.

I dati relativi alle emissioni di miscele biodiesel/gasolio sono ancora insufficienti, nonostante anni di sperimentazione, per trarne conclusioni definitive. È comunque evidente che, andando verso miscele con contenuti di biodiesel ridotti (5% o meno), le differenze rispetto al gasolio puro diventano praticamente inesistenti.

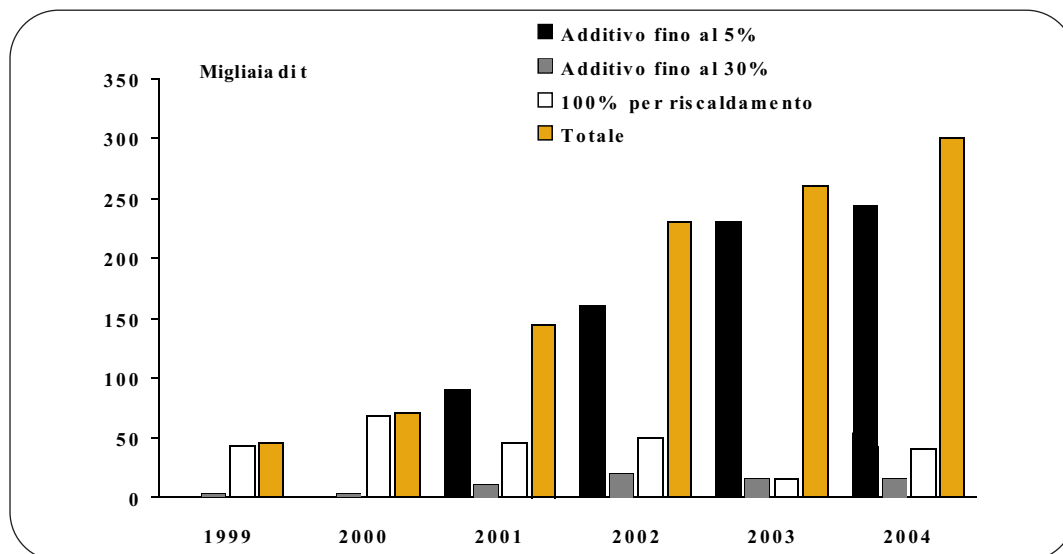
Partendo da simili considerazioni - e tenuto conto anche del fatto che un gasolio con un elevato contenuto di biodiesel (>30%) o il biodiesel puro possono causare inconvenienti in veicoli con guarnizioni in materiali polimerici non compatibili - il decreto legislativo n. 128/2005 fissa il limite massimo del 5% di aggiunta nel gasolio per l'immissione delle miscele diesel/biodiesel alla libera distribuzione presso le stazioni di servizio della rete stradale e autostradale, mentre le miscele con tenori di biodiesel più elevati e biodiesel puro possono essere utilizzati solo su veicoli di flotte, pubbliche o private, previa omologazione degli stessi.

In realtà, quella dell'incorporazione di

percentuali limitate di biodiesel nel gasolio distribuito liberamente in rete è già da diversi anni la via preferenziale di utilizzazione del biodiesel nel nostro Paese, come mostrato in figura 2. L'eventuale decisione di autorizzare in futuro la distribuzione in rete anche di miscele con un tenore in biodiesel superiore al 5%, dipenderà dai risultati di un apposito programma per la valutazione del "bilancio ecologico" dei biocarburanti e degli effetti ambientali derivanti dall'uso, da parte di veicoli non specificamente adattati, di tali miscele, in particolare ai fini del rispetto delle normative in materia di emissioni.

Il discorso è invece diverso per quel che riguarda le miscele benzina/etanolo o benzina/ETBE. In questi casi, infatti, l'aggiunta di ossigeno, anche in piccole percentuali, migliora la combustione e comporta una riduzione significativa delle emissioni di monossido di carbonio e composti organici volatili (COV), che sono i principali responsabili dell'inquinamento urbano nelle condizioni climatiche tipiche della stagione invernale (è questo il motivo per cui, a partire dal 1995, sono state introdotte negli Stati Uniti le cosiddette "benzine riformulate" che devono contenere obbligatoriamente una percentuale di ossigeno pari al 2% in peso). Nel decreto legislativo n. 128/2005 non

**Figura 2**  
Utilizzazione del biodiesel in Italia nel periodo 1999-2004 (kt)  
Fonte: Assobiodiesel





vengono citati limiti minimi e/o massimi per l'additivazione delle benzine con etanolo o con l'ETBE, ma è opportuno rammentare che tali limiti sono stati fissati a suo tempo dalla direttiva CEE n. 536/85, recepita dall'ordinamento italiano con il decreto legislativo 18 aprile 1994 n. 280, che definisce i composti organici ossigenati ammissibili quali componenti e/o stabilizzanti di carburanti e, per ciascuno di essi, le percentuali massime di aggiunta (5% in volume per l'etanolo e 15% per l'ETBE) (tabella 2).

In ogni caso, per valutare appieno i benefici ambientali connessi all'uso dei biocarburanti, bisogna tener conto di tutte le fasi del ciclo di produzione/trasporto/utilizzo degli stessi, a partire dalla coltivazione della materia prima agricola, e comparare i risultati ottenuti con quelli relativi ai corrispondenti prodotti da fonte fossile (gasolio, benzina ed MTBE). Questo tipo di valutazioni, basate sul cosiddetto "Life Cycle Assessment" (LCA), sono ovviamente tanto più accurate e attendibili, quanto più specifica è la filiera produttiva presa in esame.

Nella realtà dei fatti, la letteratura scientifica sull'argomento è estremamente ampia, e riguarda sia i bilanci energetici (con

risultati anche molto diversi a seconda di come vengono considerati i co-prodotti a destinazione mangimistica), sia le emissioni di CO<sub>2</sub>, sia il complesso degli aspetti ambientali, che tiene conto del maggior numero possibile di fattori: dal consumo di acqua alla produzione di polveri, dall'effetto sull'acidità delle precipitazioni atmosferiche ai fenomeni di eutrofizzazione e così via. In qualche caso, come ad esempio la stima della riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> conseguenti all'uso del biodiesel (circa 2,5 t di CO<sub>2</sub> evitata per tonnellata utilizzata), il risultato, frutto di un gran numero di valutazioni indipendenti, si può considerare acquisito.

Ciò detto se, ad esempio, si vuole incentivare l'uso di una determinata materia prima agricola di produzione nazionale rispetto ad una importata, legando l'incentivo al parametro della distanza fra il luogo di produzione e l'impianto di trasformazione, è necessaria una valutazione puntuale dell'effettiva incidenza del trasporto sull'impatto ambientale complessivo.

## Il ruolo della ricerca

Come si è detto all'inizio, la produzione e utilizzazione dei biocarburanti è in molti

**Tabella 2 - Percentuali di aggiunta degli additivi ossigenati nelle benzine stabilite dalla direttiva CEE n° 536/85 e dal decreto legislativo n° 280/1994**

|  | A   | B   |
|--|---|---|
| Metanolo, con aggiunta obbligatoria degli agenti stabilizzanti adeguati                | 3% vol.   | 3% vol.   |
| Etanolo, se necessario con aggiunta di agenti stabilizzanti                            | 5% vol.   | 5% vol.   |
| Alcol isopropilico   | 5% vol.   | 10% vol.  |
| Alcol ter-butilico (TBA)   | 7% vol.   | 7% vol.   |
| Alcol isobutilico  | 7% vol.   | 10% vol.  |
| MTBE o altri eteri contenenti 5 o più atomi di carbonio per molecola (ETBE, TAME ecc.) | 10% vol.  | 15% vol.  |
| Altri ossigenati organici (1)  | 7% vol.   | 10% vol.  |
| Miscele di ossigenati organici (2)   | 2,5% in peso di ossigeno, senza superare i singoli valori limite fissati in tabella per ogni componente | 3,7% in peso di ossigeno, senza superare i singoli valori limite fissati in tabella per ogni componente |

(1) Monoalcoli il cui punto finale di distillazione è compreso nella curva di distillazione delle benzine.

(2) L'acetone è ammesso fino allo 0,8% in volume quando è presente come coprodotto di fabbricazione di taluni composti ossigenati organici.

paesi, e in qualche misura anche in Italia, una realtà consolidata, corrispondente a un sistema produttivo agro-industriale di dimensioni anche rilevanti che si avvale di tecnologie sostanzialmente mature.

La diretta conseguenza di tutto questo è che, una volta presa a livello politico la decisione di promuovere l'uso di questi prodotti, i fattori determinanti sono quelli di tipo logistico (dove e come ci si approvvigiona della materia prima, dove finiscono i co-prodotti ecc.) e, ancor più, quelli economico-normativi, soprattutto per quel che riguarda gli strumenti di incentivazione.

Nella situazione attuale, quindi, attività di ricerca e sviluppo tecnologico in questo campo possono avere ricadute importanti in termini di "ottimizzazione" delle filiere esistenti. Questo tipo di attività, ad esempio, possono riguardare:

- la ricerca agronomica e genetica, mirata sia all'ottimizzazione delle pratiche colturali (riduzione degli input di acqua, fertilizzanti, pesticidi ecc.), sia all'individuazione e selezione di piante "tradizionali" e/o nuove specie e, successivamente, alla costituzione di nuove varietà, a più alta resa e meglio adattabili ai diversi ambienti;
- la LCA delle diverse filiere produttive, al duplice scopo di ricavarne gli elementi necessari per un corretto confronto fra le varie possibili opzioni (ad esempio nell'approvvigionamento della materia prima) e, più in generale, di individuare i "punti critici" dove si registrano i più sensibili effetti negativi e intervenire per apportare le necessarie correzioni;
- le emissioni prodotte dall'uso di miscele ad elevato tenore di biodiesel da parte di autoveicoli dell'ultima generazione nelle condizioni reali di traffico delle nostre città e, nell'immediato futuro, quelle dei veicoli "dual fuel" alimentati con miscele etanolo/benzina fino all'85% di etanolo, che cominciano ad affacciarsi sul mercato, con uno sforzo per la definizione di metodologie e sistemi di misura in

grado di fornire risultati il più possibile riproducibili;

- alcuni aspetti specifici dei processi industriali, come ad esempio la selezione di lieviti "migliorati" rispetto a quelli attualmente utilizzati per la produzione di etanolo, in grado di tollerare concentrazioni più elevate di zuccheri e/o di etanolo nel fermentatore in modo da ridurre i tempi e inviare alla distillazione un prodotto più concentrato.

Per quel che riguarda in particolare le materie prime (che, allo stato attuale della tecnologia, costituiscono il principale fattore di costo dei biocarburanti), la legge 11 marzo 2006, n. 81 prevede esplicitamente che le pubbliche amministrazioni stipulino *"contratti o accordi di programma con i soggetti interessati al fine di promuovere la produzione e l'impiego di biomasse e di biocarburanti di origine agricola, la ricerca e lo sviluppo di specie e varietà vegetali da destinare ad utilizzazioni energetiche"*.

L'importanza di rafforzare le attività di ricerca e sviluppo sui biocarburanti e le relative tecnologie di produzione ed utilizzo viene sottolineata anche dal citato decreto legislativo n. 128/2005, che sottolinea il fatto che tali attività dovranno costituire uno degli obiettivi generali di uno specifico accordo di programma quinquennale da stipulare con l'ENEA, e che debbano essere svolte dall'Ente (con evidente riferimento a quelle relative agli effetti sui motori e sulle emissioni) in collaborazione con la Stazione Sperimentale per i Combustibili del Ministero delle Attività Produttive. In ogni caso, è evidentemente compito esclusivo del mondo della ricerca, pubblica e privata, quello di contribuire all'individuazione e allo sviluppo di nuove vie, nella prospettiva del superamento dei limiti della situazione attuale, che non sono solo di carattere economico. Infatti, pur nella consapevolezza della diseconomia determinata dai maggiori costi di produzione delle mate-

rie prime agricole rispetto alle fonti fossili (petrolio, gas naturale, ma anche - e questo viene quasi sempre sottaciuto - carbone, dal quale è possibile ottenere benzina e gasolio sintetici in quantità con processi ben conosciuti e utilizzabili su scala industriale), è evidente che, in attesa della maturità tecnologica della produzione di idrogeno da fonti rinnovabili e del suo impiego diffuso negli autoveicoli, i biocarburanti rappresentano oggi l'unica alternativa realisticamente praticabile per ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> nel settore dei trasporti.

L'attuale tendenza ad incorporare percentuali crescenti (ma, tutto sommato, limitate) di questi prodotti in benzina e gasolio va incontro all'esigenza del sistema produttivo agricolo di diversificare le proprie produzioni e di utilizzare grandi estensioni di terreni non più destinabili alla produzione di risorse alimentari. Ovviamente, questa convergenza di interessi è valida solo fino ad un certo punto, corrispondente ad un livello di sostituzione stimabile intorno al 10-15%. Se però, in un contesto di nuove e più forti esigenze di diversificazione delle fonti energetiche e di contenimento delle emissioni di gas responsabili dell'effetto serra, si dovesse decidere di introdurre sul mercato quantitativi di biocarburanti maggiori, allora la duplice esigenza di ridurre significativamente i costi di produzione e di ottimizzare l'uso del territorio, in modo da non dar vita ad un possibile conflitto con le produzioni alimentari, imporrebbe lo sviluppo di filiere produttive alternative alle attuali per ottenere quelli che, in ambito internazionale, si comincia ad indicare con il nome di "biocarburanti di seconda generazione".

I principali esempi di questi biocarburanti sono:

- l'etanolo ottenuto da processi biotecnologici di idrolisi enzimatica della cellulosa, oggetto di ricerca e sperimentazione, fino alla realizzazione di impianti dimo-

strativi, già dalla seconda metà degli anni 70 e attualmente al centro di un rinnovato interesse finale da parte della comunità scientifica, per il quale si ritiene (fonte: 14° Conferenza Europea sulle Biomasse, Parigi, ottobre 2005) che la competitività economica rispetto ai processi attualmente in uso possa essere raggiunta intorno al 2015-2020;

- il dimetil-etero (DME) e il gasolio sintetico da biomassa (FT liquids), ottenuti via gassificazione e sintesi catalitica, con processi analoghi alla sintesi di Fischer-Tropsch utilizzati per la produzione di carburanti sintetici da carbone, attualmente oggetto di sperimentazione a livello di laboratorio o impianti di piccola scala. Denominatore comune di queste filiere è l'utilizzazione, come materia prima, di substrati lignocellulosici, che possono essere indifferentemente biomasse residuali o colture dedicate. Nel caso specifico delle colture da biomassa, è noto che già oggi la produttività per ettaro è molto più elevata rispetto a quella dei cereali o delle oleaginose e che, in ogni caso, i processi in questione consentono di utilizzare una frazione maggiore della biomassa prodotta o addirittura l'intera pianta.

Parallelamente allo sviluppo e alla promozione dei biocarburanti che possono essere già prodotti dall'attuale sistema agricolo e industriale, è quindi evidente che l'avvio di programmi di ricerca e sviluppo tecnologico di ampio respiro su queste nuove filiere (materia prima e tecnologia) dovrebbe essere attentamente valutato nella prospettiva di un'ulteriore crescita di questo settore produttivo, che potrà offrire nuove e significative opportunità di sviluppo per l'intero comparto agricolo ed agroindustriale del nostro Paese.

Per informazioni:

*vito.pignatelli@casaccia.enea.it*

*clementel@casaccia.enea.it*

## La certificazione di qualità in un laboratorio di ricerca

La certificazione del Sistema di Gestione della Qualità per una Istituzione di Ricerca rappresenta una opportunità per migliorare il servizio nei confronti dei committenti, ma anche un'occasione per valorizzare le proprie qualità organizzative

**MARIA LITIDO\***  
**MAURO CANÈ\*\***  
**RUGGERO LORENZELLI,**  
**STEFANO SALVI\*\*\***

**ENEA**  
\*UTS Protezione e Sviluppo  
dell'Ambiente e del Territorio,  
Tecnologie Ambientali  
\*\* Unità di Agenzia  
per lo Sviluppo Sostenibile  
\*\*\* UTS Tecnologie Fisiche  
Avanzate

*Tratto da:* ENERGIA, AMBIENTE E INNOVAZIONE 2/06

## Il Laboratorio di Radiometria Ambientale dell'ENEA e la certificazione

Il 13 settembre 2003 il Consiglio dei Ministri ha approvato, nel quadro della riforma degli Enti Pubblici di Ricerca (art. 1 della Legge 6 luglio 2002, n. 137), il Decreto legislativo n. 257 di Riordino della disciplina dell'Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente - ENEA. Secondo quanto stabilito dal Decreto di Riforma, l'ENEA è un Ente pubblico a supporto delle politiche di competitività e di sviluppo sostenibile in campo energetico-ambientale, operante nei settori dell'energia, dell'ambiente e delle nuove tecnologie, con il compito di promuovere ed effettuare attività di ricerca di base e applicata e di innovazione tecnologica, di diffondere e trasferire i risultati ottenuti, nonché di svolgere servizi di alto livello tecnologico, anche in collaborazione con il sistema produttivo<sup>1</sup>.

Il Laboratorio di Radiometria Ambientale (LRA) del Centro ENEA del Brasimone (Bologna) svolge, da circa venti anni, attività di rivelazione e misura di radionuclidi naturali e artificiali in matrici ambientali e non (aria, acqua, terreno, materiali vari) a fini di studio, ricerca, monitoraggio e rilevazione di radioattività a scopo radioprotezionistico<sup>2</sup>, tramite metodi normati o pubblicati su riviste scientifiche specializzate. Tale attività è realizzata nell'ambito di progetti di ricerca, nella maggior parte dei casi sulla base di richieste provenienti da altre Unità dell'Ente, attivate e mantenute attraverso commesse che possono essere, o meno, formalizzate; in questo caso, le risorse finanziarie sono a carico dell'Unità committente. In altri casi, l'attività di analisi è realizzata sulla base di richieste provenienti da aziende esterne: questo servizio viene

pagato attraverso fatturazione a cura del servizio amministrativo dell'Unità alla quale afferisce il Laboratorio.

Dunque sono "clienti" del Laboratorio indifferentemente tutti i committenti delle analisi, sia in presenza di un rapporto interno all'Ente, sia nel rapporto con aziende od Organismi esterni.

Il Laboratorio è quindi una "organizzazione" che fornisce un servizio multiforme – risultati degli studi, messa a punto di metodiche, ricadute dell'attività di ricerca, diffusione del *know-how* ecc. – anche a "committenti esterni", che nella maggior parte dei casi si rivolgono all'ENEA per assolvere ad obblighi di legge o per fornire a terzi un prodotto "certificato". Di conseguenza, deve tenere il passo con il ritmo del progresso tecnologico, con il cambiamento della domanda esterna e con la proliferazione dei provvedimenti normativi e legislativi, fornendo risposte adeguate alle aspettative dei "clienti".

Nel 2001 è stato avviato il progetto di realizzazione di un Sistema di Gestione per la Qualità certificato in conformità con la norma ISO 9001, come primo passo verso l'accreditamento di specifiche linee di prova, al fine di migliorare la qualità globale dell'attività e di conferire alle misure prodotte un oggettivo valore aggiunto, garantendo alla committenza:

- modalità operative efficaci e maggiore controllo di tutta l'attività di competenza;
- la riferibilità delle misure;
- l'incertezza delle misure, verificata sperimentalmente nel corso degli anni, attraverso i risultati conseguiti nel confronto costante con altri laboratori di centri di ricerca nazionali e internazionali.

Il Laboratorio non svolge attività di carattere amministrativo o finanziario, poiché per queste fa riferimento alla struttura

<sup>1</sup> Per informazioni di maggiore dettaglio si rimanda al sito web dell'Ente: [www.enea.it](http://www.enea.it)

<sup>2</sup> L'elenco delle analisi è presente nel sito web del laboratorio disposto all'interno del sito del Centro, all'indirizzo [www.brasimone.enea.it](http://www.brasimone.enea.it), la cui progettazione e veste grafica sono stata realizzate da F. Serra, FIS-ING-TED.

competente dell'Ente: tutte le attività di carattere gestionale e amministrativo vengono realizzate, rispettivamente, a cura della segreteria della Sezione e della Unità di Supporto Tecnico Gestionale della macrostruttura di appartenenza.

Pertanto, una prima importante decisione ha riguardato la definizione del campo di applicazione del sistema, poiché, secondo i requisiti della norma ISO 9001, "l'organizzazione" da certificare deve avere caratteristiche di autonomia operativa e gestionale dei suoi processi produttivi: in questo caso, tutti quelli relativi alle attività direttamente svolte nel Laboratorio; invece, i processi di cui "l'organizzazione" non è direttamente responsabile, come quelli amministrativi, sono stati considerati alla stregua di servizi di "fornitori esterni".

Inoltre, tra i bisogni strategici per un ente di ricerca, la crescita del proprio patrimonio "immateriale" dipende dalla sua capacità di consolidare il *know-how* presente, contro i rischi di perdita di conoscenze nel tempo (per *turn over*) e di obsolescenza, e come premessa e condizione per il suo ampliamento conseguente ai risultati di ricerca e sperimentazione: in questo percorso il sistema di gestione per la qualità rappresenta un efficace strumento per favorire il raggiungimento degli obiettivi migliorando gli aspetti gestionali, di pianificazione, operativi e di controllo.

Il *check-up* effettuato nella fase iniziale del progetto ha evidenziato le problematiche relative sia ad aspetti strutturali e impiantistici, sia di carattere operativo. Avviando tale fase di ristrutturazione e riprogettazione operativa del laboratorio, quindi, si è deciso di non limitarsi a verificare la semplice conformità alla legislazione vigente e alla normativa tecnica, ma di mirare ad un miglioramento generale: l'introduzione del Sistema di Gestione è stata, cioè, l'occasione per integrare i requisiti obbligatori ad altri "facoltativi",

riorganizzando complessivamente i flussi di lavoro.

L'obiettivo primario di migliorare l'organizzazione del lavoro è stato ottenuto tramite:

- la definizione (formale) dei processi;
- la definizione (formale) delle competenze del personale tecnico e la ripartizione delle responsabilità;
- la sorveglianza sistematica e il monitoraggio delle prestazioni nei confronti del "cliente" e di quelle dei fornitori;
- l'adozione dei principi del miglioramento continuo nella gestione delle attività e dei progetti.

L'aver razionalizzato l'organizzazione del lavoro, anche attribuendo formalmente specifiche responsabilità tecniche nello svolgimento dei compiti ed esplicitando le competenze minime richieste nei punti cruciali delle attività, ha consentito di passare da una operatività fondata su esperienza e iniziativa personale ad una gestione caratterizzata da comportamenti codificati; dopo lo sforzo iniziale di implementazione del sistema, questa trasformazione ha prodotto una gestione sistematica dei processi identificati, migliorando i risultati, eliminando sprechi di tempo, accrescendo, cioè, l'efficienza globale.

Il Sistema di Gestione per la Qualità (SGQ), realizzato conformemente ai requisiti della Norma UNI EN ISO 9001:2000, ha ottenuto la certificazione dal CERMET nel 2003 e completato positivamente il primo ciclo di Verifiche Ispettive nel 2005.

## I processi del Laboratorio e gli indicatori di efficacia

Nel presente articolo ci si limita a descrivere brevemente i processi del Laboratorio identificati secondo i requisiti della norma ISO 9001 e gli indicatori fissati per monitorare la loro efficacia e il loro effettivo miglioramento continuo<sup>3</sup>.



Questa attività del progetto ha richiesto, più di altre, una riflessione *ad hoc* ed “aggiustamenti” successivi, date le specificità delle attività di ricerca, per arrivare ad un set di indicatori adeguato e cioè in grado non solo di misurare l'efficacia dei processi ma anche di supportare considerazioni sull'esperienza complessiva del primo ciclo triennale di certificazione del laboratorio, fornendo così al *management* informazioni utili ad orientare future scelte strategiche. Sono stati identificati i seguenti processi descritti in dettaglio nella tabella 1:

1. gestione della attività di analisi;
2. gestione degli apparecchi di misurazione,
3. gestione degli approvvigionamenti (di beni e servizi);
4. responsabilità della Direzione (con particolare riferimento alla Gestione risorse umane);
5. gestione della formazione;
6. gestione della documentazione.

La tabella specifica, per ogni processo, il relativo responsabile (*process owner*), gli *input* necessari e gli *output* attesi.

1. Il processo di realizzazione dell'attività di analisi, quando svolta per l'esterno, può rivelarsi particolarmente critico per quanto riguarda il rispetto dei requisiti metrologici, non sempre compatibili con le richieste di mercato (tempistiche, garanzia del “risultato”) che, a volte, per motivi culturali, sono prevalentemente orientate all'ottenimento formale del “certificato”. Per questo processo, i requisiti di riferimento sono stati forniti dalle variabili indicate come le più importanti dai “clienti” (con il supporto di un questionario *ad hoc* loro somministrato):

- correttezza e completezza dei rapporti di analisi,
- tempestività nelle risposte,
- competenza e disponibilità degli operatori.

**Tabella 1 - I processi del Laboratorio**

| PROCESSO                                 | DESCRIZIONE   | RESPONSABILE                              | INPUT  | OUTPUT  |
|--|---|---|--|---|
| Realizzazione della attività di Analisi  | Processo che gestisce la completa esecuzione delle attività di analisi  | Responsabile Tecnico del Laboratorio (RT) | •Commesse<br>•Risorse umane, strumentali disponibili | •Risultati delle analisi<br>•Schede Campione                            |
| Gestione degli apparecchi di misurazione | Processo che gestisce le modalità di uso e mantenimento del patrimonio strumentale del Laboratorio                  | RT  | •Necessità lavorative<br>•Stato strumenti            | Efficienza del patrimonio strumentale                                   |
| Gestione degli Approvvigionamenti        | Processo di acquisizione e controllo degli strumenti e delle materie prime  | Direzione e RT<br>•Ordini strumenti       | •Ordini MP di consumo                                | •Materiale disponibile<br>•Strumentazione disponibile                   |
| Responsabilità della Direzione           | Impegno a raggiungere gli obiettivi di Politica della Qualità e miglioramento continuo dei processi del Laboratorio | Direzione                                 | Informazioni su stato e efficacia del SQ             | •Politica e obiettivi di miglioramento<br>•Riesame e azioni conseguenti |
| Gestione della formazione                | Processo con cui si identificano i bisogni formativi, si pianifica e attua la formazione e se ne valuta l'efficacia | Direzione e Responsabile Qualità (RQ)     | Bisogni formativi identificati                       | Personale responsabile e competente                                     |
| Gestione della documentazione            | Processo comprendente Redazione, emissione, distribuzione, archiviazione dei documenti del SQ                       | RQ  | Documenti del sistema                                | Documenti gestiti   |

<sup>3</sup> Copia del “Manuale del Sistema di Gestione per la Qualità” nel quale sono descritti in dettaglio tutti gli elementi del sistema, si può ottenere accedendo al sito web del laboratorio.

Di conseguenza, gli indicatori per monitorare l'efficacia e l'andamento del processo di realizzazione delle analisi sono (tabella 2):

- correttezza dei risultati forniti (errori riscontrati e, in generale, non conformità) e correttezza dei certificati di prova;
- numero delle analisi fatte rispetto a quelle ricevute;
- numero delle non conformità (NC)<sup>4</sup> rilevate e dei reclami ricevuti.

Inizialmente, era stato inserito tra gli indicatori il tempo di risposta della singola commessa, successivamente eliminato; infatti, poiché l'iter formale di accettazione dell'offerta deve passare attraverso le strutture amministrative di supporto non coinvolte

nella certificazione, i cui tempi di risposta, dell'ordine della settimana, sono risultati non confrontabili con quelli di esecuzione delle prove, dell'ordine di qualche ora o giorno, tale indicatore si è rivelato inadeguato a fornire indicazioni consistenti sull'efficienza del servizio svolto; dunque, l'aver circoscritto il sistema alla sola sede tecnica dell'attività, apre un problema: l'unità tecnica costituisce il soggetto che deve anche produrre offerta-fattura o no? Una risposta affermativa, coerente con un sistema che lega l'impiego del know-how prodotto anche alla possibilità di reperire finanziamenti per la ricerca, richiede di organizzare conseguentemente le strutture amministrative per ottenere una risposta adeguata alla qualità tecnica.

| Tabella 2 - Indicatori della efficacia dei processi           |   |                              |   |
|---|---|------------------------------|---|
| PROCESSO  | INDICATORE PER LA MISURAZIONE DELL'ANDAMENTO DEL PROCESSO (ANNUALE)   | RESPONSABILE                 | PERSONE COINVOLTE   |
| Realizzazione della attività di Analisi                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>• numero di note/errori in scheda campione</li> <li>• numero di Reclami ricevuti</li> <li>• numero di NC nella realizzazione delle analisi rilevate in VI interne</li> <li>• numero di analisi fatte rispetto all'anno precedente</li> <li>• Tempi di espletamento delle attività amministrative relative alle analisi in rapporto ai tempi di esecuzione delle stesse (espressi in giorni)</li> </ul> | RQ                           | RT e tutti i tecnici del Laboratorio<br><br>RT e personale addetto alla amministrazione |
| Gestione degli apparecchi di misurazione                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• numero delle tarature (o conferme) non effettuate, o effettuate in ritardo rispetto alla data di scadenza sul numero totale delle tarature (o conferme)</li> <li>• numero dei giorni in cui ogni strumento è stato disponibile per le analisi</li> <li>• numero delle NC aperte nella gestione degli apparecchi</li> </ul>   | RQ                           | RT e tutti i tecnici del Laboratorio  |
| Gestione degli Approvvigionamenti                             | tempi di espletamento delle pratiche relative agli approvvigionamenti del Laboratorio (espressi in giorni)  | RQ                           | RT e personale addetto alla amministrazione   |
| Responsabilità della Direzione (gestione delle risorse umane) | numero di obiettivi di miglioramento della qualità raggiunti  | Responsabile di Sezione      |   |
| Gestione della formazione                                     | numero di "giornate formative" realizzate nell'anno (rispetto al numero di quelle dell'anno precedente)   | Responsabile di Sezione e RQ | RQ, RT e tutti i tecnici del Laboratorio  |
| Gestione della documentazione                                 | numero di NC relative alla gestione della documentazione riscontrate nell'anno (rispetto al numero di quelle dell'anno precedente)  | RQ                           | RQ  |
| Gestione del Sistema per la Qualità                           | numero di NC di sistema riscontrate nell'anno (rispetto al numero di quelle dell'anno precedente)   | RQ                           | RQ  |

<sup>4</sup> Una non conformità è la non rispondenza ad un requisito fissato dalla norma di riferimento.



2. Riguardo alla gestione degli apparecchi di misurazione le tipologie di indicatori prescelti sono:

- rispetto delle scadenze previste per le tarature degli strumenti;
- rispetto delle date e del numero di conferme metrologiche;
- numero delle non conformità riscontrate negli strumenti (per monitorare l'affidabilità della strumentazione);
- numero dei giorni in cui lo strumento è disponibile per le prove (per monitorare l'adeguatezza della strumentazione).

Il miglioramento di questo processo, al di là di quello ottenibile con una gestione interna più efficace, dipende però fortemente non solo dalla possibilità di far fronte finanziariamente alla obsolescenza del parco tecnologico disponibile, ma anche da quella di far crescere la competenza interna investendo sulla formazione continua delle risorse umane presenti e garantire la conservazione del *know-how* tecnico puntando all'ingresso di giovani risorse.

3. Gli approvvigionamenti del Laboratorio sono prevalentemente orientati all'acquisto dei prodotti per l'esecuzione delle analisi e all'acquisizione di strumenti e dispositivi necessari per lo svolgimento di prove e delle tarature. L'acquisto di servizi è costituito dall'affidamento all'esterno di manutenzione della strumentazione o da forniture utili all'espletamento dell'attività (es. gas inerti).

Poiché un ente pubblico di ricerca non dispone di autonomia giuridica ed amministrativa, ma tali aspetti sono regolamentati tramite disposizioni interne ma anche esterne, emanate dal ministero competen-

te, è stato necessario individuare indicatori per monitorare l'efficacia degli approvvigionamenti tenendo presenti i suddetti vincoli e definirli cercando un opportuno compromesso tra obiettivi di efficacia, miglioramento e rispetto dei regolamenti cogenti per la Pubblica Amministrazione.

L'indicatore prescelto per valutare l'efficacia e la efficienza interna è costituito dai tempi di espletamento delle pratiche relative ad ogni approvvigionamento, che sono stati distinti in:

- tempi per espletare l'attività di carattere tecnico di pertinenza del laboratorio (richiesta di approvvigionamento, relazione tecnica contenente le motivazioni dell'acquisto richiesto e dei requisiti che esso deve possedere per soddisfare i bisogni di partenza), e

- tempi di espletamento dell'attività amministrativa, di pertinenza del competente servizio. Questa distinzione della tempistica, introdotta in un secondo momento, è risultata indispensabile per individuare correttamente le "criticità" del processo, che sono state identificate nella frammentazione di compiti e responsabilità, più evidenti quando una pratica o procedura richiede passaggi obbligati per centri diversi dell'Ente. Per lo stesso motivo, essa è risultata fondamentale anche per una corretta valutazione dei fornitori "qualificati". Gli indicatori riguardanti i fornitori del laboratorio sono riportati nella tabella seguente:

- la puntualità della consegna;
- la qualità della fornitura o servizio;
- la qualità della documentazione di accompagnamento.

| BENE APPROVVIGIONATO         | NOME FORNITORE | PUNTUALITÀ DELLA CONSEGNA                         |   | QUALITÀ FORNITURA /SERVIZIO                               | QUALITÀ DOCUMENTI  | VALUTAZIONE FINALE  |
|------------------------------|----------------|---|---|---|--|---|
| Tipo di materiale o servizio |                | Data di partenza dell'ordine da ENEA <sup>5</sup> | Data in cui il bene acquistato viene consegnato | Congruenza quantitativa e qualitativa con quanto ordinato | Completezza, efficacia e chiarezza dei vari docum. (schede di sicur., manuali d'uso, manutenzione ecc.)= | Grado di soddisfazione globale valutazione del Resp. Tecnico del Lab.:<br>Insufficiente<br>S=Sufficiente<br>B=Buono<br>O=Ottimo |

<sup>5</sup> La data effettiva di partenza dell'ordine dall'ENEA è stata sostituita alla data di richiesta dell'approvvigionamento da parte del laboratorio, precedentemente usata.

In conclusione, uno degli obiettivi fondamentali di un approvvigionamento efficace è ottenere il massimo valore nei beni di investimento e negli acquisti, cioè il massimo beneficio per il prezzo pagato. Nonostante l'ovvietà dell'affermazione si è dovuto constatare spesso che le modalità operative non sono coerenti con questa logica. Sembra di poter attribuire la causa prima di questa incoerenza al sistema di responsabilità individuali – se l'obiettivo dell'amministrazione resta inteso solo in senso economico e non finalizzato al miglioramento di "un servizio" – che contrasta di fatto l'attuazione di una visione condivisa e la massimizzazione dei benefici a livello dell'organizzazione. Tali responsabilità individuali di fatto spesso finiscono per risultare conflittuali e all'origine di molte trincee: in tali situazioni, in assenza di strumenti organizzativi, i conflitti possono essere ridotti solo in presenza di un *management* in grado di intervenire supportando una visione condivisa dell'ente per ottenere la massimizzazione del valore nei beni e nei materiali acquistati.

4. Le responsabilità generali della Direzione, rappresentata dal "Responsabile di Sezione", riguardano la gestione delle attività tecnico-scientifiche e delle risorse umane. Il ruolo del *manager* è fondamentale nel processo di miglioramento della qualità, e cioè nel:

- fornire mezzi adeguati per raggiungere gli obiettivi;
- incoraggiare, rinforzare, aiutare ad assumere e premiare i comportamenti coerenti con la visione ed i valori condivisi dell'organizzazione;
- chiedere e premiare l'eccellenza;
- contestare, con coerenza e costruttivamente, i comportamenti negativi.

Il risultato di un *management* efficace, infatti, oltre ad ottenere il raggiungimento degli obiettivi, valorizza le risorse umane, che costituiscono il patrimonio

di maggior valore di un ente di ricerca. L'indicatore di efficacia prescelto è stato identificato con la misura degli obiettivi raggiunti nel progetto di certificazione, ma sicuramente questo va integrato con altri indicatori che includono la quantità di risorse, strumentali e finanziarie, ma anche e soprattutto umane, messe a disposizione e indicatori specifici per valutare l'efficacia del *management* nell'attuare le azioni elencate in precedenza.

5. Date le specificità del Laboratorio e la sua collocazione in un ente di ricerca, si è deciso di monitorare con attenzione l'andamento degli strumenti per l'accrescimento della competenza del personale con particolare riferimento alle attività formative. Pertanto, l'indicatore in uso è espresso in numero di giornate di formazione effettuate dal personale; sebbene in un ente di ricerca la "formazione" del personale sia da intendere in senso più lato che altrove, l'indicatore suddetto include esclusivamente le giornate dedicate a seminari o corsi strutturati.

6. Gli indicatori individuati riguardanti l'efficacia dell'attività di progettazione, prima, e di gestione del sistema, poi, svolte dal Responsabile per la Qualità, sono i seguenti:

- numero delle non conformità riscontrate a livello della documentazione, per misurare l'adeguatezza dei documenti interni di sistema allo specifico contesto; e
- numero delle non conformità riscontrate negli aspetti più propriamente gestionali del sistema, per misurare l'efficacia del sistema.

Poiché l'analisi condotta sul singolo indicatore può risultare fuorviante, in quanto rappresenta spesso solo uno degli aspetti o requisiti di un processo, la valutazione dell'efficacia di ogni processo identificato è stata effettuata considerando l'andamento complessivo di tutti gli indicatori ad esso associati ed eseguendo un confronto con i dati storici precedentemente raccolti.

Gli indicatori sono esaminati con frequenza annuale, sia perché stimata la più congruente con la numerosità dei dati, sia perché la misura richiede del tempo da sottrarre alla attività usuale di prova; nel caso della struttura del laboratorio, tale frequenza è risultata efficace, in quanto ha consentito di presentare risultati attendibili tra i documenti di *input* della riunione annuale di riesame della Direzione, momento di verifica finale e di pianificazione, consentendo così alla Direzione di valutare la possibilità di effettuare interventi e azioni conseguenti ed ipotizzare obiettivi futuri di miglioramento.

Nel caso di una struttura più grande tale processo di analisi periodica va specificamente pianificato per risultare efficace e adeguato: esso deve infatti produrre considerazioni utili alla individuazione di possibili obiettivi di miglioramento e deve avere dimensioni temporali tali che questi possano essere attuati compiutamente evitando di moltiplicare successivi interventi con il rischio di generare entropia.

### L'esperienza della certificazione in un Ente di ricerca: opportunità e criticità

I risultati relativi alla qualità globale dell'attività interna del Laboratorio si possono ritenere estremamente positivi ed incoraggianti: i processi sono stati razionalizzati, i compiti e le responsabilità individuali, nonché lo *skill* di competenze necessarie sono stati definiti precisamente, ogni singola competenza è stata accresciuta e valorizzata. Inoltre, per quanto gli obiettivi e i risultati attesi dal progetto fossero mirati ad ottenere specificamente il miglioramento delle prestazioni del laboratorio, una gestione interna più controllata e la crescita professionale del personale del Laboratorio, l'esperienza di questi tre anni consente di trarre una serie di considerazioni di "più ampio

respiro" sul tema della applicabilità dei SGQ al contesto specifico della ricerca.

Attualmente la Certificazione del Sistema di Gestione per la Qualità rappresenta per le organizzazioni non più solo una opportunità di migliorare il servizio nei confronti degli *stakeholder*, ma anche un'occasione per valorizzare le proprie "qualità" organizzative. Il Sistema inteso come insieme strutturato di regole "organizzative" è anche uno strumento di cambiamento, ma il cambiamento va nella direzione di migliorare i comportamenti, le relazioni, gli scambi e le dinamiche di lavoro e, più alla lunga, la cultura e i valori dell'organizzazione; in altri termini, la sua introduzione incide sulle "condizioni ambientali" di una organizzazione.

Le persone, a tutti i livelli, costituiscono l'essenza dell'organizzazione e questo è tanto più vero in una istituzione di ricerca il cui scopo è produrre *know-how*, da ciò consegue l'importanza di individuare le competenze necessarie, identificare e pianificare le azioni formative legate alle esigenze di sviluppo, promuovere azioni orientate ad accrescere la consapevolezza del personale (intesa come coinvolgimento e partecipazione ai risultati) rendendo il personale conscio della rilevanza delle proprie attività e di come queste contribuiscano al raggiungimento di obiettivi, investire sulla formazione continua e adeguata alle specificità dell'organizzazione. L'ultima versione della Norma ISO 9001 richiede un modo nuovo di intendere le organizzazioni in cui la risorsa umana è centrale.

In effetti, al di là degli obiettivi e degli stessi risultati attesi, il Sistema di Gestione per la Qualità del Laboratorio di Radiometria Ambientale si è rivelato uno strumento in grado di supportare efficacemente la gestione delle risorse umane ai fini della qualità del lavoro svolto e valorizzarle: dunque è sulle competenze che si è realizzato il contributo più rilevante per i Sistemi Qualità alla gestione del personale.

L'esperienza ha confermato che è fondamentale contrastare la tendenza (naturale in periodi di limitate risorse finanziarie) a rendere disponibili risorse strumentali piuttosto che a migliorare le competenze del personale; ha inoltre messo in luce, tra le criticità più evidenti, come la localizzazione di un laboratorio con alta specializzazione tecnico-scientifica in un contesto strutturale ed operativo "lontano" dal settore di impiego possa costituire un fattore limitante per le opportunità di consolidamento e sviluppo delle attività e delle competenze.

### Le risorse umane e i SGQ in un Ente "non economico"

In generale, se il fattore risorse umane è diventato determinante per il successo di medio-lungo periodo di un'organizzazione, questo è tanto più vero in una Istituzione di ricerca la cui *mission* è la produzione di *know-how* e il suo trasferimento.

La gestione delle risorse basata sulla valorizzazione delle potenzialità, sulla conseguente fiducia e delega di responsabilità, nonché su una *leadership* diffusa a tutti i livelli sta diventando un aspetto sul quale puntano le moderne organizzazioni che fanno leva sulla qualità come fattore indispensabile per il successo: si parla sempre più di "intelligenza emotiva" definita come la capacità di motivare se stessi e persistere nel raggiungere gli obiettivi nonostante le frustrazioni, la capacità di controllare gli impulsi e rimandare la gratificazione, di modulare i propri stati d'animo evitando che la sofferenza ci impedisca di pensare, limiti la capacità di essere empatici (capaci di assumere il punto di vista altrui).

In ogni organizzazione il fattore "clima" è l'elemento che può generare due atteggiamenti mentali opposti: partecipazione o abbandono. Un buon clima fra le persone è la conferma del fatto che le persone hanno un riconoscimento del loro impegno, che c'è una *leadership* reale, che la comunica-

zione funziona bene, e che fra le persone c'è calore e sostegno; anche il modo in cui le critiche vengono formulate, ricevute fa parte del clima ed è molto importante determinare il grado di soddisfazione dell'individuo relativamente al proprio lavoro. Per contro, quando gli individui sono turbati da un "clima aziendale" sfavorevole non sono più in grado di ricordare, imparare e prendere decisioni lucide.

Le organizzazioni all'avanguardia, che si pongono il problema del "benessere organizzativo", effettuano veri e propri periodici *check-up* per cercare di monitorarne lo stato e misurarlo, coerentemente con i requisiti della norma sul monitoraggio e la misurazione dei processi. I risultati di tali analisi sono la base per riprogettare, se opportuno, modalità gestionali, flussi informativi o lo stile stesso della comunicazione.

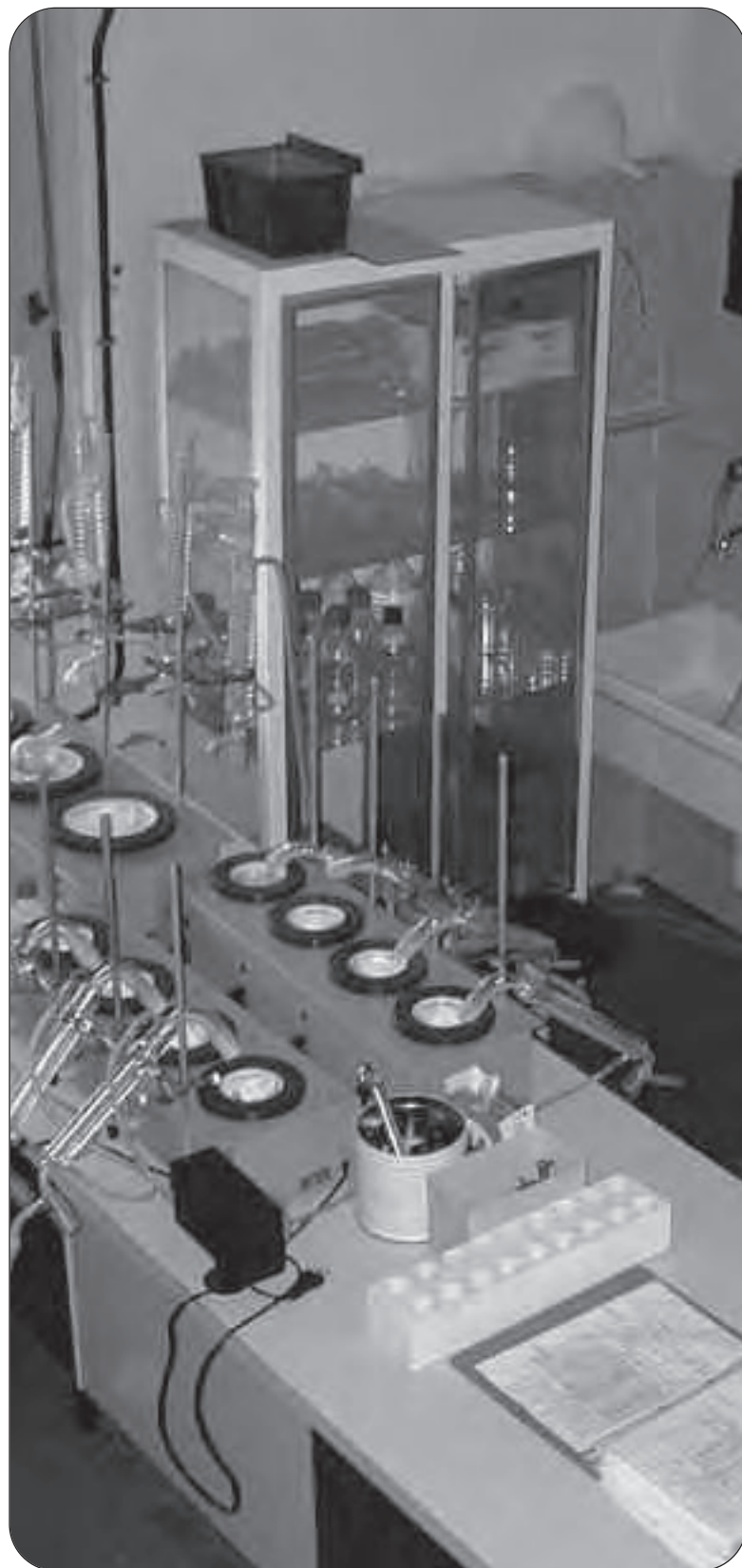
Contemporaneamente, si afferma la cultura dell'*empowerment* che concepisce il potere innanzi tutto come intrinseco al soggetto, un potere collegato al concetto di capacità e di responsabilità *versus* la concezione del potere primariamente come dominio sull'altro. Buon *manager* colui che facilita l'*empowerment* dei propri collaboratori.

L'individuo è più motivato al lavoro quando trova in esso la possibilità di soddisfare una serie di bisogni fondamentali. Ma la motivazione va anche cercata nel sistema di valori socialmente condiviso, negli atteggiamenti, nelle convinzioni che le persone possiedono. Ogni individuo nutre una serie di aspettative e di desideri nei confronti della sfera occupazionale e tende a imporre nel lavoro speranze di affermazione personale, aspirazioni di successo sociale, propositi di sviluppo delle proprie capacità e conoscenze.

L'impegno del *management* nel coinvolgimento delle persone e nel monitoraggio del grado di competenza acquisito è fondamentale nella gestione del sistema qualità.

La visione e i valori di una organizzazione si realizzano solo se esiste un *top mana-*

gement capace e interiormente motivato allo sviluppo; solo i *manager* che non hanno l'esigenza di primeggiare ad ogni costo e che non si sentono in discussione, hanno la possibilità di focalizzarsi sul "successo degli altri", ottenendo in cambio innovazione e sviluppo per il proprio gruppo. In un ente pubblico, e dunque ancora di più in un ente pubblico di ricerca, dove per diverse ragioni, tra le quali la contenuta disponibilità delle risorse economiche, non sempre il premio è commisurabile ad un corrispettivo economico o è possibile premiare l'impegno profuso dal personale in tempi adeguati, l'Alta Direzione deve elaborare una strategia premiante fondata su elementi, quali il riconoscimento all'interno del gruppo, la soddisfazione di vedere valorizzate le proprie idee e applicate le proprie realizzazioni, l'offerta di nuove opportunità di fare esperienza e di partecipare a comitati o gruppi di lavoro, specie di rilevanza nazionale o internazionale, cioè quei segnali che costituiscono un riconoscimento visibile di aumentato prestigio. Come si è detto, esiste uno stretto nesso tra valorizzazione del fattore umano, motivazione del personale e Sistemi di Gestione per la Qualità, dato che l'ultima versione delle norme ISO 9000 ha dato enfasi agli aspetti suddetti sia direttamente nei capitoli sulla responsabilità della Direzione e in quello sulla gestione delle risorse, sia indirettamente quando tratta del miglioramento che non può non vedere come protagonista tutto il personale dell'organizzazione: pertanto, l'impiego di questi strumenti nel contesto di laboratori o impianti di ricerca, in cui strumenti e prassi della tradizionale "garanzia di qualità" sono considerati da sempre "acquisiti" – ma non raramente interpretati come semplici "sovrastrutture formali" – può dimostrare ulteriori potenzialità proprio nella valorizzazione del potenziale umano, se adeguatamente supportato da una *conditio sine qua non*: la profonda convinzione del *management* ed il suo diretto coinvolgimento nel progetto.



Locale per l'attività di arricchimento del trizio



## Conclusioni

Il principale valore di ogni organizzazione è costituito dalle persone: dai loro talenti, dalle loro competenze, dalla loro capacità di innovazione, dalla cultura, dalle alleanze e dalla condivisione di visione e obiettivi con gli *stakeholder*. In realtà il patrimonio umano è raramente interpretato e adeguatamente valorizzato come la maggiore risorsa: di conseguenza, gli investimenti sull'aumento della competenza e della motivazione sono troppo spesso reputati solo una voce di costo.

La condivisione della *mission*, il sistema di valori che ne consegue e la fiducia necessaria per avanzare verso una visione comune sono le politiche critiche anche, e soprattutto, in un Ente di ricerca, il cui vertice intenda stare al passo con i cambiamenti imposti dai contesti esterni, mentre mancanza di intenti unitari, valori incerti, scarsa capacità di comunicazione, comportamenti difensivi, procedure (anche contabili e gestionali) inadeguate generano un indebolimento della organizzazione e degli obiettivi potenzialmente raggiungibili, rischi incombenti ancor più in un contesto di riduzione di finanziamenti e di incertezza della *mission* dell'Ente stesso.

In questo senso, l'adozione di un Sistema di Gestione per la Qualità e la sua certificazione nello specifico contesto di una Istituzione di Ricerca possono essere interpretati come un "processo di apprendimento organizzativo", in quanto vanno ad influenzare gli elementi della valorizzazione di conoscenze e competenze, dello scambio e della interazione, della comunicazione, contribuendo a rafforzare la coesione della organizzazione, attraverso l'affermazione della cultura della qualità, del miglioramento, quindi del cambiamento e dell'innovazione.

Per informazioni:  
[maria.litido@bologna.enea.it](mailto:maria.litido@bologna.enea.it)

## Bibliografia

- UNI EN ISO 9001, *Sistemi di gestione per la qualità. Requisiti*, dicembre 2000.
- UNI EN ISO 9000, *Sistemi di gestione per la qualità. Fondamenti e terminologia*, dicembre 2000.
- BAGGINI, A., CHERBAUCICH, C., WARNOTS, E., *La gestione per prove e misure secondo UNI EN ISO 9001:2000 alla luce della nuova ISO 10012*, Qualità, giugno/luglio 2003.
- BARACCO, R., PANELLA, B., *Indicatori della qualità di un centro di taratura*, Qualità agosto/settembre 2005.
- BRANSKY, J. R., *Migliorare la credibilità della certificazione ISO 9001: 2000*, ISO Management Systems, dicembre 2004.
- DASSISTI, M., SCORZIELLO, F., *Tecnica innovativa di progettazione per Sistemi di gestione per la Qualità di laboratori universitari*, Qualità, novembre/dicembre 2003.
- DEL POZZO, G., *Qualità e motivazione delle risorse umane*, Qualità, gennaio/febbraio 2005.
- DETTIN, P., *Il capitale umano è al centro dell'azienda?*, Qualità, gennaio/febbraio 2005.
- DI LORENZO, S., *SGQ in azienda: apprendere dalla qualità?*, De Qualitate, marzo 2005.
- FABIANO, M., *Dalla parte del cliente*, De Qualitate, settembre 2004.
- FOCUS di De Qualitate, *Qualità in laboratorio*, De Qualitate, giugno 2005.
- MANZONE, G., *La qualificazione dei laboratori di analisi ambientale*, De Qualitate, luglio-agosto 2005.
- MAZZERO, V., *Sviluppo Risorse umane e valutazione nella Pubblica Amministrazione*, Qualità, gennaio/febbraio 2005.
- MOLINO, A., STOPPA, C., *Il rispetto e la valorizzazione delle persone: uno dei valori del gruppo AEM di Torino*, Qualità, gennaio-febbraio 2005.
- MONTEBELLI, G., *La comunicazione: nuovo importante strumento gestionale*, atti EXPO Qualità, Parma, 12-15 settembre 2001.
- Redazione, a cura di, *Politiche per la qualità*, De Qualitate, febbraio 2005.
- SARTORI, S., *Tutti i perché dell'accreditamento di un laboratorio*, Qualità, giugno/luglio 2003.
- SARTORI, S., a cura di, *Tarature non accreditate di Centri SIT: limiti di validità*, Qualità, giugno/luglio 2002.
- THIONE, L., *Qualità e Pubblica Amministrazione*, De Qualitate, giugno 2005.
- VOLPE, G., *Il sistema qualità come guida al cambiamento organizzativo*, De Qualitate, settembre 2005.
- VOLPE, G., *Il sistema qualità come modello organizzativo per valorizzare e gestire le risorse umane*, De Qualitate, aprile 2005.

# Lo sviluppo delle rinnovabili: una opportunità per il Sistema Paese

L'impegno programmatico per lo sviluppo delle fonti rinnovabili è un'occasione strategica di crescita industriale soprattutto se si interviene nei settori ad alta innovazione tecnologica

**CARLO MANNA**

**ENEA**  
Unità di Agenzia  
per lo Sviluppo Sostenibile,  
Advisor

*Tratto da:* ENERGIA, AMBIENTE E INNOVAZIONE 3/06

L'

Unione Europea identifica nell'efficienza del sistema energetico e nel suo sviluppo tecnologico il principale punto di snodo per lo sviluppo di un'economia ambientalmente sostenibile. Mentre la sfida dei cambiamenti climatici e la crisi degli approvvigionamenti di combustibili fossili spostano i limiti della convenienza economica delle fonti di energia e impongono una sempre maggiore attenzione a tutti quei costi che ricadono sulla collettività in termini di danno sulla salute dell'uomo e sull'ambiente, lo sviluppo tecnologico risponde all'esigenza di incrementare l'efficienza e la compatibilità ambientale dei sistemi di produzione, di accrescere i livelli di utilizzazione delle fonti residuali e di aprire ulteriori e più efficienti modalità di utilizzo delle nuove fonti di energia. D'altra parte i processi in atto di trasformazione dell'attuale sistema energetico comportano un avvicinamento tra i luoghi di produzione a quelli di utilizzo dell'energia con l'obiettivo di creare modelli territoriali innovativi di integrazione tra produzione e sistema energetico. All'interno di questa logica assume un particolare significato la diffusione di tecnologie finalizzate alla valorizzazione energetica delle risorse del territorio, prime tra tutte quelle per l'utilizzo delle fonti rinnovabili, e il loro consolidamento all'interno del sistema nazionale della produzione e dei servizi attraverso la creazione di nuove filiere industriali.

L'incremento del ricorso alle fonti rinnovabili di energia rientra, insieme a molte altre azioni sul lato dell'offerta e della domanda, in una politica di diversificazione necessaria al nostro Pae-

se per affrontare coerentemente l'incerto mercato dell'energia nei prossimi decenni. Ma un forte impegno programmatico per lo sviluppo delle rinnovabili, con la creazione di nuove filiere industriali, rappresenta soprattutto una forte occasione di crescita industriale, tanto più strategica quanto più gli interventi si collochino in settori a elevato tasso di innovazione tecnologica.

In questa prospettiva assume carattere strategico la predisposizione di un piano di investimenti per la ricerca, la sperimentazione e l'industrializzazione di componenti e sistemi in grado di accelerare lo sviluppo delle tecnologie e di abbreviare i tempi necessari all'introduzione di sistemi innovativi sul mercato. L'ENEA può contribuire con le competenze e le risorse di cui dispone a costruire un nuovo modello di produzione e di uso sostenibile dell'energia nel quale le fonti rinnovabili possano assumere un ruolo determinante come fattore di sviluppo per il rilancio della competitività del sistema Italia.

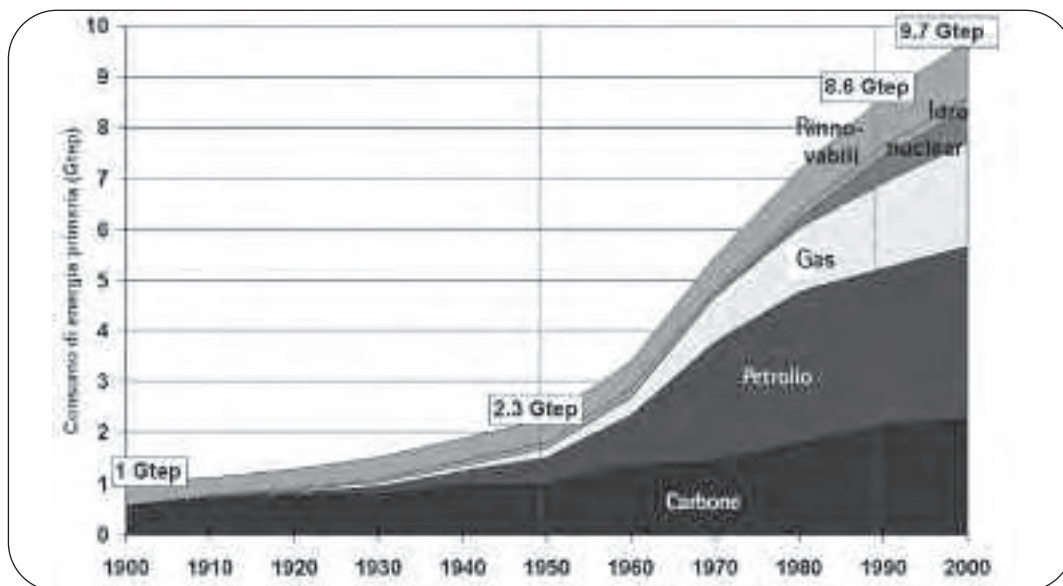
### Ruolo delle fonti rinnovabili nella sfida del clima

La comunità scientifica internazionale appare ormai unanime nel riconoscere come l'aumento della concentrazione di anidride carbonica in atmosfera costituisca la principale causa della crescita della temperatura terrestre e che tale crescita vada contrastata e la concentrazione stabilizzata ad un livello tale da prevenire pericolose influenze con il sistema climatico<sup>1</sup>.

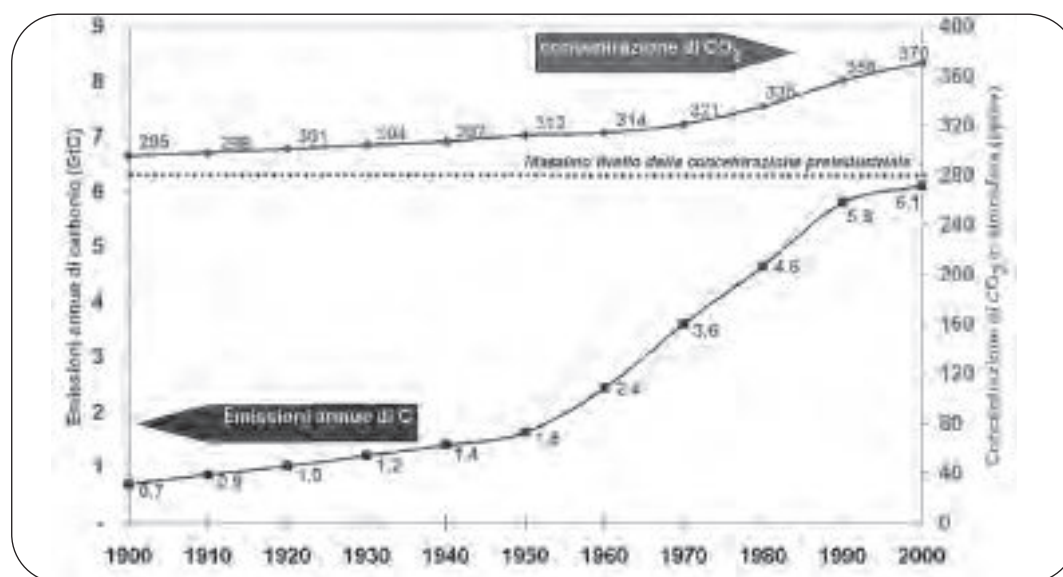
Nel corso del secolo scorso, caratterizzato, in particolare nella sua seconda metà, da un repentino aumento della do-

<sup>1</sup> La letteratura più autorevole in materia individua la soglia di criticità tra 450 e 550 ppmv di CO<sub>2</sub> (IPCC, Climate Change 2001: the scientific basis).





**Figura 1**  
Il ricorso alle fonti di energia nel corso del 20° secolo  
Fonte: elaborazione ENEA da fonti varie



**Figura 2**  
Andamento della concentrazione di anidride carbonica e delle emissioni di carbonio  
Fonte: elaborazione ENEA da fonti varie

manda di energia (figura 1) l'aumento della concentrazione di CO<sub>2</sub> in atmosfera ha raggiunto un valore superiore di circa un quarto rispetto ai valori misurati alla fine del 19° secolo (figura 2), valori che, come ci confermano i recenti risultati scientifici acquisiti con carotaggi effettuati nei ghiacci dell'Antartide, non erano stati mai superati negli ultimi 600.000 anni.

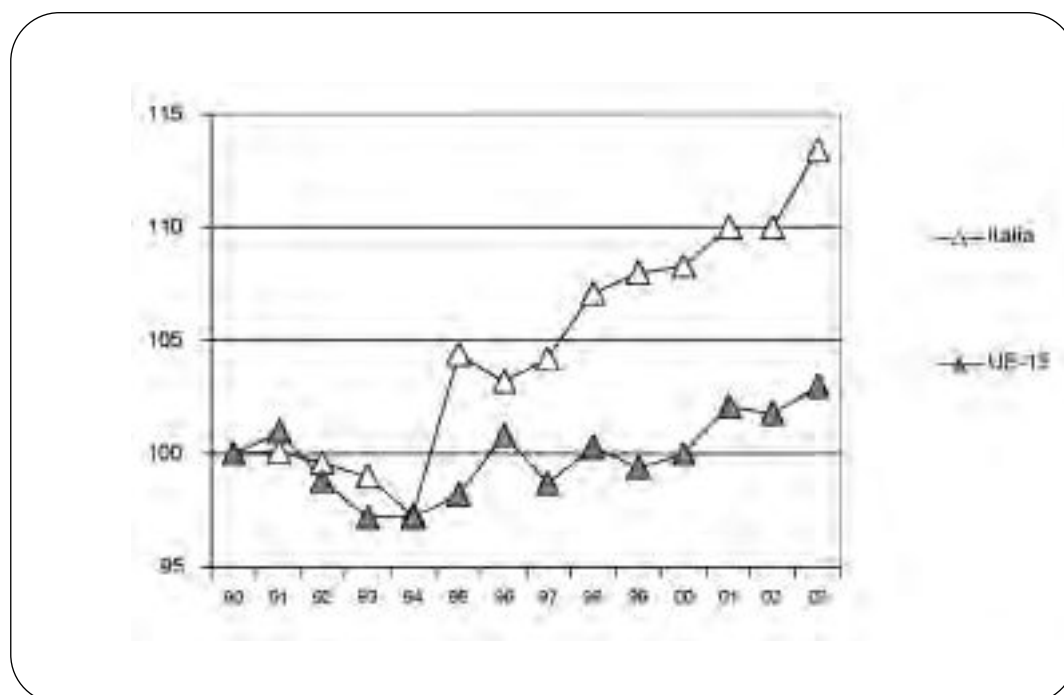
Anche prima che il Protocollo di Kyoto entrasse in vigore, la consapevolezza

della necessità di ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> aveva portato l'Unione Europea a mettere la riduzione dei gas serra al centro della sua politica energetica e ambientale, impegnando i Paesi membri a conseguire, tra il 2008 e il 2012, una riduzione complessiva delle emissioni pari all'8% rispetto a quelle del 1990. Da un esame del trend 1990-2003 dei valori di emissione di CO<sub>2</sub> (figura 3) relativi alla media UE-15 e Italia si vede come rispetto all'anno base

**Figura 3**

Emissioni di CO<sub>2</sub> dal sistema energetico in Italia ed in Europa (numeri indice 1990=100). Anni 1990-2003

Fonte: elaborazione ENEA su dati dell'Agenzia Europea dell'Ambiente, EEA 2005<sup>2</sup>



1990 si sia verificato un aumento pari al 3,8% per i paesi dell'UE-15 e del 13% per l'Italia che diventa, quanto ad emissioni di CO<sub>2</sub> dal sistema energetico, il terzo paese dell'UE-15 dopo la Germania e il Regno Unito. Le strategie utili ai fini della diminuzione delle emissioni di gas serra si basano sulla "decarbonizzazione" dei processi di produzione di energia; obiettivo che si consegue attraverso la riduzione complessiva della domanda e, nello specifico, riducendo il ricorso alle fonti fossili di energia. Un piano di interventi per la riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> non può infatti prescindere da iniziative sull'efficienza dei sistemi di produzione e trasformazione e sugli usi energetici finali. In una comunicazione<sup>3</sup> del 2000 della Commissione al Consiglio e al Parlamento europeo sulle "politiche

che e misure per ridurre le emissioni di gas a effetto serra" venivano indicate proposte per la riduzione delle emissioni articolate secondo diverse tipologie di intervento. Alcune di queste misure sono state successivamente tradotte in ulteriori documenti tra i quali: la comunicazione che definisce il "piano d'azione sull'efficienza energetica"<sup>4</sup>; la direttiva sulla "promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili"<sup>5</sup>; la direttiva che sollecita "interventi specifici nel campo dell'edilizia"<sup>6</sup>; la direttiva sulla promozione dell'uso dei biocarburanti nei trasporti<sup>7</sup>; la direttiva sulla promozione della cogenerazione<sup>8</sup>.

Il quadro legislativo approntato in Italia, che discende sostanzialmente da quello definito in sede comunitaria, è sintetizzato schematicamente nel box che segue.

<sup>2</sup> EEA, European Environment Agency.

<sup>3</sup> COM 2000(88) - Comunicazione della Commissione al Consiglio e al Parlamento europeo sulle politiche e misure dell'Unione Europea per ridurre le emissioni di gas a effetto serra.

<sup>4</sup> COM 2000/247 (piano d'azione per migliorare l'efficienza energetica nella Comunità europea).

<sup>5</sup> Direttiva 2001/77/CE (promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità).

<sup>6</sup> Direttiva 2002/91/CE (interventi specifici nel campo dell'edilizia).

<sup>7</sup> Direttiva 2003/30/CE (promozione dell'uso dei biocarburanti o di altri carburanti rinnovabili nei trasporti).

<sup>8</sup> Direttiva 2004/8/CE (promozione della cogenerazione).

## Il quadro legislativo di riferimento in Italia

### Le delibere del Comitato Interministeriale Prezzi

La delibera CIPE 137/1998<sup>9</sup> indicava un contributo delle fonti rinnovabili alla riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> entro il 2008-2012 per una quota compresa tra il 16% ed il 21%. La stessa delibera contemplava, inoltre, la realizzazione di un "Libro Bianco per la valorizzazione delle fonti rinnovabili". Il "Libro Bianco", approvato dal CIPE nel maggio 1999, indicava, per il periodo 2008-2012, in circa 8,6 Mtep l'incremento di energia fornita da fonti rinnovabili, oltre 6,5 Mtep di elettricità e poco più di 2 Mtep sotto forma di calore. Obiettivi specifici e misure per il contenimento delle emissioni di gas serra, tra i quali lo sviluppo delle fonti rinnovabili per la produzione di energia, venivano indicati nella successiva delibera CIPE 123/2002.

### La "carbon tax"

Nel 1998, con la legge 448, nota comunemente con il nome di carbon tax, viene introdotto un sistema di tassazione dell'energia che tenta di internalizzare nel costo dei combustibili fossili le esternalità ambientali causate dall'impiego dei combustibili stessi. La legge pone infatti come obiettivo la riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> derivanti dall'impiego di oli minerali secondo le conclusioni della Conferenza di Kyoto del dicembre 1997.

Lo strumento scelto per l'attuazione della norma è un aumento delle aliquote delle accise su prodotti petroliferi, carboniferi, coke e bitumi; una quota pari al 3% delle maggiori entrate derivanti dall'aumento dell'aliquota sull'accisa dei prodotti viene destinata a un fondo per la realizzazione di interventi attuativi del Protocollo di Kyoto (riduzione delle emissioni in atmosfera, promozione dell'efficienza energetica e delle fonti rinnovabili), da istituirsi presso il Ministero dell'Ambiente. In attesa che la *carbon tax* divenisse operativa il Governo, nel 1999, ha destinato 290 miliardi delle vecchie lire all'attuazione di programmi di riduzione delle emissioni in atmosfera e per la promozione dell'efficienza energetica e delle fonti rinnovabili (decreto interministeriale 337) attivando tre linee di intervento con i seguenti programmi, tuttora in corso: programmi di interesse regionale (155 miliardi di lire); programmi di interesse nazionale (85 miliardi di lire); programma di promozione delle fonti rinnovabili e dell'efficienza energetica presso PMI (50 miliardi di lire - fondo 598 ambiente). L'applicazione della *carbon tax* è stata sospesa da tutte le finanziarie utili dal 2001 ad oggi.

<sup>9</sup> Delibera CIPE 137/98.

## Decreto di recepimento della direttiva CE sulla promozione dell'elettricità da rinnovabili

Con il decreto legislativo approvato alla fine del 2003<sup>10</sup> si dà attuazione alle disposizioni della direttiva europea sulla promozione dell'elettricità da fonti rinnovabili e si gettano le basi per la definizione di un quadro di riferimento nazionale per la loro promozione.

Il decreto stabilisce:

- un incremento della quota d'obbligo di produzione di elettricità da rinnovabili;
- l'adozione di misure a sostegno della fonte solare (rese operative nel 2005 con un decreto per il fotovoltaico);
- l'applicazione del servizio di scambio sul posto dell'energia elettrica prodotta da impianti con potenza nominale non superiore a 20 kW;
- la razionalizzazione e la semplificazione delle procedure autorizzative;
- nuove modalità volte a semplificare e accelerare i tempi per il collegamento di impianti alla rete elettrica per rendere effettiva la priorità di dispacciamento.

La direttiva prevede inoltre misure che dovrebbero facilitare l'installazione di impianti sul territorio (pubblica utilità, indifferibilità ed urgenza per le opere connesse alla realizzazione di impianti, possibilità di ubicazione anche in zone classificate agricole, ...) e considera "ad inquinamento atmosferico poco significativo" gli impianti di produzione di energia elettrica di potenza complessiva non superiore a 3 MW termici ubicati all'interno di impianti di smaltimento rifiuti, alimentati da gas di discarica, gas residuati dai processi di depurazione e biogas, stabilendo che il loro esercizio non richiede autorizzazione. Con il decreto si istituisce un "Osservatorio nazionale sulle fonti rinnovabili e l'efficienza negli usi finali dell'energia" con compiti di monitoraggio, analisi tecnologiche e verifiche sugli effetti delle misure adottate per lo sviluppo delle rinnovabili e di proposta di ulteriori interventi per la riduzione dell'emissione dei gas serra e per l'incremento della quota di energia elettrica da fonti rinnovabili.

L'operatività del decreto costituisce ancora un fattore critico (anche l'Osservatorio non è del tutto operativo) mentre restano aperte alcune problematiche, quale l'utilizzo energetico dei rifiuti.

<sup>10</sup> DLgs 29 dicembre 2003 n. 387 "Attuazione della direttiva 2001/77/CE relativa alla promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell'elettricità".

## Decreto sul rendimento energetico nell'edilizia<sup>11</sup>

Il decreto disciplina secondo i principi stabiliti dalla direttiva 91/CE/2002:

- la metodologia per il calcolo delle prestazioni energetiche integrate degli edifici;
- l'applicazione di requisiti minimi in materia di prestazioni energetiche degli edifici;
- i criteri generali per la certificazione energetica degli edifici;
- le ispezioni periodiche degli impianti di climatizzazione;
- i criteri per garantire la qualificazione e l'indipendenza degli esperti incaricati della certificazione energetica e delle ispezioni degli impianti;
- la raccolta delle informazioni e delle esperienze, delle elaborazioni e degli studi necessari all'orientamento della politica energetica del settore;
- la promozione dell'uso razionale dell'energia anche attraverso l'informazione e la sensibilizzazione degli utenti finali;
- la formazione e l'aggiornamento degli operatori del settore.

Il decreto rimanda a strumenti attuativi successivi che definiscano entro fine gennaio 2006 sostanzialmente tutti gli obiettivi principali del decreto legislativo.

Le norme transitorie contengono alcune novità importanti e, tra queste, in particolare:

- prescrizioni minime di rendimento energetico degli edifici;
- obbligo di inserimento di sistemi di protezione della radiazione solare incidente delle superfici vetrate per contenere il fabbisogno energetico estivo;
- indicazione di una massa termica minima;
- obbligo di termoregolazione e caldaie di classe di efficienza minima 3 stelle;
- obbligo di predisposizione nuovi edifici pubblici e privati in modo tale da promuovere l'applicazione del solare termico e fotovoltaico;
- obbligo nei nuovi edifici pubblici o ad uso pubblico (per le tipologie dell'allegato del DPR 412/93) di inserire il solare termico per la produzione di acqua calda sanitaria.

## Decreto sulla promozione dell'uso dei biocarburanti nei trasporti<sup>12</sup>

Il decreto fissa gli obiettivi indicativi nazionali, calcolati sulla base del tenore energetico, di immissione in consumo di biocarburanti e altri carburanti rinnovabili, espressi come percentuale del totale del carburante diesel e di benzina nei trasporti immessi al consumo nel mercato nazionale (1,0 per cento entro il 31 dicembre 2005 e 2,5 per cento entro il 31 dicembre 2010).

<sup>11</sup> DLgs. 19 agosto 2005 n. 192, recepimento della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia.

<sup>12</sup> DLgs 30 maggio 2005, n. 128 "Attuazione della direttiva 2003/30/CE relativa alla promozione dell'uso dei biocarburanti o di altri carburanti rinnovabili nei trasporti".

## Le prospettive di riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> in Europa

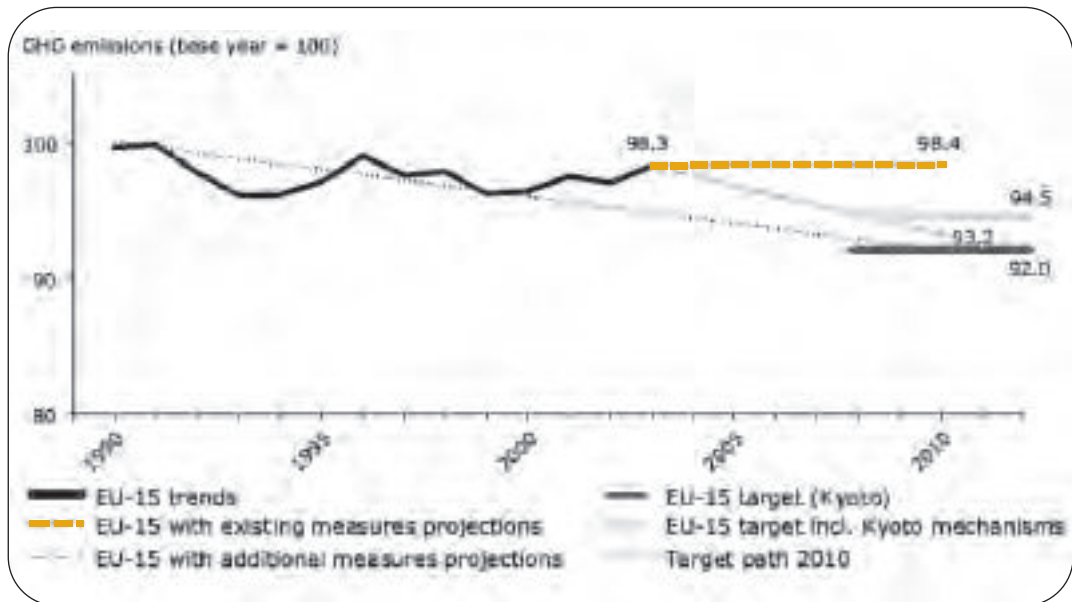
Secondo lo scenario tendenziale sviluppato dall'Agenzia Europea per l'Ambiente, EEA<sup>13</sup>, l'effetto delle misure adottate o previste dai paesi UE-15 - inclusi gli effetti del ricorso ai "meccanismi flessibili" contemplati dal protocollo di Kyoto - consentirebbero di conseguire al 2010 una ridu-

zione della media delle emissioni superiore dell'1,3% rispetto all'obiettivo (figura 4).

Come si vede in figura 5 la situazione nell'UE-15 presenta però differenze considerevoli e alcuni paesi non sarebbero in condizione di raggiungere l'obiettivo fissato nonostante le ulteriori misure che si prevede di adottare. Tra questi l'Italia le cui emissioni supererebbero comunque del 2,8% l'obiettivo.

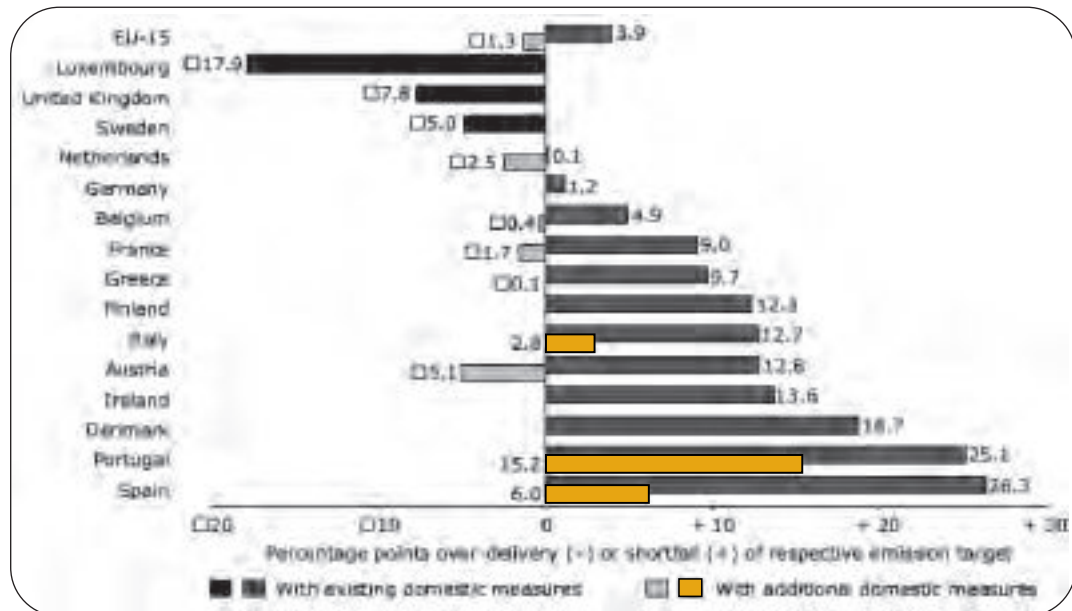
**Figura 4**

Emissioni di CO<sub>2</sub> nei paesi UE-15: dati storici, trend e obiettivo di Kyoto al 2008-2010 (Gt)  
Fonte: The European Environment - State and outlook, EEA 2005, Copenhagen



**Figura 5**

Distanza percentuale dall'obiettivo di riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> per i paesi UE-15  
Fonte: EEA, Environmental Energy Agency. The European Environment - State and outlook 2005, Copenhagen



<sup>13</sup> EEA, European Environment Agency.



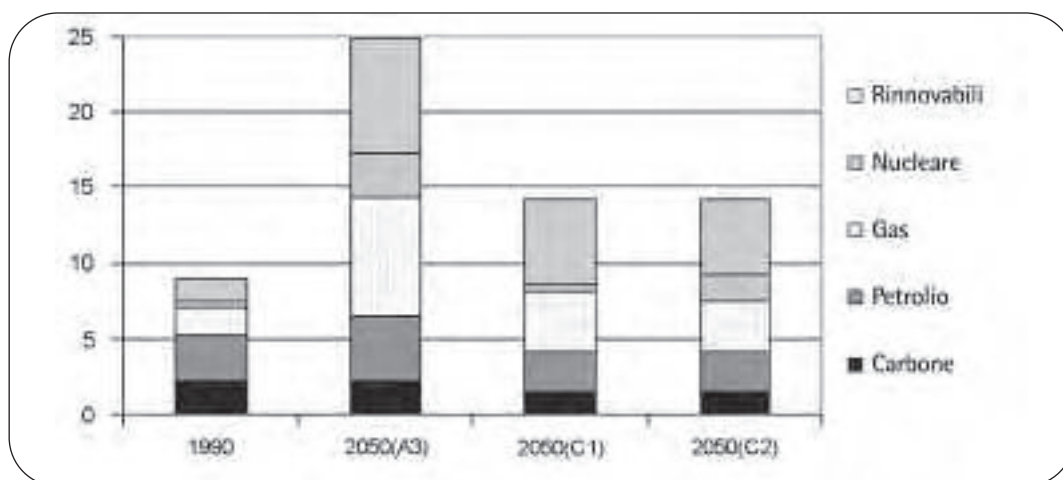
## Il ricorso alle fonti rinnovabili negli scenari internazionali

Come abbiamo visto, insieme ai piani finalizzati al contenimento della domanda e all'incremento dell'efficienza nella produzione e nell'utilizzazione dell'energia, ricopre un ruolo importante l'avvio di un processo che tenda alla sostituzione delle fonti fossili con quelle rinnovabili. I processi di modificazione del mix delle fonti energetiche sono oggetto di analisi di scenario che - sulla base di diverse assunzioni su fattori e indicatori di tipo economico e tecnologico - delineano trend alternativi dell'andamento della domanda di energia e del ricorso alle fonti nei prossimi decenni. L'Agenzia Internazionale dell'Energia ha realizzato uno scenario per cui nei paesi europei membri dell'OCSE, con l'adozione di specifici strumenti di sostegno economico attualmente all'esame, il contributo delle fonti rinnovabili alla domanda totale di energia potrebbe superare il 30% entro il 2030.

Gli scenari a scala mondiale costruiti dal World Energy Council<sup>14</sup> in collaborazione con l'IIASA<sup>15</sup> sono articolati in tre grandi famiglie caratterizzate da diverse ipotesi di sviluppo economico e tecnologico: tra queste facciamo rife-

rimento nel seguito a quelle a cui corrisponde un livello di emissioni di CO<sub>2</sub> compatibile con le indicazioni dell'IPCC<sup>16</sup> sulla stabilizzazione del clima. La famiglia A di scenari è caratterizzata da una forte crescita dell'economia e dei consumi a cui si accompagna un aumento significativo dell'efficienza energetica; tra gli scenari di questa famiglia, lo scenario A3 rispetta i livelli di emissione in quanto, tra le fonti fossili, privilegia il ruolo del gas naturale e prevede nel contempo, per far fronte alla domanda elevata, una quota significativa da fonti rinnovabili e da nucleare.

La famiglia B di scenari comprende i cosiddetti "scenari di riferimento" che, non riuscendo a rispettare i vincoli di emissione di cui si è detto, non vengono qui rappresentati. La famiglia C presuppone una politica di intervento fortemente orientata al contenimento della domanda, all'efficienza e al ricorso alle fonti rinnovabili. Gli scenari C1 e C2 differiscono essenzialmente per il diverso peso del nucleare, maggiore nello scenario C2. Nelle figure 6a e 6b è rappresentata la domanda mondiale di energia primaria per fonte, rispettivamente in valore assoluto e in percentuale, in un confronto tra il dato del 1990 e tre diverse ipotesi di scenario al 2050.



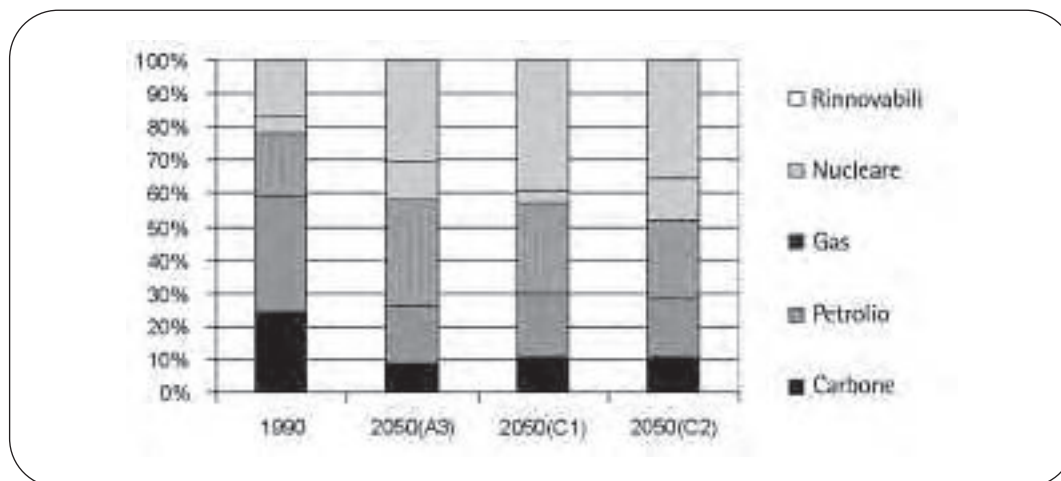
**Figura 6a**  
Domanda mondiale di energia primaria per fonte (Gtep). Dato 1990 e scenari al 2050 (IIASA-WEC)  
Fonte: WEC, World Energy Council, Global Energy Scenario To 2050 and Beyond (www.worldenergy.org)

<sup>14</sup> WEC - World Energy Council.

<sup>15</sup> IIASA - International Institute of Applied Systems Analysis.

<sup>16</sup> IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change.

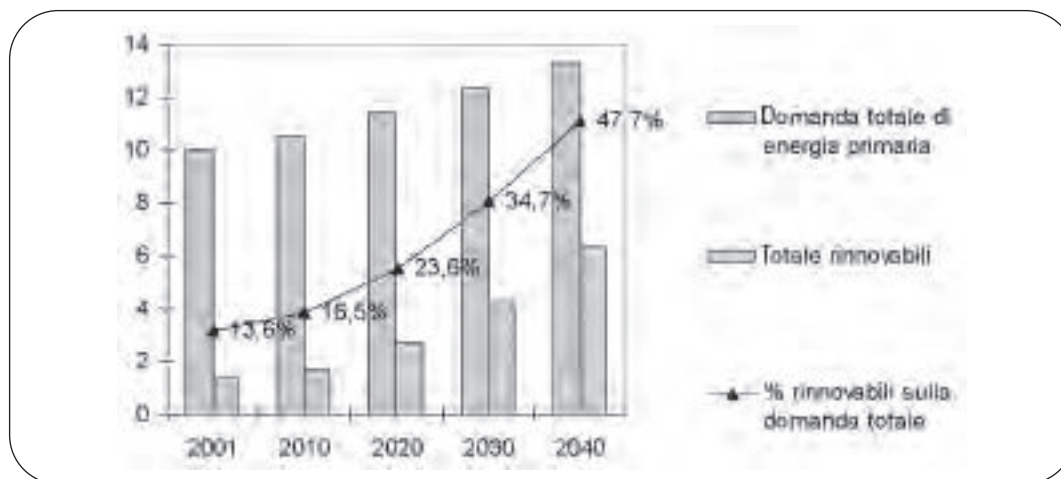
**Figura 6b**  
 Scenario EREC domanda mondiale di energia primaria e copertura da fonti rinnovabili 2001-2040 (Gtep)  
 Fonte: WEC, World Energy Council, Global Energy Scenario To 2050 and Beyond (www.worldenergy.org)



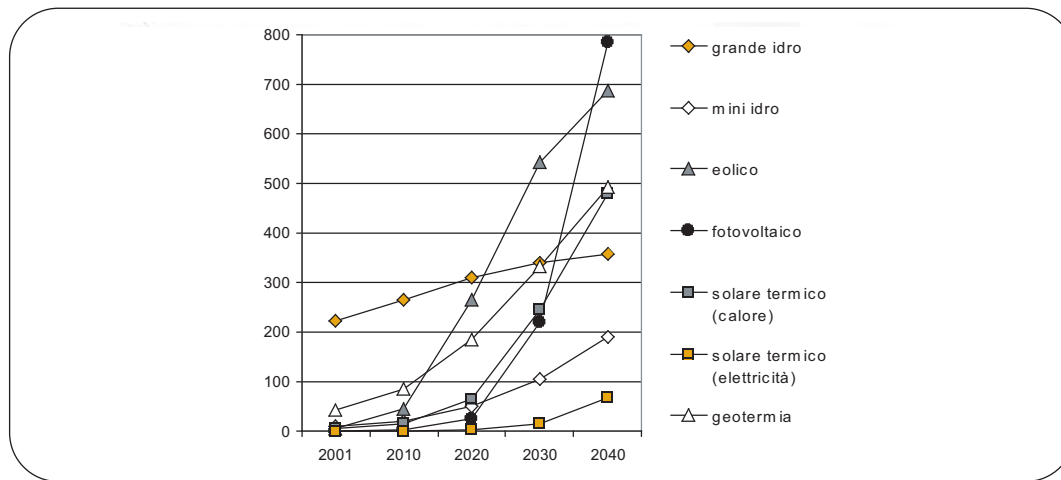
Recentemente l'European Renewable Energy Council<sup>17</sup> ha pubblicato uno scenario che prevede, a livello mondiale, il raggiungimento al 2040 di una quota vicina al 50% da fonti rinnovabili sul totale

della domanda di energia primaria. In figura 7 è rappresentato il contributo percentuale delle rinnovabili alla domanda totale e in figura 8 il contributo assoluto delle varie fonti (non è rappresentata la

**Figura 7**  
 Copertura percentuale della domanda mondiale di energia primaria per fonte. Dati 1990 e scenari al 2050 (IIASA-WEC)  
 Fonte: EREC su dati IIASA, Renewable Energy Scenario to 2040 (www.erec-renewables.org)



**Figura 8**  
 Scenario EREC contributo delle fonti rinnovabili esclusa biomassa 2001-2040 (Gtep)  
 Fonte: EREC su dati IIASA, Renewable Energy Scenario to 2040 (www.erec-renewables.org)



<sup>17</sup> EREC - European Renewable Energy Council.

biomassa che da sola al 2040 costituisce oltre il 50% del totale).

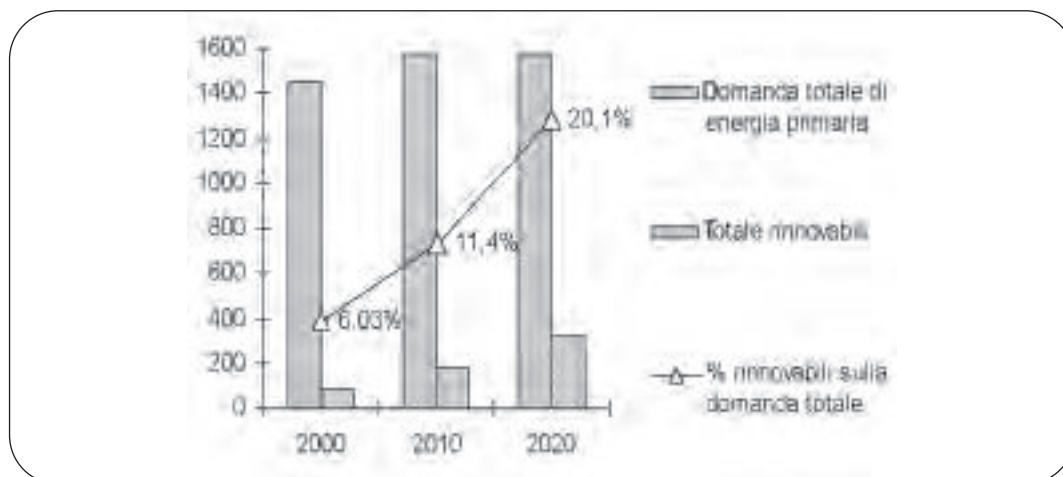
Un altro scenario sviluppato dall'EREC si riferisce ai paesi membri dell'UE-15. In questo caso il contributo complessivo delle rinnovabili alla domanda totale di energia è valutato pari all'11,4% nel 2010 e al 20% nel 2020 (figura 9). Si presuppone in questo caso che tra il 2010 e il 2020 le politiche per il risparmio energetico e per l'incremento dell'efficienza siano in grado di mantenere costante la domanda complessiva di energia. Anche in questo caso sul totale del contributo delle rinnovabili risulta preponderante quello della biomassa (sempre superiore al 60% del totale da rinnovabili).

Significativo è l'obiettivo di crescita della copertura percentuale della domanda di energia primaria con fonti rinnovabili che si propone di conseguire il Governo Federale di Germania. Tale percentuale, pari al 3,1% nel 2003, dovrebbe crescere al 4,2% entro il 2010 e superare il 50% entro il 2050<sup>18</sup>.

## Ruolo dell'innovazione tecnologica nello sviluppo delle rinnovabili

Secondo gli "scenari di riferimento" elaborati dai più autorevoli istituti internazionali di ricerca i prossimi trent'anni saranno caratte-

rizzati a livello mondiale da un aumento dei consumi di energia, ancora prevalentemente soddisfatti con il ricorso a fonti fossili, e delle emissioni di anidride carbonica in atmosfera di cui si prevede al 2030 un sostanziale raddoppio rispetto al dato relativo al 1990. Al rallentamento della crescita della domanda di energia e alla riduzione dell'intensità carbonica nella generazione elettrica nei paesi più industrializzati si contrappone infatti la forte crescita di economie emergenti, in prima linea Cina e India, con un rilevante aumento della domanda di energia e delle emissioni di CO<sub>2</sub> in atmosfera, dovuta al ricorso prevalente ai combustibili fossili e in particolare al carbone<sup>19</sup>. Più della metà della generazione elettrica al 2030 sarà fornita mediante tecnologie emerse a partire dagli anni 90 come le turbine a gas a ciclo combinato, le tecnologie avanzate del carbone, le fonti rinnovabili. Nell'ambito del programma comunitario WETO<sup>20</sup>, sono stati ricostruiti i percorsi di apprendimento tecnologico di alcune tecnologie in fase evolutiva sulla base di dati storici fino al 2000 e alle proiezioni al 2030 di uno scenario "di riferimento", rappresentati nella figura 10, su step temporali di cinque anni, attraverso le cosiddette "curve di apprendimento" che descrivono l'andamento dei costi totali di investimento in funzione delle capacità totali installate.

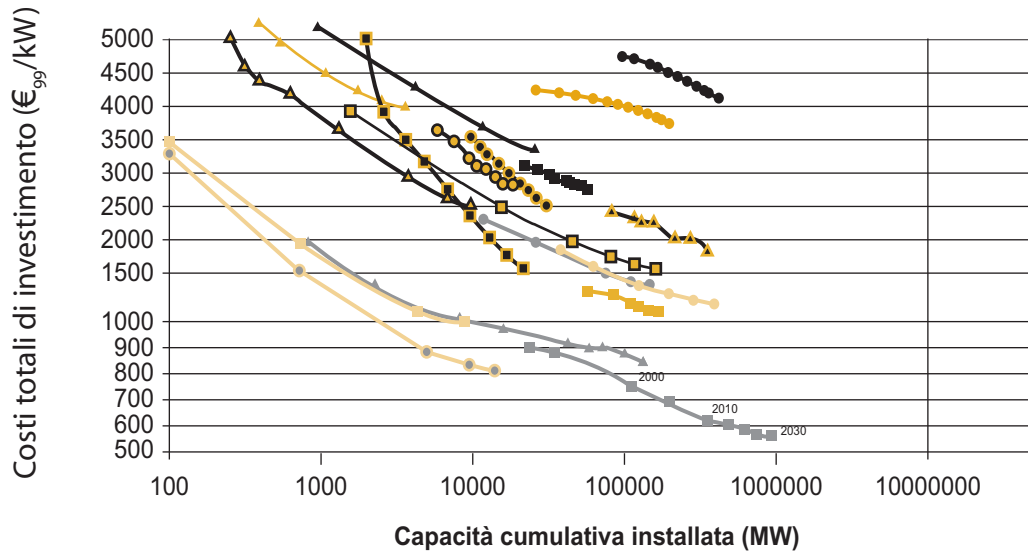


**Figura 9**  
Contributo delle fonti rinnovabili alla domanda di energia primaria nei Paesi membri dell'UE-15  
Fonte: EREC su dati Eurostat, Renewable Energy Target for Europe, EREC 2005 ([www.erec-renewables.org](http://www.erec-renewables.org))

<sup>18</sup> Fonte: Federal Ministry of Economics and Labour, Innovation and New Energy Technologies, Berlin 2005 ([www.bmwa.bund.de](http://www.bmwa.bund.de)).

<sup>19</sup> Si veda in proposito: "World Energy Outlook 2005 – Middle East and North Africa Insights", OECD/IEA 2005.

<sup>20</sup> WETO; World Energy, Technology and climate policy Outlook 2030, European commission, Directorate-General for Research (2003).

**Figura 10**

Capacità installata per tecnologia in funzione degli investimenti (dati storici 1990-2000 e proiezioni 2010-2030)

Fonte: WETO; World Energy, Technology and Climate Policy Outlook 2030, European Commission, Directorate-General for Research (2003)

- Idroelettrico
- Nucleare
- ▲ Nuovo nucleare
- ▲ Fotovoltaico
- Lignite convenzionale
- Carbone convenzionale
- Mini idro
- Turbina a biogas
- Cogenerazione a biomassa
- Ciclo combinato con gassificazione del carbone
- Carbone diretto
- Carbone supercritico
- ▲ Gas convenzionale
- ▲ Solare termoelettrico
- ▲ Eolico
- Cella a combustibile ad ossidi solidi (SO)
- Ciclo combinato a gas
- Cella a combustibile ad elettrolita polimerico (PEM)

Tabella 1 – Effetti delle politiche di sviluppo tecnologico in relazione agli scenari

|                         | Generazione elettrica |         |          |             |                     |                              | Emissioni totali di CO <sub>2</sub> |
|-------------------------|-----------------------|---------|----------|-------------|---------------------|------------------------------|-------------------------------------|
|                         | Gas                   | Carbone | Nucleare | Rinnovabili | Tot. gen. elettrica | Emissioni di CO <sub>2</sub> |                                     |
| <b>caso gas</b>         | 21,66%                | -12,26% | -5,36%   | -10,56%     | 0,34%               | -7,2%                        | -1,84%                              |
| <b>caso carbone</b>     | -16,00%               | 15,00%  | -8,50%   | -10,20%     | 1,15%               | 0,15%                        | 0,9%                                |
| <b>caso nucleare</b>    | -7,10%                | -8,10%  | 77,58%   | -9,90%      | 0,6%                | -7,3%                        | -2,8%                               |
| <b>caso rinnovabili</b> | -12,30%               | -3,80%  | -2,40%   | 132%        | -7,2%               | -6,9%                        | -1,0%                               |

Fonte: WETO; World Energy, Technology and climate policy Outlook 2030, European Commission, Directorate-General for Research (2003)

Ma, come noto, sviluppi tecnologici accelerati e veri e propri *breakthrough* tecnologici possono determinare deviazioni delle traiettorie descritte dallo scenario di riferimento. A questo proposito, sempre in ambito WETO, sono state costruite ipotesi alternative in relazione ad alcuni "casi tecnologici" in alcuni dei quali assume particolare rilievo l'accelerazione degli investimenti in attività di R&S.

*Caso gas:* si è assunto un aumento della disponibilità della fonte assieme ad ulteriori miglioramenti tecnologici degli impianti a turbina a gas a ciclo combinato e alle celle a combustibile.

*Caso carbone:* sono stati ipotizzati notevoli miglioramenti nelle prestazioni di tutte le tecnologie innovative di combustione dei combustibili solidi.

*Caso nucleare:* si è assunto un "salto" nella tecnologia in termini di costo e di sicurezza.

*Caso rinnovabili:* prevede, rispetto a quanto prospettato nello scenario tendenziale, maggiori investimenti da parte della comunità internazionale, per la ricerca e l'industrializzazione in settori, quali l'eolico, il solare termodinamico, l'idroelettrico di piccola taglia e il fotovoltaico.

Nella tabella 1 sono indicati, con riferimento agli scenari sinteticamente descritti, gli effetti sulla generazione elettrica e sulla riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> conseguibili con l'adozione di specifiche politiche e misure in grado di accelerare lo sviluppo tecnologico e l'introduzione di innovazione nel sistema produttivo.

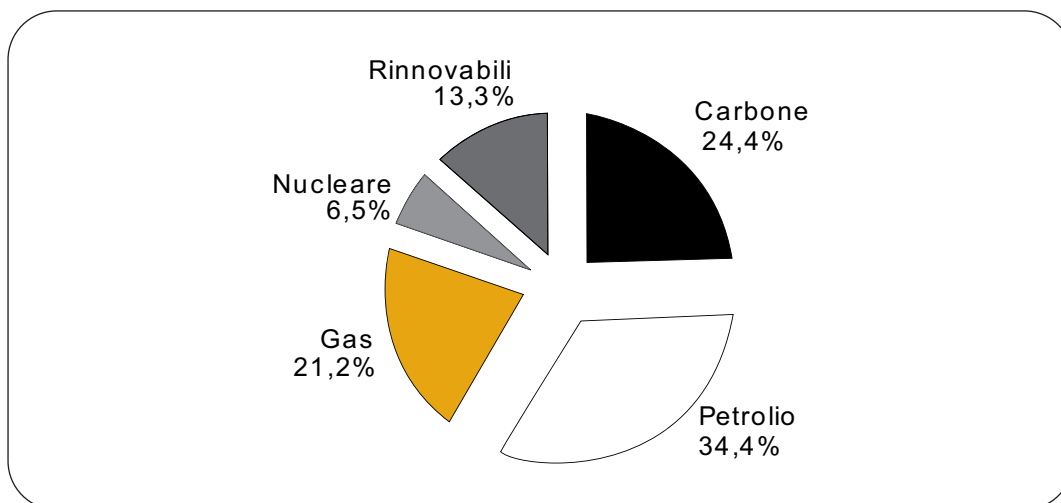
## La produzione di energia da fonti rinnovabili

### Le rinnovabili nel contesto internazionale

Nel 2003 le fonti energetiche rinnovabili, con una produzione di energia equivalente a 1.404 Mtep, hanno coperto a livello mondiale il 13,3% dell'offerta totale di energia primaria, pari a 10.579 Mtep (dati dell'Agenzia Internazionale dell'Energia). Nello stesso anno il petrolio ha contribuito all'offerta di energia primaria per il 34,4%, il carbone per il 24,4%, il gas naturale per il 21,2% e il nucleare per il 6,5% (figura 11).

energia primaria (1,6%) mentre nei paesi OECD il tasso di crescita delle rinnovabili (1,1%) è stato addirittura inferiore a quello relativo alla domanda (1,4%). In valori percentuali la crescita più significativa di produzione da rinnovabili è quella fatta rilevare dalla fonte eolica che, pur rimanendo su valori assoluti molto bassi, ha segnato una media annuale di crescita dal 1990 al 2003 pari al 23,9%, dovuta essenzialmente alle nuove installazioni nei Paesi dell'OECD. La produzione di energia da biomasse solide, che rappresenta invece la quota più elevata di produzione da rinnovabili, ha segnato il più basso tasso di crescita, pari all'1,6%, di poco superiore a quello dell'offerta totale di energia

**Figura 11**  
Offerta di energia primaria. Mondo. Anno 2003  
Fonte: elaborazione ENEA su dati EIA



Le fonti fossili, con oltre l'80% dell'offerta primaria di energia, hanno rappresentato ancora nel 2003 la principale fonte di approvvigionamento energetico e, secondo le previsioni dei principali osservatori internazionali, manterranno questo ruolo ancora per qualche decennio. D'altra parte la crescita del ricorso alle rinnovabili non sembra ancora tale da indicare uno spostamento significativo verso un modello energetico meno dipendente dalle fonti fossili. Dal 1990 al 2003, infatti, le rinnovabili, sono cresciute a livello mondiale a un tasso (1,8%) appena superiore a quello della domanda di

primaria e attribuibile in modo uniforme ai Paesi OECD e non-OECD. Si attesta sull'1,6% anche la crescita media della produzione di energia da fonte idroelettrica con una netta prevalenza dei Paesi non-OECD, che con il 2,8% di aumento, dal 1990 al 2003, hanno compensato lo 0,4% di crescita registrato nei Paesi OECD. Una tendenza, questa, che dovrebbe confermarsi anche nel futuro, tenuto conto che i grandi impianti che sono stati realizzati nei Paesi più industrializzati nel secolo scorso hanno fortemente ridotto il potenziale residuo ancora utilizzabile in modo compatibile con l'ambiente.



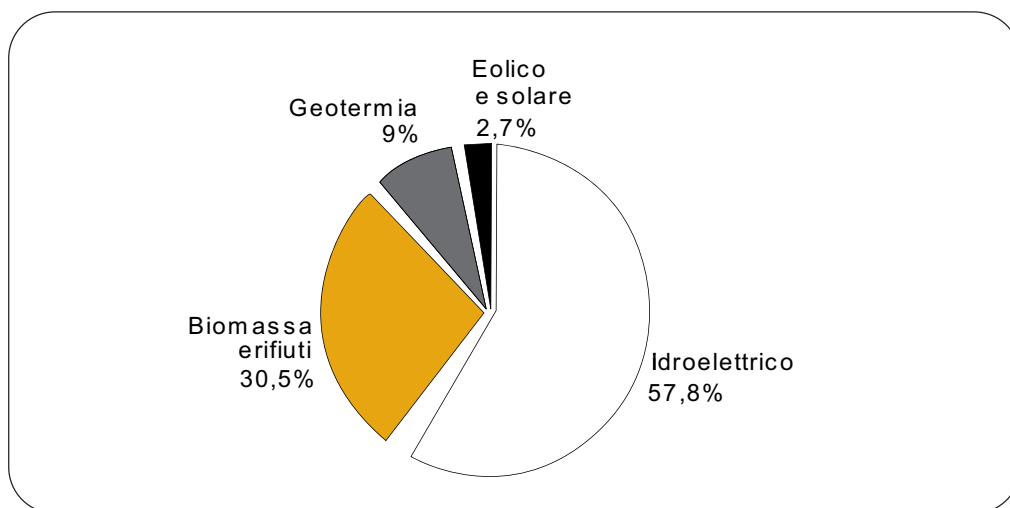
## Le rinnovabili in Italia

In Italia le fonti rinnovabili di energia - che rappresentano comunque la principale fonte di energia endogena - hanno contribuito nel 2004 a poco più del 7% del consumo interno lordo. Tale percentuale, pur allineata alla media europea, è dovuto essenzialmente al contributo dell'idroelettrico e della geotermia che hanno coperto insieme oltre il 65% del totale. Il contributo di energia da biomasse e rifiuti si attesta oltre il 30% mentre il contributo di eolico e solare - le cosiddette "nuove rinnovabili" - non raggiunge complessivamente il 3% con un contributo del solare inferiore allo 0,15%.

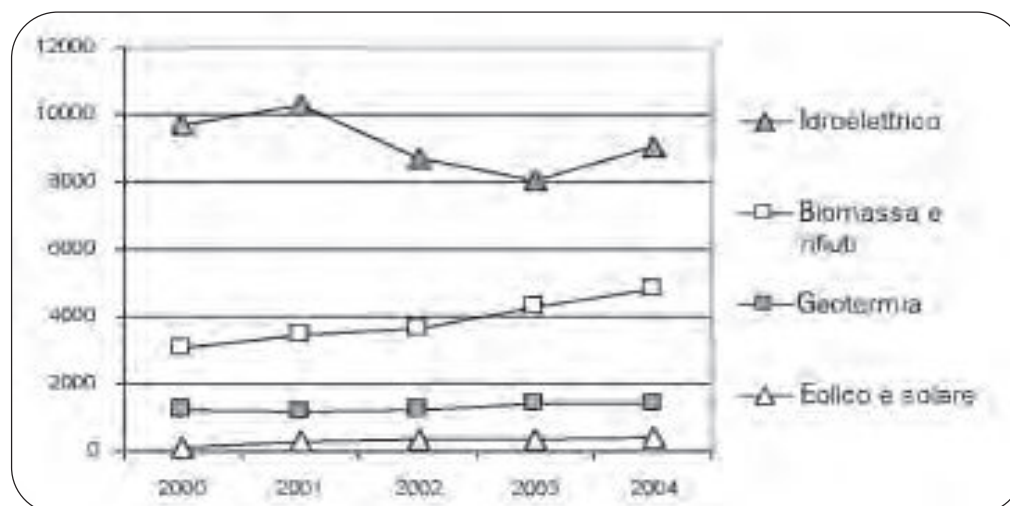
L'analisi dei dati relativi alla produzione di energia elettrica, a cui le rinnovabili hanno concorso nel 2004 con il 16% circa del consumo

lordo totale, ci consente di apprezzare meglio il contributo delle diverse fonti ed effettuare una verifica rispetto agli obiettivi di produzione assunti dall'Italia in sede comunitaria.

Il *trend* di produzione energetica da rinnovabili negli ultimi cinque anni mostra: una forte fluttuazione dell'idroelettrico condizionata dai fattori climatici; un buon incremento della produzione da biomassa e rifiuti, comunque attestata su valori ancora molto lontani da quelli tipici dei Paesi europei; e un leggero incremento della produzione da fonte geotermica. Il contributo dalle nuove fonti rinnovabili non mostra variazioni apprezzabili ma, a fronte di una certa vivacità dimostrata nel settore eolico, è caratterizzato da una situazione di stagnazione per quanto riguarda la produzione da fonte solare.

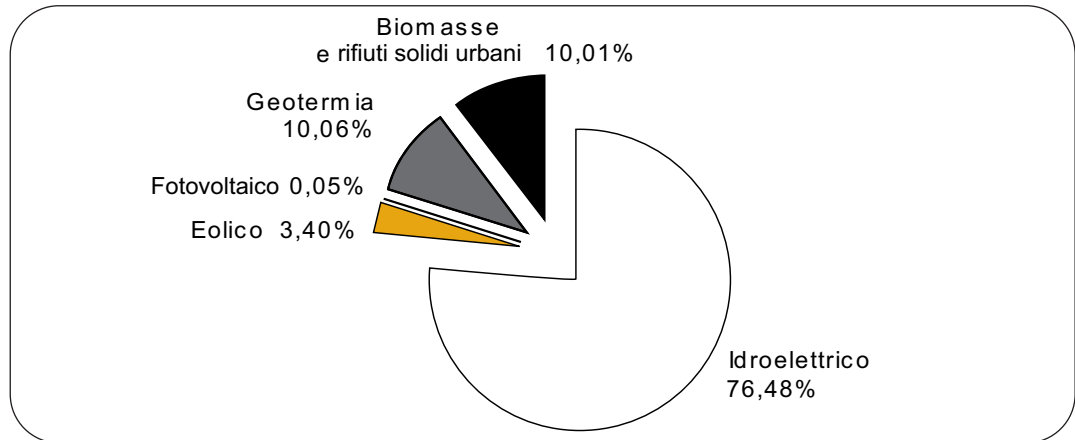


**Figura 12**  
Produzione di energia per fonte rinnovabile (percentuali). Italia 2004  
Fonte: elaborazione ENEA da fonti varie



**Figura 13**  
Produzione di energia da rinnovabili (ktep). Italia 2000-2004  
Fonte: elaborazione ENEA da fonti varie

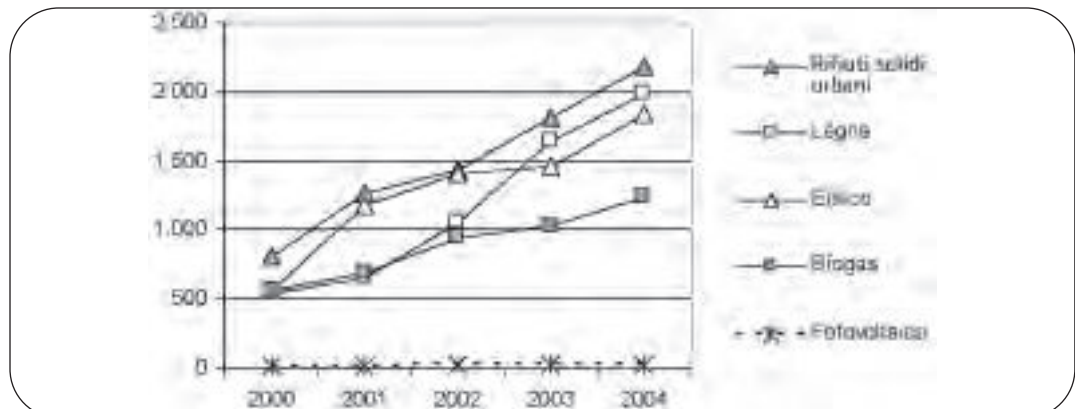
**Figura 14**  
Produzione di elettricità per fonte rinnovabile (percentuali). Italia 2004  
Fonte: elaborazione ENEA su dati GRTN



Con una potenza lorda intorno a 17 GW e una produzione di oltre 41 TWh nel 2004 l'idroelettrico copre oltre il 75% della produzione da rinnovabili. Al di là di un incremento dell'efficienza degli impianti, la realizzazione di nuova potenza idroelettrica appare limitata a interventi di piccola taglia: sia attraverso il ripristino di impianti obsoleti che la realizzazione di nuovi impianti quando compatibili con gli aspetti ambientali. Se infatti si deve escludere la possibilità di realizzare nuovi grandi impianti per il forte impatto ambientale connesso, va segnalato che ulteriori limitazioni dell'utilizzo energetico della risorsa idrica possono determinarsi come conseguenza dell'abbassamento dei limiti di sfruttamento (deflusso minimo vitale). Anche per l'energia geotermoelettrica,

che con oltre 5 TWh ha contribuito nel 2004 per un 10% circa alla produzione di elettricità da rinnovabili, non si può prevedere un incremento significativo dei circa 700 MW di potenza installati. Diverso è il discorso relativo all'utilizzo energetico di biomasse e rifiuti (pari a 5 TWh del 2004), e dell'eolico (1,8 TWh) sia per il *trend* di positivo fatto segnare negli ultimi cinque anni ma soprattutto per le potenzialità di crescita, particolarmente elevate nel caso della biomassa. Particolare è la situazione del fotovoltaico, la cui produzione elettrica nel 2004 (pari a 27 GWh) sconta il ritardo complessivo dell'industria nazionale nel settore, ulteriormente penalizzata dal ritardo con cui si è regolamentato il nuovo meccanismo di incentivazione in conto energia.

**Figura 15**  
Produzione di energia da rinnovabili (ktep). Italia 2000-2004  
Fonte: elaborazione ENEA da fonti varie

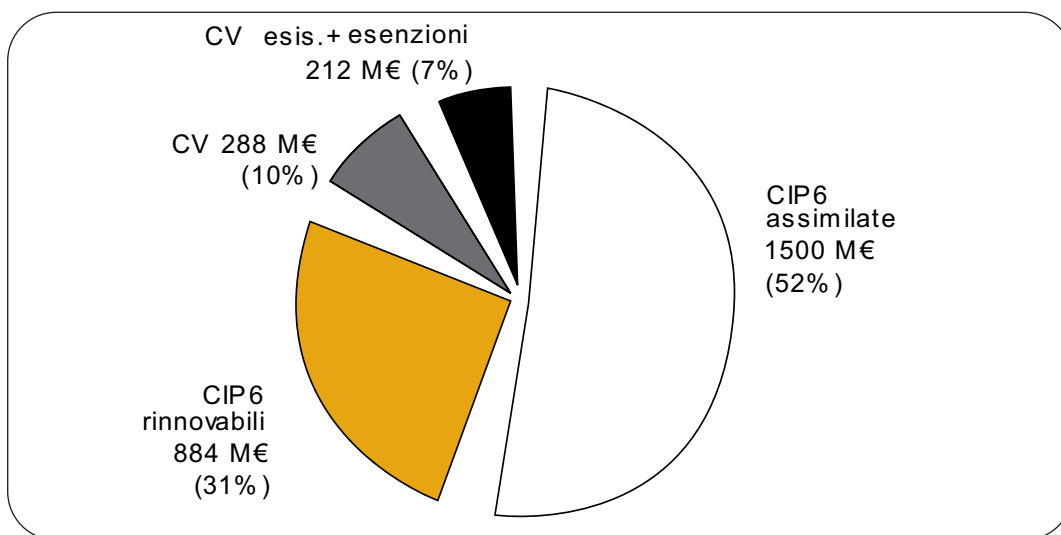


## L'incentivazione delle rinnovabili

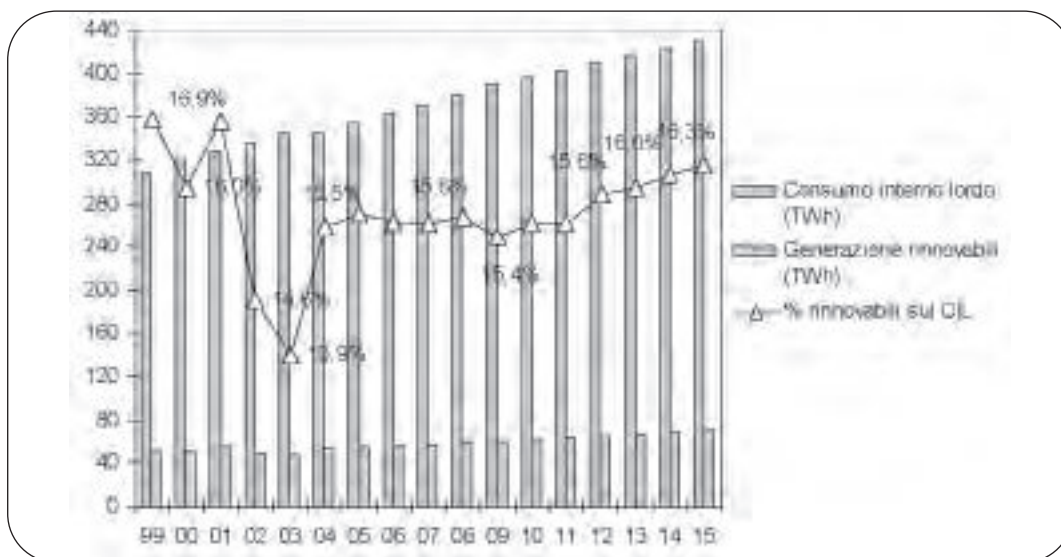
L'introduzione sul mercato di nuove tecnologie è sempre fortemente condizionato dai sistemi di incentivazione adottati. Il sistema delle incentivazioni alle rinnovabili vigente in Italia ha determinato non poche distorsioni, dimostrandosi funzionale, più che al conseguimento di obiettivi di sviluppo delle rinnovabili sul lungo periodo, all'incentivazione - sia in forma diretta che indiretta (esenzioni) - di una vasta gamma di settori del panorama elettrico estranei alle rinnovabili.

In questo contesto sembra difficile raggiungere l'obiettivo di crescita delle rinnovabili al 2010 delineato dall'ultima direttiva europea sulle rinnovabili (che comporterebbe una percentuale di generazione elettrica da rinnovabili pari al 22% del consumo interno lordo) anche considerando gli effetti dell'applicazione del recente decreto di incentivazione specifica per il fotovoltaico.

Si veda in proposito la figura 17 che mostra graficizzato il trend dei consumi e della produzione di elettricità da rinnovabili sulla base delle misure attualmente in vigore.



**Figura 16**  
Meccanismi di incentivazione: costi CIP6 e Certificati Verdi (Italia 2004)  
Fonte: elaborazione ENEA da fonti varie



**Figura 17**  
Effetto dei meccanismi di incentivazione sulla quota di rinnovabili sul Consumo interno lordo di elettricità. Italia 1999-2015  
Fonte: elaborazione ENEA da fonti varie

## Ostacoli alla diffusione delle rinnovabili in Italia: regime autorizzativo e consenso locale

Evidentemente la difficoltà di sviluppo delle rinnovabili in Italia non sono ascrivibili esclusivamente a meccanismi incentivanti inadeguati o non sufficientemente credibili per l'investitore. Uno dei maggiori ostacoli allo sviluppo delle rinnovabili sembra venire oggi in Italia dai tempi lunghi connessi alle procedure autorizzative e, in alcuni casi, dalla difficile acquisizione del consenso sociale alla realizzazione degli interventi stessi. Una indagine compiuta dall'APER<sup>21</sup> su un numero elevato di casi ha consentito di identificare e confrontare le problematiche specifiche che l'iter autorizzativo presenta in relazione a diverse tipologie di impianto a fonte rinnovabile. Nelle tabelle 2 e 3 sono indicati rispettiva-

mente alcuni parametri di confronto tra impianti a fonti rinnovabili nella fase di autorizzazione alla costruzione e le principali difficoltà riscontrate in questa fase.

Pur ritenendola molto importante, la ricerca del consenso locale per un impianto alimentato da fonti rinnovabili non è quasi mai ricercata dall'imprenditore, soprattutto se l'intervento sul territorio è di modeste dimensioni; spesso interviene solo quando si è già in presenza di un conflitto. Per alcuni versi i processi localizzativi degli impianti produttori di energia da fonti rinnovabili non differiscono dai più comuni processi che suscitano conflitti ambientali, come gli impianti per lo smaltimento dei rifiuti, le principali infrastrutture di trasporto, gli impianti energetici tradizionali: in tutti i casi si assiste all'attivarsi di una opposizione locale con connotati NIMBY (*not in my back yard*, non nel mio cortile).

**Tabella 2 - Parametri di confronto fra impianti alimentati da fonti rinnovabili nella fase di autorizzazione alla costruzione**

|  | Idroelettrico                           | Eolico          | Biogas                         | Biomasse                             |
|--|---|-----------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| Durata temporale dell'iter (mesi)        | ~72 (comprensivo concessione uso acqua) | ~74             | ~6                             | ~12                                  |
| Tipo di valutazione ambientale richiesta | Screening                               | Screening o VIA | DPR 203/88 ora (PPC screening) | DPR 203/88 ora (PPC screening o VIA) |
| Costo iter autorizzativo (% sul totale)  | 2-6%                                    | 4-10%           | 4%                             | 1%                                   |

**Tabella 3 - Difficoltà riscontrate durante la fase di autorizzazione**

|               |   |
|---------------|---|
| Idroelettrico | Tempestiva incerta nel rilascio del disciplinare di concessione per l'utilizzo delle acque da parte dell'Ente preposto (Regione o Provincia), variabile in media tra 1 e 5 anni |
| Eolico        | Problemi di interfaccia con le autorità ambientali e nella realizzazione degli allacciamenti alla rete ENEL o ORTN (tempi lunghi e preventivi di allacciamento non trasparenti) |
| Biogas        | Autorizzazione all'allacciamento per ritardi procedure di ENEL Distribuzione  |
| Biomasse      | Autorizzazione all'emissioni in atmosfera con richieste di controllo emissioni (alleggiate) (procedure non standard e richieste da alcune amministrazioni)                      |

Fonte: elaborazione ENEA da fonti varie

<sup>21</sup> APER, Associazione dei produttori di energia elettrica da fonti rinnovabili. I risultati dell'indagine sono pubblicati nel cap. 5 del rapporto "Lo sviluppo delle rinnovabili in Italia tra necessità e opportunità", ENEA 2005.

Queste le conclusioni di una indagine condotta nel settembre 2003 con l'Osservatorio Gestione Conflitti Ambientali<sup>22</sup> tra gli associati APER al fine di studiare le cause, le dinamiche e le strategie per la ricomposizione dei conflitti ambientali legati alle fonti rinnovabili. Nei casi studiati, con l'eccezione dell'installazione di parchi eolici e di un caso di impianto a biomasse, non è stato fatto uso di strumenti per la ricerca del consenso locale o sono state organizzate, a progetto ultimato, limitate campagne di informazione o incontri con comitati di cittadini che si erano formati a causa della costruzione dell'impianto.

Da questo atteggiamento, più improntato alla gestione del conflitto in corso d'opera che alla sua prevenzione, scaturiscono insoddisfazioni profonde dei proponenti, motivate da un significativo aumento dei tempi di realizzazione dell'opera (34% dei casi) e dei costi.

Dalle esperienze studiate risulta chiaro che, per garantire il consenso locale, la scelta migliore per l'imprenditore sia quella di mostrarsi, sin dalle prime fasi del progetto, presente sul territorio e disponibile al confronto non solo con gli amministratori locali ma con i cittadini e l'insieme del tessuto sociale.

## Le opportunità per il sistema produttivo

Un incremento del ricorso alle rinnovabili non può non rientrare in una politica di diversificazione delle fonti, insieme a molte altre azioni sul lato dell'offerta e della domanda, necessarie al nostro Paese per affrontare coerentemente l'incerto mercato dell'energia nei prossimi decenni.

Abbiamo visto che l'attuale *trend* di crescita della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili consentirà difficilmente di raggiungere l'obiettivo per cui si è impegnato il nostro Paese. Si ritiene d'altro canto che una politica mirata possa ancora portare a risultati significativi, quali quelli raggiunti in Paesi come la Danimarca, la Germania e, più recentemente, la Spagna, in cui i nuovi settori industriali delle rinnovabili si presentano già oggi come una realtà vivace e consolidata con un indotto significativo in termini economici e di occupazione e prospettive di crescita sul mercato internazionale di grande rilievo.

Anche in Italia un rinnovato impegno per sviluppare le rinnovabili può rappresentare una forte occasione di crescita industriale, tanto più strategica

**Tabella 4 - La produzione di aerogeneratori in alcuni paesi europei. Anno 2002**

| Paese     | Capacità prodotta (MW) | Quota del mercato mondiale | Capacità esportata (MW) | Quota export |
|-----------|------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------|
| Germania  | 2194                   | 29,6%                      | 459                     | 20,9%        |
| Danimarca | 3147                   | 42,5%                      | 2640                    | 83,9%        |
| Spagna    | 1221                   | 16,5%                      | 28                      | 2,3%         |

Fonte: elaborazione ENEA da fonti varie

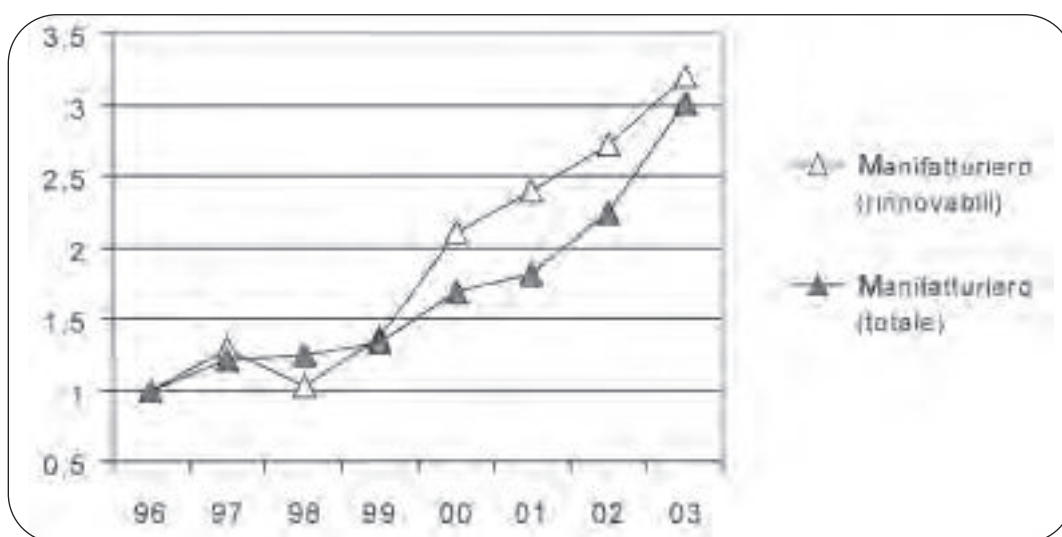
<sup>22</sup> Osservatorio gestione conflitti ambientali e territoriali ([www.conflittiambientali.it](http://www.conflittiambientali.it)).



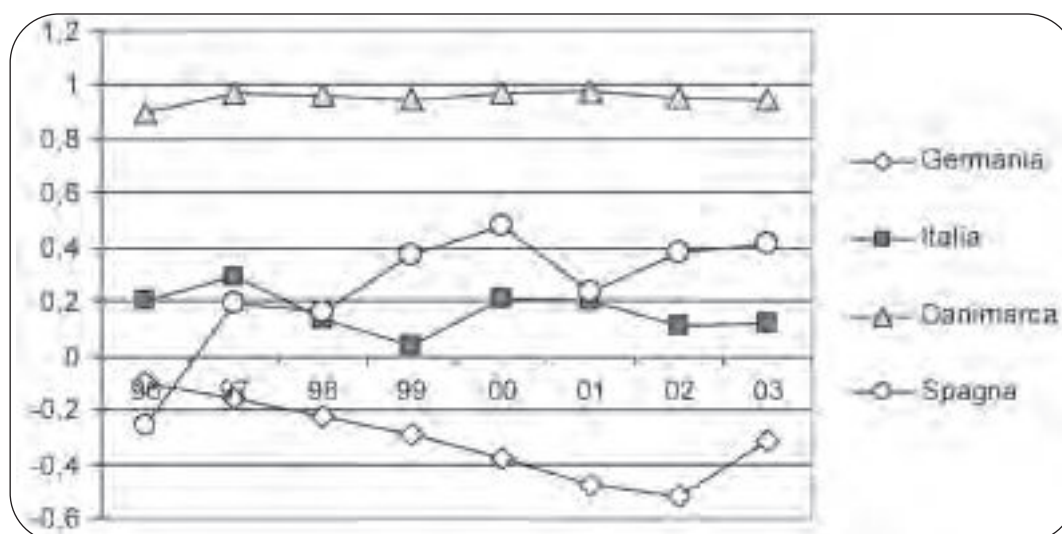
quanto più gli interventi si collocano in settori a elevato tasso di innovazione tecnologica. Da vari anni la dimensione della competitività tecnologica è stata infatti indicata come la componente centrale dello sviluppo delle economie dei Paesi avanzati. Da un esame preliminare dei maggiori aggregati geoeconomici, risulta una dinamica degli scambi internazionali di prodotti/impianti connessi con l'utilizzo delle rinnovabili che, sebbene su quantità an-

cora modeste, è in linea con l'andamento del commercio totale. Si evidenzia peraltro l'emergere di nuove dinamiche tecnologiche in alcuni di questi settori benché ancora in un ambito relativamente circoscritto di paesi e mercati. Si segnala a questo proposito la specializzazione produttiva del Giappone nel settore fotovoltaico e la crescita sostenuta dell'export cinese, in particolare nel settore delle tecnologie per l'utilizzo dell'energia solare.

**Figura 18**  
Andamento dell'export di prodotti relativi alle rinnovabili in Cina (valore 1996=1)  
Fonte: elaborazione ENEA da fonti varie



**Figura 19**  
Saldi normalizzati<sup>23</sup> dei prodotti manifatturieri per le rinnovabili  
Fonte: elaborazione ENEA da fonti varie



<sup>23</sup> Con riferimento ad un generico paese dichiarante e ad un generico prodotto (o gruppo di prodotti) il saldo commerciale normalizzato è dato dal rapporto del saldo corrente (esportazioni-importazioni) e dell'interscambio totale (somma delle esportazioni e importazioni).



In Europa spicca il ruolo ricoperto dalla Danimarca (eolico) e dalla Spagna che, pur affacciandosi più di recente nei settori delle rinnovabili, presenta il trend di crescita complessivo delle esportazioni in questi settori più sostenuto tra i Paesi dell'UE. Da segnalare che il saldo tedesco, negativo a causa degli ingenti investimenti effettuati per la realizzazione di impianti, appare in forte crescita a partire dal 2002 a causa del rafforzamento dell'industria nazionale in questi settori.

Rispetto a tale scenario la posizione dell'industria italiana conferma la propria debolezza competitiva in linea con le perdite registrate da tutto il comparto manifatturiero e con scostamenti spesso significativi dalle già deludenti *performance* registrate dalla maggior parte dei Paesi europei.

L'offerta sul mercato interno risulta infatti caratterizzata da una modesta entità di produttori nazionali di componenti per le rinnovabili e da un consistente ricorso ai mercati internazionali per l'offerta di componenti.

Tutto ciò non ha consentito di utilizzare, per lo sviluppo di una filiera nazionale, gli incentivi, anche ingenti, già erogati né, probabilmente, consentirà di utilizzare quelli di futura erogazione.

Di fatto in questi anni l'industria italiana di settore non si è sviluppata. Non sono nate aziende che investissero sulle nuove tecnologie come il fotovoltaico, non sono cresciute aziende nelle tecnologie in fase di assestamento quale l'eolico; sono invece uscite dal mercato aziende che operavano in settori maturi, quali l'idroelettrico, in cui il nostro Paese era stato per anni leader indiscusso sul mercato mondiale.

D'altra parte il decollo in Italia di una industria delle rinnovabili sembra una condizione necessaria per affrontare in modo adeguato le sfide di questo secolo. Operare per la riduzione delle emis-

sioni e per la trasformazione del nostro sistema della produzione e degli usi finali nella direzione di una maggiore sostenibilità, non è solo un costo per il sistema ma può divenire una opportunità per svilupparne l'efficienza e la competitività in un mercato globale sempre più selettivo e difficile. La crescita dei mercati è così consistente e le tecnologie sono in così rapido sviluppo che, nonostante i ritardi accumulati, la scommessa sulle rinnovabili può essere considerata ancora aperta, soprattutto se si sarà in grado, da una parte, di semplificare e rendere più trasparente il sistema delle regole e, dall'altra, di rispondere alle problematiche di accettabilità sociale con una nuova modalità di partecipazione alle scelte.

Ma nella sfida che si presenta a livello Paese gioca un ruolo determinante lo sviluppo di un sistema integrato ricerca-industria in grado di accelerare l'introduzione sul mercato di nuove tecnologie avvalendosi di meccanismi di incentivazione in grado di innescare un circolo virtuoso tra tecnologia, innovazione e sviluppo industriale.

### L'ENEA per le fonti rinnovabili

Il ruolo dell'ENEA per lo sviluppo e la diffusione delle fonti rinnovabili di energia si articola su diversi livelli e con diverse modalità avvalendosi delle competenze e delle esperienze sviluppate in molte aree della ricerca in campo economico e scientifico e della sperimentazione di nuove tecnologie.

Il modello d'intervento dell'ENEA si caratterizza in modo peculiare per la capacità di integrare capacità di analisi e valutazione dei principali fattori connessi ai processi di gestione delle risorse energetiche e ambientali, con l'analisi e il monitoraggio di sistemi energetici e ambientali complessi e con la

capacità di progettare, sperimentare e realizzare sistemi impiantistici innovativi. Nel caso delle rinnovabili il modello si realizza affrontando sia sul piano generale che nello specifico territoriale questioni connesse, da una parte con la conoscenza del territorio e con i meccanismi di utilizzo delle sue risorse e, dall'altra, con lo sviluppo di tecnologie per la produzione e l'uso ambientalmente sostenibile dell'energia.

Tra le modalità di intervento dell'ENEA si sottolineano:

- la realizzazione di studi sul sistema energetico e ambientale nazionale e il monitoraggio dei processi in atto attraverso l'analisi di indicatori utili per la valutazione delle politiche e misure adottate, la realizzazione di scenari a supporto delle politiche di intervento pubblico;
- lo sviluppo di tecnologie e metodologie per la conoscenza e il monitoraggio del sistema energetico-ambientale, per la formulazione di programmi a scala nazionale e territoriale diretti alla mitigazione e all'adattamento agli effetti dei cambiamenti del clima, per la valutazione del potenziale energetico delle fonti rinnovabili di energia;
- la ricerca e la sperimentazione, anche di concerto con altri centri di ricerca e imprese industriali, di nuove soluzioni tecnologiche per ampliare l'offerta di *know how* a disposizione del sistema produttivo nazionale nel suo complesso;
- l'attività di supporto tecnico alla promozione di iniziative a livello territoriale, di concerto con gli enti locali, per favorire la scelta delle migliori soluzioni tecnologiche, per superare le barriere alla diffusione, stimolare le

proposte, monitorare i risultati, valutare l'andamento delle iniziative ed effettuare analisi statistiche affidabili;

- l'attività di supporto alle piccole e medie imprese attraverso i propri laboratori di prova per qualificare e certificare componenti e sistemi (in particolare i laboratori del Centro di Ricerca della Trisaia per i dispositivi solari a bassa temperatura e per la produzione di energia dalle biomasse, del Centro di Ricerca di Portici per i componenti fotovoltaici e del Centro di Ricerca di Saluggia per la qualificazione di dispositivi per il riscaldamento a biomasse).

E' importante sottolineare che le fonti rinnovabili, con la loro caratteristica di ampia diffusione sul territorio, possono accrescere significativamente il loro contributo al bilancio energetico del Paese nell'ambito dei cosiddetti "distretti energetici territoriali".

In questa ottica assume particolare importanza lo sviluppo di piattaforme software di simulazione ed ottimizzazione per la progettazione e gestione di reti che permettano di accoppiare in modo efficace ed efficiente le sorgenti e le utenze energetiche in uno specifico ambito territoriale, in particolare per lo sviluppo della generazione distribuita di energia elettrica.

Per informazioni:

[carlo.manna@sede.enea.it](mailto:carlo.manna@sede.enea.it)

## Bibliografia

IPCC, *Climate Change 2001: The scientific basis*.

*Dati statistici Italia 2004*, GRTN 2005.

*Renewables Information 2005*, IEA 2005.

*World Energy, Technology and climate policy Outlook*, WETO - CE 2003.

*Lo sviluppo delle rinnovabili in Italia tra necessità e opportunità*, ENEA 2005.

*Rapporto Energia e Ambiente*, ENEA 2005.

# Cicli termochimici di idrolisi per la produzione di idrogeno

L'applicazione intensiva dell'idrogeno come vettore energetico porta in primo piano i processi di produzione alimentati da fonti energetiche rinnovabili e alternative. Tra i processi più promettenti, i cicli termochimici di idrolisi costituiscono una risposta sostenibile per la produzione di idrogeno da acqua

**ALBERTO GIACONIA  
PIETRO TARQUINI  
MAURO VIGNOLINI**

**ENEA**  
Grande Progetto Solare  
Termodinamico

*Tratto da:* ENERGIA, AMBIENTE E INNOVAZIONE 3/06

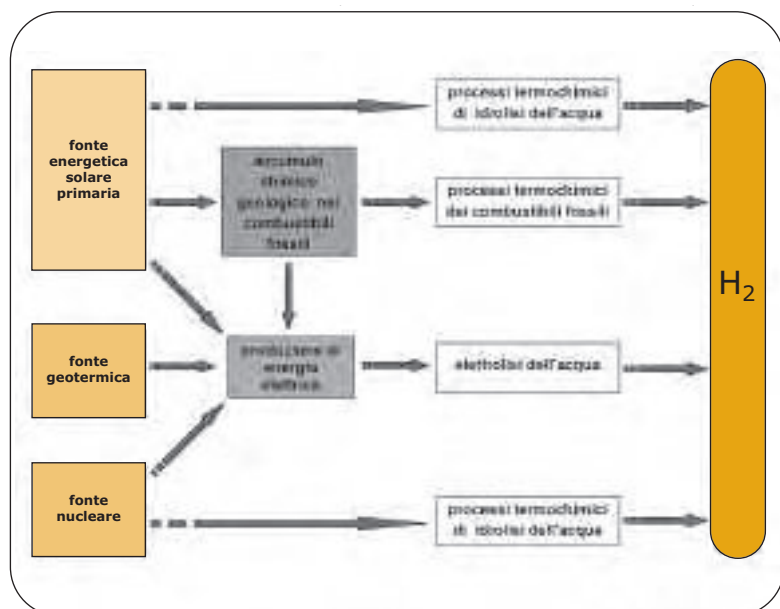
L'idrogeno, così come molti derivati idrocarburici del petrolio, presenta la duplice veste di intermedio nell'industria chimica, e di vettore energetico. Come reagente chimico su larga scala va ricordato il suo ampio utilizzo nella produzione di metanolo e ammoniaca (a loro volta precursori per la sintesi industriale di una vastissima quantità di prodotti utilizzati su larga scala) oltre che in molte applicazioni di raffineria, quali la desolforazione di cariche fossili, l'idrogenazione di idrocarburi insaturi (ad esempio per aumentare la qualità delle benzine), la *cracking* di idrocarburi superiori (*hydrocracking* o *hydrotreating*), i processi Fischer-Tropsch (conversione di gas di sintesi in idrocarburi liquidi), idroformilazioni ecc. Come vettore energetico può essere invece utilizzato in motori a combustione interna, per la propulsione aerospaziale, per la produzione di energia elettrica in fuel cell (FC) o in turbine a gas e, infine, come combustibile per riscaldamento nel campo commerciale, residenziale o industriale.

A differenza dei combustibili fossili (petrolio, gas naturale, carbone) e dell'uranio, l'idrogeno molecolare ( $H_2$ ) non si presenta in natura in quantità tale da essere estratto e trattato: non può pertanto essere definito come una "fonte energetica primaria",

ma piuttosto come "vettore energetico", ovvero un mezzo di accumulo e di trasporto dell'energia. Dovrà pertanto essere prodotto mediante un processo di conversione energetica, partendo da una "materia prima" (acqua o idrocarburi) e utilizzando una "fonte energetica", espressione con la quale s'intende il calore generato dalla combustione di un fossile o da un processo di decadimento nucleare o dalla radiazione solare, l'energia meccanica del vento, idraulica ecc. L'idrogeno sarà poi trasportato e/o stoccato nello stato fisico e nelle condizioni più convenienti (liquido, gas compresso, "immerso" in una matrice solida ecc.), per poi rilasciare la propria energia (chimica) presso un utilizzatore (figura 1).

Sebbene l'utilizzo dell'idrogeno come reagente nell'industria chimica sia una prassi consolidata, la sua applicazione intensiva come vettore energetico è ancora in una fase di sviluppo. Chiameremo "sistema idrogeno" integrato un sistema energetico basato essenzialmente sulla produzione di  $H_2$  come tale, e sul suo successivo impiego intensivo come vettore energetico (stoccaggio-distribuzione-utilizzo). Differentemente, il sistema energetico attuale è basato principalmente sull'utilizzo intensivo del gas naturale e dei derivati idrocarburici del petrolio. Il passaggio a un "sistema idrogeno" è principalmente motivato dalla necessità di eliminare la dipendenza del sistema energetico attuale dalle fonti fossili e di minimizzare le emissioni di  $CO_2$  (gas serra). In questa prospettiva risulta prioritario definire e sviluppare le tecnologie più efficienti per la produzione di idrogeno da fonti alternative (non fossili), sfruttando quindi come materia prima l'acqua e, quale fonte energetica, il nucleare oppure, meglio ancora, le energie rinnovabili, le quali permettono di ridurre al minimo le perturbazioni indotte sull'ambiente. Al livello dell'utilizzatore, inoltre, ulteriori benefici dell'utilizzo di idrogeno consistono

**Figura 1**  
Fonti primarie e processi per la produzione di idrogeno



nell'eliminazione delle emissioni di CO, composti organici cancerogeni (come il benzene), polveri sottili ed NO<sub>x</sub> (questo ultimo nel caso di combustione in fuel cell), causa di varie patologie nei centri urbani più densamente popolati.

Per i prossimi decenni si ipotizza pertanto una graduale trasformazione del sistema energetico attraverso una fase di transizione caratterizzata dalla riduzione del consumo di fossili, ottimizzando l'efficienza dei processi di conversione ad idrogeno e il co-utilizzo di fonti alternative. Durante questa fase si potranno anche sviluppare le infrastrutture necessarie (sistemi di stoccaggio, distribuzione e utilizzo) per il futuro "sistema idrogeno". Tale fase di transizione sarà quindi tanto più rapida quanto più velocemente si arriverà a dare una risposta ad alcune questioni tecnologiche ancora aperte, tra cui l'ottimizzazione delle prestazioni dei sistemi a cella a combustibile (costi, efficienza, affidabilità, vita utile), la definizione delle tecnologie più idonee (in termini di sicurezza e costi) per la distribuzione e lo stoccaggio (soprattutto per le applicazioni non stazionarie). Tuttavia, le esternalità positive che deriverebbero da una tale trasformazione del sistema energetico potranno concretizzarsi solo nel caso di produzione di idrogeno da cariche non fossili (alternative). Occorre pertanto analizzare tutte le tecnologie per la produzione disponibili al fine di individuare e sviluppare quelle più promettenti per una applicazione sostenibile su larga scala per il medio e lungo termine.

In tabella 1 sono riportate le proprietà chimico-fisiche caratteristiche dell'idrogeno. Come si può osservare, l'idrogeno può essere stoccato allo stato liquido a  $T < -240\text{ °C}$  e  $p > 13,2\text{ bar}$ , oppure come gas compresso a temperatura ambiente e pressioni sufficientemente elevate ( $> 50\text{ bar}$ ) per massimizzarne la densità e, quindi, la capacità di stoccaggio. Rispetto agli altri composti allo stato gassoso o liquido, presenta densità circa 1-2 ordini di grandezza inferiori: infatti, come gas a  $0\text{ °C}$  e  $1\text{ bar}$  ha densità di circa  $0,09\text{ kg/m}^3$ , mentre come liquido bollente a  $-253\text{ °C}$  e  $1\text{ bar}$  ha densità di circa  $71\text{ kg/m}^3$ .

## Produzione di idrogeno

Attualmente nel mondo sono prodotte ogni anno circa 45 milioni di tonnellate di idrogeno (8 milioni di tonnellate/anno solo nell'Unione Europea), corrispondenti a circa il 2% della domanda energetica globale<sup>1</sup>. Poiché la domanda di idrogeno è destinata a raddoppiare già nei prossimi 10 anni e, soprattutto, nella prospettiva di un sistema energetico integrato basato sull'idrogeno da applicarsi nel lungo termine ( $> 30\text{ anni}$ ), occorre considerare tutte le possibili opzioni di processo per la sua produzione, valutando tutti i possibili impatti a livello sociale, politico, economico e ambientale.

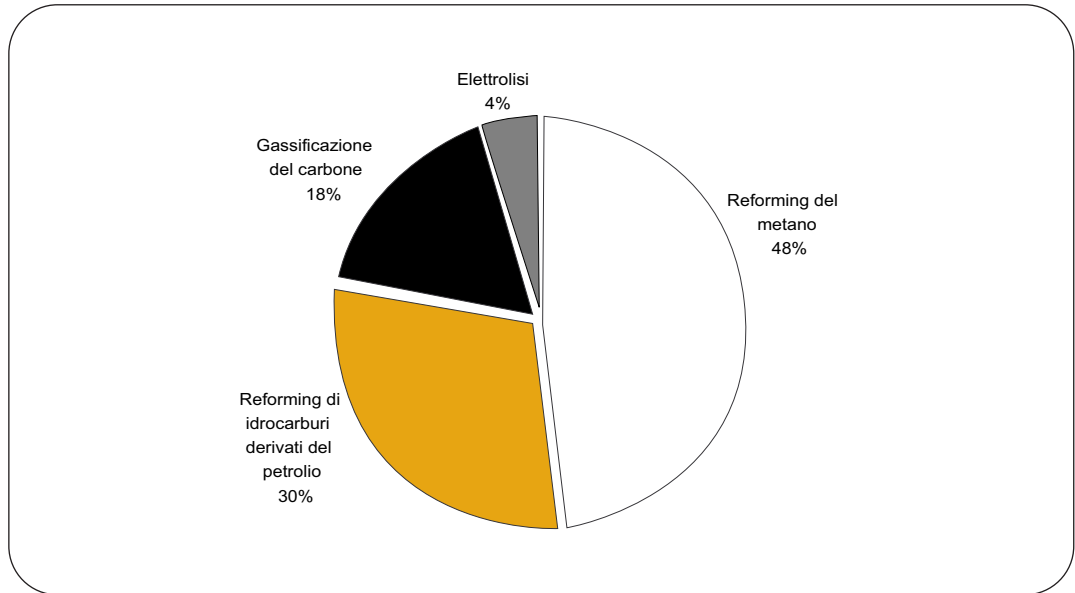
Circa il 96 % dell'idrogeno è attualmente prodotto con processi basati su fonti fossili, mentre il restante 4% è prodotto dall'elettrolisi (anche se non è espressamen-

**Tabella 1 - Proprietà chimico-fisiche dell'idrogeno**

|                                    |                        |
|------------------------------------|------------------------|
| Peso molecolare                    | 2,016 g/mole           |
| Temperatura di fusione (1 bar)     | - 259°C                |
| Temperatura di ebollizione (1 bar) | - 253°C                |
| Punto Critico                      | - 240°C, 13,2 bar      |
| Densità gas (0 °C, 1 bar)          | 0,09 kg/m <sup>3</sup> |
| Densità liquido (-253 °C, 1 bar)   | 71 kg/m <sup>3</sup>   |
| Potere Calorifico Superiore (PCS)  | 286 kJ/mol             |
| Potere Calorifico Inferiore (PCI)  | 242 kJ/mol             |

**Figura 2**

Attuale distribuzione dei metodi di produzione di idrogeno



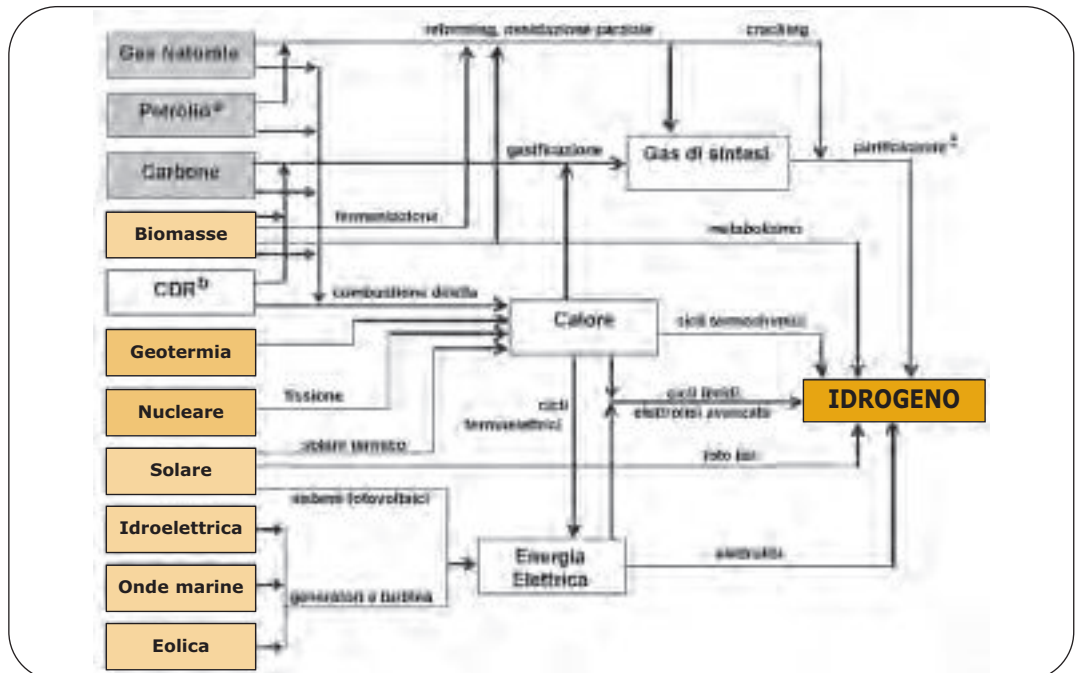
te indicata la fonte primaria per la generazione di energia elettrica)(figura 2). Tuttavia, come schematizzato in figura 3, esistono molteplici processi per la produzione di idrogeno da diverse fonti primarie. Alcuni di questi hanno già trovato un'ampia applicazione a livello industriale (reforming del gas naturale e di idrocarburi superiori, gassificazione del carbone, elettrolisi convenzionale), mentre altri si trovano ancora in una fase di ricer-

ca e sviluppo, con lo studio della fattibilità tecnologica in impianti dimostrativi su scala pilota (ad esempio per i processi di gassificazione di biomasse), oppure ancora in indagini preliminari di laboratorio finalizzate alla dimostrazione di fattibilità scientifica (ad esempio per la fotolisi solare).

Avendo a che fare con processi di conversione di energia, un parametro caratteristico significativo è l'efficienza ener-

**Figura 3**

Possibili processi per la produzione di idrogeno: [a) derivati da raffinazione (gas di raffineria, GPL, idrocarburi leggeri, olii pesanti, coke); b) Combustibile da Rifiuto (CDR); c) separazione di idrogeno dai co-prodotti (ossidi di carbonio, residui carboniosi ecc.), oppure sintesi di vettori chimici dell'idrogeno (metanolo o ammoniaca)]





tica (o di primo principio, detta anche efficienza termica): si tratta del consumo specifico di energia primaria riferita all'energia specifica dell'idrogeno prodotto in termini di potere calorifico.

Se  $Q_1$  e  $W_1$  sono i contributi di calore e lavoro direttamente apportati dalla fonte energetica primaria per la produzione di 1 mole di idrogeno e  $PCSH_2$  il potere calorifico superiore dell'idrogeno stesso (285,9 kJ/mole) si può pertanto porre:

$$\eta_{CH} = \frac{PCSH_2}{\sum Q_1 + \sum W_1}$$

E' però alquanto riduttivo realizzare il confronto tra processi differenti sulla base della sola efficienza energetica.

Ha infatti senso confrontare processi di produzione di idrogeno in termini di efficienza energetica solo quando la fonte energetica primaria è la stessa (nucleare, solare ecc.). E' invece opportuno confrontare i processi in base alle emissioni specifiche di  $CO_2$  (o altri gas serra) (in kg di  $CO_2$  per kg di  $H_2$ ), l'impatto ambientale sul territorio per il processo di conversio-

ne, la disponibilità di fonti primarie e, infine, i costi specifici di produzione (in \$ per kg di  $H_2$  prodotto).

L'efficienza energetica  $\eta_{CH}$  influisce indirettamente su ognuno di tali parametri: per un dato processo, all'aumentare di  $\eta_{CH}$  si riduce l'eventuale consumo di materie prime fossili, così come la richiesta di fonti primarie, i costi di produzione e l'impatto ambientale sul territorio che ne deriva; questo ultimo aspetto può essere significativo soprattutto nel caso delle fonti energetiche rinnovabili (solare, idroelettrico, eolico ecc.) che, essendo a "densità energetica" medio-bassa (1-400 MW/km<sup>2</sup>), possono richiedere un considerevole utilizzo specifico di territorio. Come mostrato in figura 3, i processi di produzione di idrogeno possono essere classificati in base alla fonte energetica o alla materia prima utilizzata, distinguendoli in processi di derivazione fossile, da biomassa e da acqua e fonti alternative.

Un quadro riassuntivo in cui i vari processi di produzione attualmente ritenuti più convenienti vengono confrontati è mostrato nella tabella 2.

Tabella 2 - Valutazione dei processi di produzione di idrogeno

| Processo                                 | Emissioni CO <sub>2</sub> (kgCO <sub>2</sub> /kgH <sub>2</sub> ) | Disponibilità di fonti primarie    | Costi di produzione (\$/kgH <sub>2</sub> ) | Utilizzo territorio (ha/MWH <sub>2</sub> ) | Stato di sviluppo tecnologico | Riferimenti |
|--|--|------------------------------------|--|--|-------------------------------|-------------|
| SMR convenzionale                        | 8,8-14,1   | Bassa                              | 0,78 - 1,38 (1,02 - 1,76)*                 | < 1  | maturo                        | [2,7]       |
| SMR nucleare                             | 5,5  | Medio-bassa                        | 0,73 (1,32)*                               | < 1  | R&S                           | [2]         |
| SMR solare                               | 5,5  | Media                              | 1,8 - 1,9 *                                | < 2  | R&S/pilota                    | [3]         |
| Gassificazione del carbone convenzionale | 27-36  | Medio-alta                         | 1,62 (3,11)*                               | < 1  | Maturo                        | [2,7]       |
| Gassificazione del carbone solare        | 11   | Alta                               | 2,6 *                                      | < 3  | R&S/pilota                    | [4]         |
| Gassificazione di biomasse               | 0  | Bassa                              | 1,5-3,4                                    | 100-450                                    | R&S/pilota                    | [5,6]       |
| Cicli termochimici nucleare              | 0  | Alta                               | 1,5 - 2,0                                  | < 1  | R&S                           | [8]         |
| Cicli termochimici solare                | 0  | Illimitata                         | 4,7 - 7,7                                  | 1-7  | R&S                           | [9,10]      |
| Elettrolisi nucleare                     | 0  | Medio -alta                        | 5,2  | < 1  | Maturo                        | [2]         |
| Elettrolisi da solare termico            | 0  | Illimitata                         | 12 - 14                                    | 1-10                                       | Maturo                        | Stima ENEA  |
| Elettrolisi da fotovoltaico              | 0  | Illimitata                         | 15 - 32                                    | 2-15                                       | Maturo                        | [2,7]       |
| Elettrolisi idroelettrica                | 0  | Dipendente dalle condizioni locali | > 4.7                                      | 25-35                                      | Maturo                        | [2]         |
| Elettrolisi eolica                       | 0  | Dipendente dalle condizioni locali | > 10                                       | 30-40                                      | Maturo                        | Stima ENEA  |

\*costo valutato ipotizzando il sequestro quantitativo del CO<sub>2</sub> prodotto

## Produzione di idrogeno da fonti fossili

### Produzione da gas naturale e derivati del petrolio

Il processo più ampiamente consolidato per la produzione di idrogeno è il reforming con vapore del metano (SMR), consiste nelle seguenti reazioni:



(reazione di reforming catalitico, che avviene tra 800-1000 °C, con una entalpia

$$\Delta H_{298\text{ K}} = + 206 \text{ kJ/mol})$$



(reazione di *shift*, 200-450°C,

$$\Delta H_{298\text{ K}} = - 41 \text{ kJ/mol})$$

Il bilancio di massa complessivo è pertanto:



$$(\Delta H_{298\text{ K}} = + 165 \text{ kJ/mol})$$

La reazione endotermica di reforming catalitico (1) avviene in una fornace utilizzante, come combustibile, lo stesso gas naturale greggio.

La reazione di *shift* (2), permette successivamente di massimizzare la resa in idrogeno, qualora la sua produzione non sia finalizzata all'utilizzo diretto del gas di sintesi H<sub>2</sub>/CO come ad esempio nel caso della produzione del metanolo. Successivamente si opera la eventuale purificazione dell'idrogeno prodotto mediante assorbimento selettivo di CO<sub>2</sub>, CO, e delle tracce residue di CH<sub>4</sub> ed N<sub>2</sub> generalmente mediante letti a carboni attivi in cosiddette unità PSA (*Pressure Swing Adsorption*). Il sequestro quantitativo del CO<sub>2</sub> prodotto può essere realizzato mediante assorbimento selettivo e reversibile in soluzioni alcaline.

In entrambi i casi (assorbimento selettivo in PSA o soluzioni alcaline) si tratta di cicli di compressione-decompressione che incidono sensibilmente sui costi di impianto e di esercizio.

Essendo un processo industriale ormai ben consolidato, ha potuto subire nel corso degli anni una continua ottimizzazione, fino a raggiungere efficienze energetiche dell'80% per grossi impianti industriali.

La ricerca tende attualmente a minimizzare le temperature di reforming catalitico mediante adozione di nuovi catalizzatori e l'utilizzo di reattori a membrana (con membrane selettive all'idrogeno, in genere a base di palladio).

Se ipotizziamo valori di efficienza energetica dell' 80, 65, 60, 50 %, si verificano emissioni specifiche di circa 8,8, 10,9, 11,8, 14,1 kgCO<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub>, rispettivamente. Tale stima non include gli eventuali equivalenti di CO<sub>2</sub> aggiuntivi dovuti all'emissione di altri gas serra dalla fornace di reforming quali CO, CH<sub>4</sub> (da combustione imperfetta) e NO<sub>x</sub>. Per quanto riguarda la disponibilità di gas naturale, si stima che le riserve mondiali garantirebbero un approvvigionamento sicuro per i prossimi 50 anni, anche se il costo potrà presentare sensibili fluttuazioni nel tempo in relazione ai rapporti politici ed economici con i paesi produttori.

Del resto, il costo di produzione dell'idrogeno è molto sensibile a quello del NG incidendo, in relazione all' efficienza energetica del processo, per circa il 30-50% dei costi totali di produzione; il costo di produzione aumenta poi di circa il 30% nel caso di sequestro e confinamento del CO<sub>2</sub> (tabella 2).

L'idrogeno può essere prodotto dal metano anche mediante processi di *cracking* (mediante processo termico o al plasma) oppure di ossidazione parziale (processo autotermico).

Nel caso del *cracking*, in particolare, si ha la formazione di *carbon black* (solido), che può rappresentare un co-prodotto di considerevole valore e permette altresì un semplice sistema di sequestro del CO<sub>2</sub> prodotto. Entrambi i processi (*cracking* e ossidazione parziale) risultano però meno convenienti dello SMR conven-

zionale in termini di emissioni specifiche di CO<sub>2</sub> e/o di costi di produzione.

Gli idrocarburi più pesanti del metano (derivati dal petrolio) presentano rapporti H/C sempre minori all'aumentare del peso molecolare, per cui determinano emissioni specifiche di CO<sub>2</sub> superiori rispetto allo SMR, qualunque sia il processo di conversione di riferimento (reforming, cracking, ossidazione parziale).

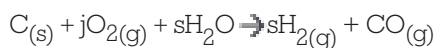
Considerando che la capacità di approvvigionamento del petrolio greggio per il medio-lungo termine (> 30 anni) è ritenuta inferiore rispetto a quella del gas naturale, si può concludere che non è giustificabile la produzione di idrogeno su larga scala da oli idrocarburi superiori. Tuttavia, come mostrato in figura 2, gli oli idrocarburi di derivazione petrolchimica rappresentano ancora oggi la seconda fonte primaria per la produzione di idrogeno: si tratta infatti di processi di raffinazione che vedono l'idrogeno come co-prodotto di operazioni finalizzate alla deidrogenazione di cariche idrocarburi, ad esempio per la produzione di olefine. Si può pertanto concludere che il *reforming* del gas naturale con vapore rappresenta il metodo più conveniente per la produzione di idrogeno da idrocarburi (NG o derivati del petrolio) sia in termini di emissioni di GHG che di disponibilità di fonti e costi di produzione.

La produzione di idrogeno da derivati del petrolio può invece avvenire in processi di raffinazione (ad esempio impianti di deidrogenazione per la produzione di olefine) in cui l'idrogeno figura come co-prodotto di rilevante valore aggiunto.

## Gassificazione di solidi carboniosi

Come mostrato in figura 2, circa il 18% della produzione mondiale di idrogeno utilizza, come materia prima, il carbone mediante processi di gassificazione. In generale, la gassificazione di un composto carbonioso (carbone o petcoke) con vapore e ossigeno avviene secondo una

serie di reazioni contestuali (reazioni gas-solido, in fase gassosa omogenea e di pirólisi) il cui effetto complessivo può essere rappresentato nel seguente modo\*:



$$(s = 1 - 2j)$$

In pratica, il substrato solido carbonioso (C<sub>(s)</sub>) agisce da riducente nei confronti dell'H<sub>2</sub>O, mentre l'O<sub>2</sub> consente l'ossidazione parziale del substrato stesso per fornire il calore di reazione.

Il processo avviene essenzialmente in un gassificatore (a letto trascinato, a letto fluido, oppure a letto mobile), a combustione interna (autotermico) o esterna, operante a 750-1500 °C, seguito da unità di purificazione ed, eventualmente, dal reattore di *shift*. Poiché le materie prime sono in genere ricche di composti solforati (fino al 5 % in peso), è prevista una unità di desolforazione e recupero dello zolfo, che rappresenta un co-prodotto con discreto valore commerciale.

La miscela gassosa prodotta è poi inviata ad un impianto di purificazione dell'idrogeno e di confinamento del CO<sub>2</sub> (assorbimento selettivo in PSA e soluzioni alcaline). E' generalmente prevista anche la co-generazione di energia elettrica.

Le efficienze energetiche stimate per la gassificazione del carbone sono dell'ordine del 45-60 %.

Ne conseguono però rilevanti emissioni di CO<sub>2</sub> che, a seconda dell'efficienza energetica, sono dell'ordine di 27-36 kg CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>: l'eventuale applicazione intensiva del processo richiederà quindi di affiancare il gassificatore con una efficiente unità di abbattimento (sequestro) e confinamento del CO<sub>2</sub> prodotto.

Di contro, rispetto alle altre fonti fossili, il carbone presenta una maggiore capacità di approvvigionamento e disponibilità: si tratta del fossile più omogeneamente distribuito nel sottosuolo terrestre, con riserve mondiali che garantirebbero un approvvigionamento sicuro per i prossimi 200 anni.

\* nel seguito lo stato fisico dei composti viene indicato con l=liquido g=gassoso s=solido.

## Processi ibridi di produzione da fonti fossili/alternative

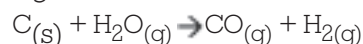
Al fine di minimizzare l'utilizzo di fonti fossili e, quindi, le emissioni di gas serra e i problemi di approvvigionamento delle fonti primarie, la tendenza attuale è quella di massimizzare le efficienze energetiche di conversione e, nel contempo, di sviluppare "processi ibridi" risultanti dall'integrazione di fonti fossili con fonti energetiche alternative (nucleare, rinnovabili).

I processi convenzionali di reforming del metano (SMR) e gassificazione di materiali carboniosi richiedono, infatti, un apporto termico a spese di una frazione della stessa carica idrocarburica di partenza, che potrebbe essere fornito da una fonte termica alternativa, di origine nucleare o solare.

Fornendo il calore di processo dello SMR con una fonte alternativa (non fossile), le emissioni specifiche di CO<sub>2</sub> sarebbero esclusivamente quelle ricavabili dalla stechiometria di reazione, ovvero circa 5,5 kg CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>, corrispondente quindi a una riduzione del 38-50% di emissioni di gas serra su impianti su larga scala ( $\eta_{\text{carica}} = 65-80\%$ ). Una prima opzione consiste quindi nell'utilizzare il calore di un reattore nucleare (tipo AGR, HTGR, MSCR): si stima per tale processo un costo di produzione industriale dello stesso ordine di grandezza del processo convenzionale<sup>2</sup> (tabella 2).

Lo SMR può anche essere alimentato da un impianto solare termico (a concentrazione). Anche in tal caso, l'accoppiamento dello SMR con la fonte energetica alternativa permetterebbe di ottenere costi di produzione dello stesso ordine di grandezza del processo convenzionale, ma con emissioni di CO<sub>2</sub> sensibilmente inferiori<sup>3</sup> (tabella 2). L'interesse verso lo SMR solare è dimostrato ad esempio dal progetto europeo SOLREF, recentemente finanziato con circa 3,8 M€ per la realizzazione di un impianto a torre solare su scala pilota in una regione dell'Italia meridionale<sup>3</sup>.

Anche nel caso della gassificazione di materiali carboniosi è stata concepita una versione "solare", realizzando quindi il processo con il solo vapore e in assenza di ossigeno:

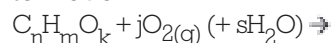


$$(\Delta H_{298\text{ K}} = +175 \text{ kJ/mol})$$

In particolare, è stata già studiata su un impianto sperimentale la gassificazione del petcoke su un reattore solare a cavità<sup>4</sup>. In tal caso le emissioni specifiche di CO<sub>2</sub> potranno ridursi da 27-36 a 12-13 kg CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>.

## Gassificazione di biomasse e CDR

Il processo di gassificazione delle biomasse può essere rappresentato nel seguente modo:



$$(m/2+s)H_{2(g)} + (k+s+2j)CO_{(g)} + (n-k-s-2j)C_{(s)}$$

dove C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>O<sub>k</sub> è una formula che indica la composizione generica di una biomassa (comunemente risulta n/m/k = 6/10/5).

Trattandosi della gassificazione di un solido, il processo è sotto molti aspetti simile alla gassificazione di materiali carboniosi.

A differenza di questi ultimi, poiché la biomassa contiene già dell'idrogeno legato chimicamente alla matrice solida, oltre presentare un certo contenuto di acqua, non è sempre necessario alimentare il gassificatore con il vapore (agente di gassificazione nel caso dei composti carboniosi), realizzando così una vera e propria pirolisi del materiale (s = 0). In ogni caso, il prodotto consiste sempre di una miscela gassosa di gas di sintesi (H<sub>2</sub>/CO) e del solido carbonioso.

Tali prodotti possono poi essere interessati (nello stesso gassificatore) alle stesse reazioni chimiche della gassificazione di materiali carboniosi.

Il gassificatore opera a 650-850 °C e la composizione del gas prodotto dipende essenzialmente, oltre che dalla temperatura, dalla quantità di agente gassificante introdotta e dalla composizione della bio-

massa, in particolare dal suo contenuto di umidità. Si può poi realizzare la reazione di *shift* (per massimizzare la resa in idrogeno) e le operazioni di purificazione.

Come nel caso della gassificazione dei materiali carboniosi, anche in quello della biomassa è prevista in genere la co-generazione di energia elettrica<sup>5,6</sup>. L'efficienza energetica di tali processi è dell'ordine del 45-50%, mentre le emissioni di CO<sub>2</sub> possono considerarsi nulle: assumendo infatti di utilizzare quale materia prima la biomassa coltivata, le emissioni di CO<sub>2</sub> sarebbero equivalenti a quanto precedentemente "catturato" dall'atmosfera durante il periodo di vita della pianta; si parla pertanto di "CO<sub>2</sub> neutro" in quanto la sua emissione non altera il relativo bilancio di massa globale nell'atmosfera.

I maggiori limiti dei processi di gassificazione delle biomasse riguardano la capacità di approvvigionamento di materia prima e l'elevato utilizzo del territorio per unità di massa di idrogeno prodotto. La fonte energetica primaria di partenza è, infatti, la radiazione solare la quale, oltre ad essere una fonte a media densità energetica (intensità media dell'ordine di 100-350 MW/km<sup>2</sup>), presenta una efficienza di conversione in potere calorifico superiore della biomassa prodotta dell'ordine dello 0,5%; ne consegue un utilizzo del territorio dell'ordine di 100-450 ha/MWH<sub>2</sub>, ovvero di almeno un ordine di grandezza superiore rispetto ad altri processi basati sull'utilizzo di altre fonti (fossili, nucleare, solare, eolico ecc.), come mostrato in tabella 2. Inoltre, sebbene si tratti di una fonte rinnovabile, sono pochi i paesi dotati di elevate disponibilità di biomasse, mentre gli eventuali costi di trasporto sarebbero eccessivi: si ritiene pertanto che il processo di gassificazione si applichi a biomasse da scarti di lavorazioni dell'industria, di residui forestali o del settore agro-zootecnico, ovvero, in generale, di combustibili da rifiuto (CDR), comprendenti anche rifiuti solidi termovalorizzabili tra cui le materie plastiche.

## Produzione di idrogeno da acqua e fonti energetiche alternative

Al fine di svincolare la produzione di idrogeno dalla fonte fossile, si cercano fonti alternative più "sicure" e il cui impiego determini un modesto impatto ambientale. Poiché l'acqua risulta l'unica materia prima per la produzione di idrogeno che presenta tali caratteristiche, si considerano le varie opzioni per la sua dissociazione (in H<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>) utilizzando fonti energetiche alternative.

Un primo processo per la produzione di idrogeno da acqua e fonte solare è stato in effetti già considerato: si tratta della gassificazione delle biomasse, il cui unico effetto complessivo è la scissione dell'acqua mediante utilizzo della radiazione solare (mediante il processo fotosintetico il CO<sub>2</sub> atmosferico viene prima fissato sotto forma di C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>O<sub>k</sub> e poi rilasciato nella gassificazione).

La dissociazione termica diretta dell'acqua (termolisi diretta) consiste nella seguente reazione:



$$(\Delta H_{298 \text{ K}} = \Delta H^0 = + 242 \text{ kJ/mol, e}$$

$$\Delta S_{298 \text{ K}} = \Delta S^0 = + 0,045 \text{ kJ/molK})$$

oppure (con H<sub>2</sub>O reagente in fase liquida a 298 K):



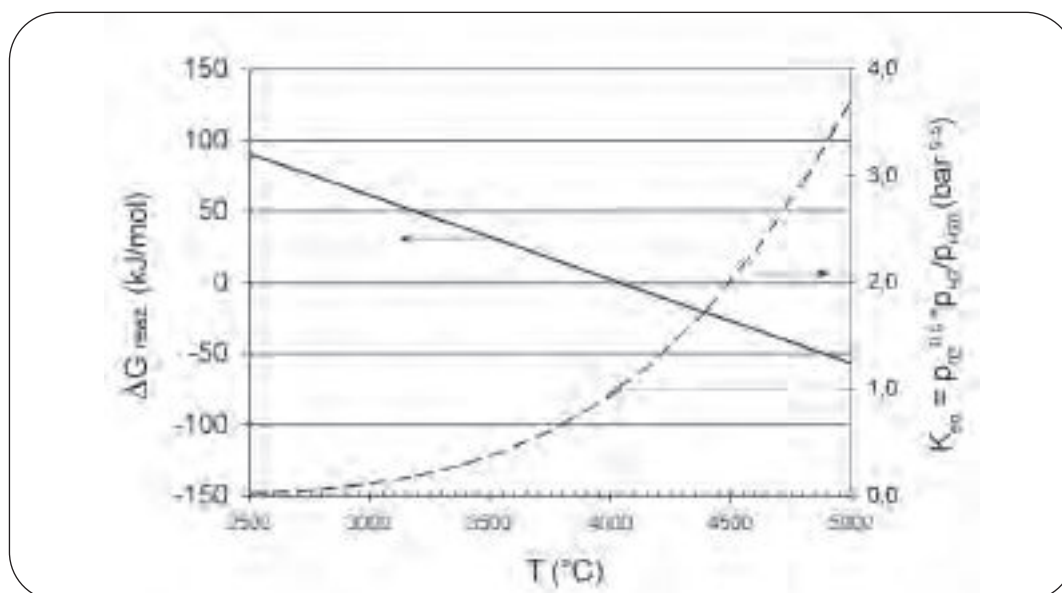
$$(\Delta H_{298 \text{ K}} = \Delta H^0 = + 286 \text{ kJ/mol,}$$

$$\Delta S_{298 \text{ K}} = \Delta S^0 = + 0,163 \text{ kJ/molK})$$

In figura 4 sono mostrati i profili dell'energia libera di Gibbs ( $\Delta G$ ) e della costante di equilibrio di idrolisi ( $K_{\text{eq}}$ ) alle varie temperature. Si può quindi osservare che il  $\Delta G$  reazione si annulla a circa 4040 °C, condizioni in cui si ottiene una conversione dell'acqua leggermente superiore al 50%, mentre potremo ottenere una conversione superiore al 10% solo operando a temperature ben superiori ai 2000 °C, condizioni poco favorevoli per la generazione su larga scala.



**Figura 4**  
Termodinamica della  
termolisi dell'acqua



Infatti, in primo luogo, tra le fonti alternative solo il solare termico con elevati fattori di concentrazione permetterebbe il raggiungimento di tali temperature, a meno di utilizzare poco efficienti processi di conversione elettrica. Sarebbe inoltre necessario l'impiego di materiali refrattari speciali in grado di sopportare gli elevati stress termici e l'aggressività dei componenti gassosi ad alta temperatura.

Infine la separazione dei prodotti ( $H_2/O_2$ ) dovrebbe avvenire ad alta temperatura per impedirne la ricombinazione durante il raffreddamento, con conseguente necessità di utilizzo di materiali selettivi (membrane) speciali, non ancora sviluppati.

Dal punto di vista tecnologico sono invece realizzabili i seguenti processi di idrolisi da fonti alternative a temperature accessibili:

- elettrolisi alcalina convenzionale o ad alta temperatura (HTE), con elettricità generata da fonti rinnovabili di origine meccanica (eolico, idroelettrico), solare fotovoltaico, solare-termico, nucleare;
- cicli termochimici (o termolisi indiretta), puri o ibridi da nucleare o solare-termico;
- fotolisi solare;
- processi fotoelettrochimici;
- biotecnologie.

## Processi di elettrolisi

Tra i processi sopra elencati, solo l'elettrolisi convenzionale (a bassa temperatura) ha raggiunto un grado avanzato di maturazione per la sua applicazione su scala industriale.

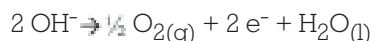
Contrariamente alla termolisi diretta, abbiamo un contributo di "lavoro utile" sotto forma di lavoro elettrico  $W_{el}$  per compensare il valore positivo del  $\Delta G$  di reazione a  $T$  prossime alla temperatura ambiente.

Il processo consiste essenzialmente nelle seguenti semireazioni elettrochimiche:

catodo:



anodo:



Tra i 2 comparti elettrochimici (anodo e catodo) si interpone una membrana porosa che consente la migrazione degli anioni  $OH^-$  ma impedisce la migrazione dei prodotti di reazione ( $H_2$  e  $O_2$ ) tra gli stessi comparti. La tensione teorica di cella è di 1,23 V, ma a causa delle sovratensioni si opera a 1,8-2,2 V, con un consumo elettrico di 4,5-5,5 kWh per  $m^3$  di  $H_2$  prodotto (in condizioni normali di temperatura e pressione). Ne risulta un  $H_2$  molto puro (> 99,99%), ed è proprio per l'elevata purezza del prodot-



to che giustifica l'adozione dell'elettrolisi su larga scala a livello industriale.

L'efficienza del solo processo di elettrolisi (conversione di energia elettrica in potere calorifico superiore dell'idrogeno) è del 65-75%. Tuttavia, per stimare l'efficienza termica effettiva del processo e le emissioni specifiche di CO<sub>2</sub> occorre riferirsi a un processo di generazione di energia elettrica. Così, ad esempio, se consideriamo i valori medi delle reti elettriche Europee (maggiore utilizzo di fonti fossili), avremo emissioni specifiche di CO<sub>2</sub> che vanno da 4 kg CO<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub> (per paesi a più elevato sviluppo nucleare), fino a 20-22 kg CO<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub> (Unione Europea).

Poiché la conversione energetica calore-elettricità comporta una perdita di rendimento del processo, si cerca sempre di limitare l'utilizzo di energia elettrica nei processi chimici.

A tal fine, una prima possibilità consiste nel realizzare l'elettrolisi a temperature più elevate (fino 800 °C) nelle cosiddette elettrolisi avanzate (HTE). Operare a temperature più elevate consente infatti, in primo luogo, di ridurre il contributo termodinamico del lavoro elettrico. Assumendo, in prima approssimazione, che  $\Delta H$  e  $\Delta S$  di reazione siano invarianti con la temperatura ( $\Delta H = \Delta H_{298K} = \Delta H^0$ ,  $\Delta S = \Delta S_{298K} = \Delta S^0$ , ipotesi lecita soprattutto per il  $\Delta H$ , meno lecita per il  $\Delta S$ ), possiamo porre:

$$\Delta H^0 = W_{el} + T \cdot \Delta S^0 \quad (\text{eq. 2}).$$

Pertanto, all'aumentare di T diminuisce il contributo termodinamico del lavoro elettrico ( $W_{el}$ ) rispetto al calore reversibile di reazione ( $T \cdot \Delta S^0$ ). Inoltre, all'aumentare di T si riducono le sovratensioni di elettrodo e di cella, mentre, di contro, divengono critici i problemi di tenuta dei materiali sia per il maggiore potere corrosivo dell'elettrolita, sia per ragioni meccaniche nel caso di elettrodizzatori pressurizzati.

Un primo miglioramento rispetto all'elettrolisi convenzionale consiste nell'idrolizzare l'acqua sempre allo stato liquido ma a 200-300 °C, in elettrodizzatori pressurizzati fino 20-100 bar. Temperature operative

ancora più elevate (fino 550 °C) sono realizzabili utilizzando sali fusi come mezzo elettrolitico in presenza di tracce di H<sub>2</sub>O disciolte. E' infine possibile realizzare l'elettrolisi avanzata utilizzando, come mezzo elettrolitico, elettroliti solidi a conduzione ionica: si tratta in genere di ossidi ceramici con elementi droganti per massimizzare la conducibilità, in grado di operare a 700-1100 °C. Come accennato, i processi di elettrolisi sono generalmente considerati poco economici a causa delle modeste efficienze energetiche di conversione dell'energia termica della fonte primaria in energia elettrica.

Anche oggi, nonostante i recenti sviluppi dei reattori nucleari che permetterebbero la generazione elettrica con rese più elevate (fino al 55%), si ritiene che il contributo di lavoro elettrico sia da minimizzare anche per le problematiche legate alla sovratensione di cella ed elettrodica, che comportano un ulteriore incremento del lavoro elettrico richiesto rispetto a quello ideale ( $W_{el}$ ). I processi di produzione di idrogeno da elettrolisi a partire da fonti rinnovabili risultano, come nel caso del fotovoltaico, particolarmente costosi (tabella 2) e vengono in genere concepiti come metodi per lo stoccaggio di energia più che come metodi di produzione di idrogeno per la distribuzione.

## Cicli termochimici

Particolarmente interessante risulta la possibilità di realizzare l'idrolisi utilizzando, in principio, esclusivamente calore ( $W_{el} = 0$ ) a temperature convenienti e accessibili con le tecnologie disponibili, mediante cicli termochimici (termolisi indiretta). I cicli termochimici di idrolisi consistono in una sequenza di (N) reazioni chimiche il cui effetto complessivo è la dissociazione dell'acqua in idrogeno e ossigeno: grazie alla formazione di opportuni intermedi ( $M_i$ ) si realizza l'idrolisi a temperature inferiori rispetto a quelle di termolisi diretta (> 4000 °C) e, in teoria, senza contributi di lavoro elettrico ( $W_{el} = 0$ ).

In generale, per ogni singola reazione (i) del ciclo termochimico, assunta isoterma alla temperatura  $T_i$ , il lavoro apportato sul sistema di reazione ( $W_i$ ) eguaglia l'energia libera di Gibbs secondo la seguente relazione:

$$W_i = \Delta G_i = \Delta H_i - T_i \cdot \Delta S_i$$

Pertanto, dato un ciclo termochimico costituito da N reazioni (i) isoterme alla  $T_i$ , il lavoro e il calore totale da fornire saranno dati dalla somma dei contributi dei singoli stadi del processo (assumendo in via esemplificativa che  $\Delta H_i$  e  $\Delta S_i$  siano invarianti con la temperatura):

$$W_{tot} = \sum_{i=1}^N [\Delta G_{i,298K} - (T_i - 298K) \Delta S_i^0]$$

$$\Delta H_{tot} = \sum_{i=1}^N T_i \cdot \Delta S_i^0$$

$$Q_{tot} = \sum_{i=1}^N T_i \cdot \Delta S_i^0$$

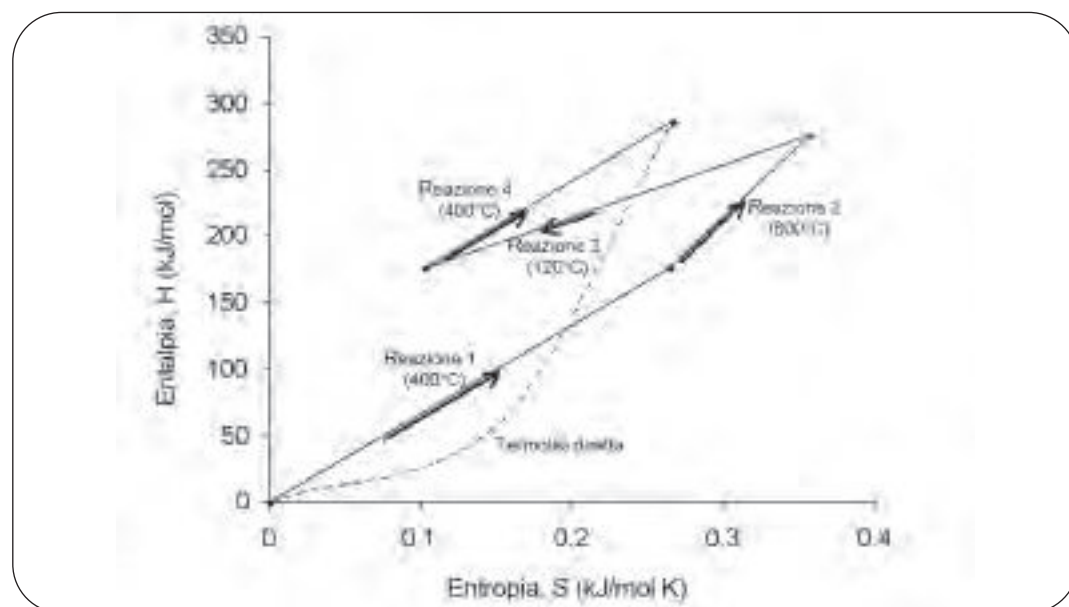
Si può subito osservare che, se per la generica reazione (i) componente il ciclo risulta  $\Delta S_i^0 > 0$ , allora all'aumentare di  $T_i$  diminuisce il lavoro da apportare nel processo termochimico.

Pertanto, mentre nella termolisi diretta (unico stadio,  $N = 1$ ,  $\Delta S^0 = +0,163 \text{ kJ/molK}$ ) è possibile minimizzare il lavoro richiesto esclusivamente aumentando la temperatura (T) di processo (questo è, appunto, il

principio dell'elettrolisi avanzata), nel caso dei cicli termochimici è possibile minimizzare il lavoro ( $W_{tot}$ ) anche selezionando opportunamente le N reazioni che compongono il processo, contenendo così anche le temperature  $T_i$  entro limiti accettabili per le attuali tecnologie disponibili (solare, nucleare, geotermico, ecc.). Affinché ciò sia realizzabile, in base alla eq.2 è necessario che esistano stadi i in cui si realizzino salti entropici  $\Delta S_i^0 > 0$  sufficientemente elevati: in altre parole, quindi, i cicli termochimici permettono di intervenire non solo sulle temperature e/o sui contributi di lavoro da apportare al sistema, ma anche sulla selezione degli N stadi del processo con gli adeguati valori di  $\Delta S_i^0$ .

Tali considerazioni risultano più chiare seguendo il processo termodinamico su un diagramma di Mollier come mostrato in figura 5, dove il cammino termodinamico di un processo termochimico viene confrontato con un processo di termoidrolisi in un singolo stadio: in tale schema semplificato si può osservare come le pendenze (quindi le temperature) delle linee degli stadi del ciclo termochimico sono meno elevate di quelle messe in gioco in un processo di termoidrolisi diretta. Ad oggi, sono stati concepiti e studiati più di 200 cicli termochimici: per la maggior parte di essi lo studio ha riguardato sol-

**Figura 5**  
Cicli termochimici su diagramma di Mollier



tanto una attività teorica più o meno approfondita, e solo pochi sono stati sottoposti a una analisi di fattibilità scientifica in laboratorio. Resta quindi questo ancora un campo tanto promettente per una applicazione futura su larga scala, quanto inesplorato.

In tabella 3 sono illustrati i cicli termochimici ad oggi maggiormente studiati.

Tra questi, merita di essere richiamato il processo zolfo-iodio, che è stato sviluppato fino a una dimostrazione del ciclo chiuso in laboratorio (produzione di circa 30 l/h di idrogeno in continuo per una settimana), e per il quale è prevista la implementazione su scala pilota per i prossimi anni (entro il 2010) presso il JAEA in Giappone; per applicazioni solari è anche promettente il ciclo alle ferriti, in corso di sperimentazione nell'ambito del programma comunitario HYDROSOL.

Di fatto, affinché l'adozione di un ciclo termochimico sia giustificabile è necessario che l'efficienza energetica dell'intero processo sia superiore a quella prevista per l'elettrolisi a partire dalla stessa fonte energetica primaria. Una stima preliminare dell'efficienza energetica di un ciclo termochimico è realizzabile considerando il pro-

cesso termodinamico "ideale".

Analizzando poi i singoli stadi del processo in maniera sempre più approfondita e realistica si otterranno valori di efficienza termica sempre inferiori, fino a un minimo in cui in modo molto realistico si concepisce un *flow sheet* di processo.

Successivamente, in seguito alla ottimizzazione dello schema di processo concepito, si provvederà a migliorare l'efficienza, come mostrato in figura 6.

Ovviamente, un ciclo termochimico di idrolisi sarà degno di essere preso in considerazione solo se, a parità di fonte energetica primaria, la sua efficienza termica reale risulta superiore a quella di un processo di generazione elettrica-elettrolisi. Oltre all'efficienza energetica del processo  $\eta_{th}$ , per la scelta del ciclo termochimico più idoneo da accoppiare a una data fonte termica primaria, occorre considerare i seguenti criteri:

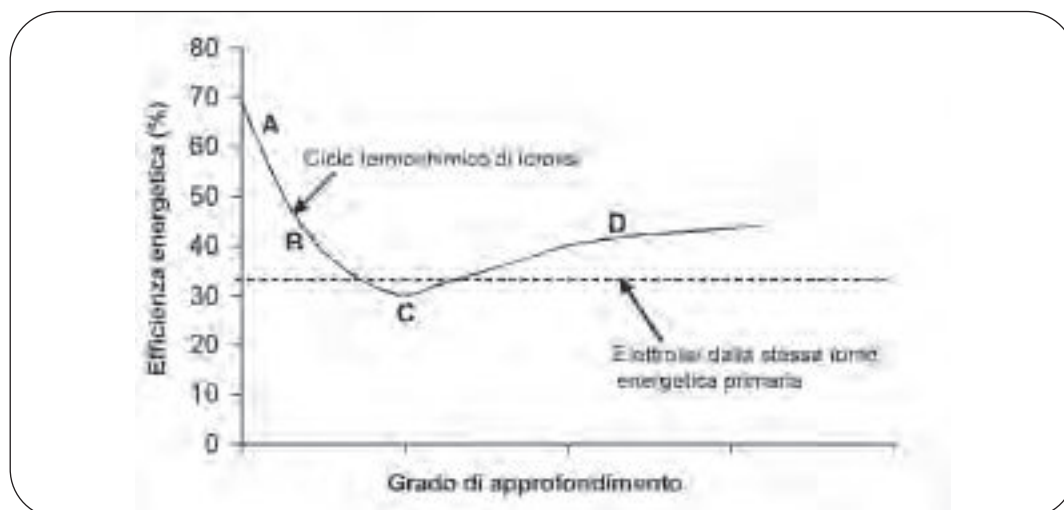
- potenzialità di accoppiamento con la sorgente termica;
- complessità delle operazioni di separazione dei prodotti e cinetica delle singole reazioni;
- costi di pompaggio e compressione (che comportano consumi elettrici non esplici-

Tabella 3 - Esempi di cicli termochimici di idrolisi

| Ciclo termochimico         | Stadio  | T(°C)     |
|----------------------------|---|-----------|
| Ciclo Zolfo-Iodio (S-I)    | 1 $2\text{H}_2\text{O(l)} + \text{I}_2 + \text{SO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq}) + 2\text{HI}(\text{aq})$  | 20-120    |
|                            | 2 $2\text{HI(g)} \rightarrow \text{I}_2(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$   | 300-450   |
|                            | 3 $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{g}) \rightarrow \text{H}_2\text{O(g)} + \text{SO}_3(\text{g}) \rightarrow \text{H}_2\text{O(g)} + \text{SO}_2(\text{g}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g})$                                     | 800-950   |
| Ciclo delle Ferriti Miste  | 1 $2\text{MnFe}_2\text{O}_4(\text{s}) + 3\text{Na}_2\text{CO}_3(\text{s}) + \text{H}_2\text{O(g)} \rightarrow 6\text{Na}(\text{Mn}_{1/3}\text{Fe}_{2/3})\text{O}_2(\text{s}) + 3\text{CO}_2(\text{g}) + \text{H}_2(\text{g})$ | 750-800   |
|                            | 2 $6\text{Na}(\text{Mn}_{1/3}\text{Fe}_{2/3})\text{O}_2(\text{s}) + 3\text{CO}_2(\text{g}) \rightarrow 2\text{MnFe}_2\text{O}_4(\text{s}) + 3\text{Na}_2\text{CO}_3(\text{s}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g})$              | 700-1000  |
| Ciclo dell'ossido di zinco | 1 $\text{Zn(s)} + \text{H}_2\text{O(g)} \rightarrow \text{ZnO(s)} + \text{H}_2(\text{g})$   | 430-900   |
|                            | 2 $\text{ZnO(s)} \rightarrow \text{Zn(g)} + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g})$  | 1200-1500 |
| Ciclo UT-3                 | 1 $\text{CaBr}_2(\text{s}) + \text{H}_2\text{O(g)} \rightarrow \text{CaO(s)} + 2\text{HBr(g)}$  | 700-900   |
|                            | 2 $\text{CaO(s)} + \text{Br}_2(\text{g}) \rightarrow \text{CaBr}_2(\text{s}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g})$   | 430-570   |
|                            | 3 $\text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + 8\text{HBr(g)} \rightarrow 3\text{FeBr}_2(\text{s}) + 4\text{H}_2\text{O(g)} + \text{Br}_2(\text{g})$  | 220-280   |
|                            | 4 $3\text{FeBr}_2(\text{s}) + 4\text{H}_2\text{O(g)} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4(\text{s}) + 6\text{HBr(g)} + \text{H}_2(\text{g})$   | 500-900   |
| Ciclo del Cloruro di Cerio | 1 $\text{Cl}_2(\text{g}) + \text{H}_2\text{O(g)} \rightarrow 2\text{HCl(g)} + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g})$  | 600-700   |
|                            | 2 $2\text{CeO}_2(\text{s}) + 8\text{HCl(g)} \rightarrow 2\text{CeCl}_3(\text{s}) + 8\text{H}_2\text{O(g)} + \text{Cl}_2(\text{g})$  | 100-250   |
|                            | 3 $2\text{CeCl}_3(\text{s}) + 4\text{H}_2\text{O(g)} \rightarrow 2\text{CeO}_2(\text{s}) + 6\text{HCl(g)} + \text{H}_2(\text{g})$   | 750-800   |

**Figura 6**

Andamento tipico dell'efficienza energetica stimata per un ciclo termochimico con il suo grado di approfondimento. A: studio preliminare (previsione dell'efficienza teorica); B: analisi di schemi di processo ideali; C: definizione di flow sheet dettagliati e realistici; D: ottimizzazione di processo



tamente considerati in una analisi termodinamica preliminare);

- compatibilità dei reagenti e intermedi di reazione e delle condizioni operative con i materiali costruttivi;

- ciclabilità degli intermedi e assenza di reazioni secondarie;

- maneggevolezza degli intermedi (tossicità, infiammabilità, esplosività).

Possono anche essere concepiti cicli termochimici cosiddetti "ibridi", che prevedono uno (o più) stadi di tipo elettrochimico. Esempi di cicli termochimici ibridi maggiormente studiati sono riportati in tabella 4.

Sebbene l'utilizzo di metodi elettrochimici permetta di superare alcuni vincoli termodinamici caratteristici di alcune reazioni di un ciclo termochimico, occorre valutare accuratamente i consumi energetici che ne derivano.

## Altri metodi per la produzione di idrogeno da acqua e fonti alternative

Mentre i cicli termochimici, in particolare il ciclo zolfo-iodio, si trovano già quasi in una fase di sviluppo a livello di impianto pilota, i processi di fotolisi solare (figura 3) sono ancora in una fase di indagine preliminare. Se le modestissime efficienze energetiche venissero confermate, si prevede che non risulteranno competitivi con i cicli termochimici alimentati da solare, data la maggiore potenza richiesta all'impianto solare e l'elevato costo di quest'ultimo.

Andrebbero considerati anche metodi fotoelettrochimici di idrolisi, anch'essi però ancora in una fase di studio a livello di laboratorio.

**Tabella 4 - Esempi di cicli termochimici ibridi di idrolisi**

| Ciclo termochimico               | Stadio  | T(°C)                    |
|----------------------------------|---|--------------------------|
| Ciclo ibrido dello zolfo (HyS)   | 1 $2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{SO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq}) + \text{H}_2(\text{g})$   | 25-80, elettr. 0.5-0.6 V |
|                                  | 2 $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{g}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \text{SO}_3(\text{g}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \text{SO}_2(\text{g}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g})$ | 800-950                  |
| Ciclo del Cloruro di Rame (CuCl) | 1 $2\text{Cu}(\text{s}) + 2\text{HCl}(\text{g}) \rightarrow \text{H}_2(\text{g}) + 2\text{CuCl}(\text{l})$  | 450                      |
|                                  | 2 $4\text{CuCl} \rightarrow 2\text{Cu}(\text{s}) + 2\text{CuCl}_2$  | 25, elettr. 0.4-0.5 V    |
|                                  | 3 $2\text{CuCl}_2(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \rightarrow \text{Cu}_2\text{OCl}_2 + 2\text{HCl}(\text{g})$   | 325                      |
|                                  | 4 $\text{Cu}_2\text{OCl}_2 \rightarrow 2\text{CuCl}(\text{l}) + \text{O}_2(\text{g})$   | 450-530                  |
| Ciclo zolfo-bromo (S-Br)         | 1 $\text{SO}_2(\text{g}) + \text{Br}_2(\text{l}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow 2\text{HBr}(\text{g}) + \text{H}_2\text{SO}_4(\text{l})$   | 100-140                  |
|                                  | 2 $2\text{HBr}(\text{s}) \rightarrow \text{H}_2(\text{g}) + \text{Br}_2(\text{l})$  | 80°C, elettr. 0.4-0.5 V  |
|                                  | 3 $\text{H}_2\text{SO}_4(\text{g}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{g}) + \text{SO}_2(\text{g}) + \frac{1}{2}\text{O}_2(\text{g})$  | 800-950                  |

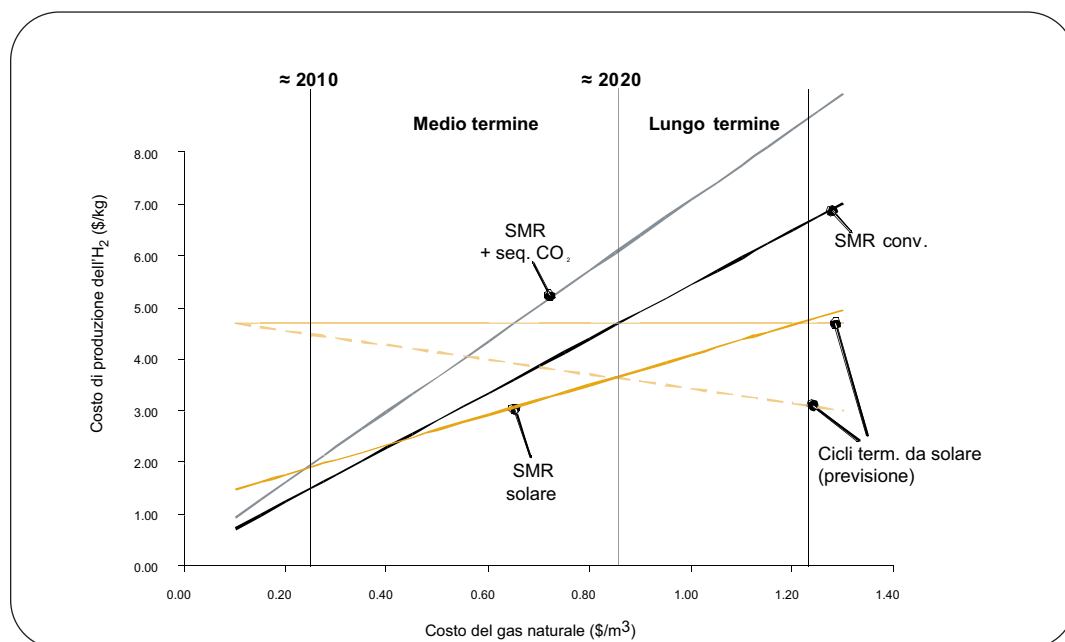
Infine grande interesse rivestono i processi biotecnologici ancora in fase di studio, per i quali non si prevede al momento una futura applicazione su larga scala, ma che vengono piuttosto ritenuti molto promettenti per una produzione decentralizzata dell'idrogeno. Quest'ultimo aspetto è particolarmente interessante se si considerano gli elevati costi di distribuzione dell'idrogeno in un futuro sistema energetico basato sull'utilizzo di tale vettore energetico: potrebbero pertanto trovare larga applicazione nei casi di piccole utenze in siti non serviti dalla rete di distribuzione.

### Potenzialità e ruolo dei cicli termochimici per la futura produzione di idrogeno

In tabella 2 sono riportate le caratteristiche dei processi descritti. I costi di produzione di alcuni processi rappresentativi in funzione del costo del gas naturale sono anche rappresentati in figura 7. In base a quanto discusso precedentemente e ai risultati mostrati in tabella 2 si può concludere che processi quali il *reforming* del gas naturale (SMR) e la gassificazione del carbone anche con seque-

stro del  $\text{CO}_2$  e successivo confinamento stabile, che peraltro deve ancora essere dimostrato, sembrano essere i più competitivi per una applicazione nel breve termine (< 20 anni): tali processi hanno infatti già raggiunto un livello di sviluppo tale da trovare applicazione in campo industriale e diverranno ancora più competitivi nel medio termine nel caso di integrazione con fonti alternative (solare o nucleare), come mostrato anche in figura 7. La gassificazione di biomasse può essere molto competitiva nel medio-lungo termine (> 10 anni) dal punto di vista delle emissioni di  $\text{CO}_2$  e dei costi di produzione, ma occorre in tal caso considerare le modeste rese energetiche dell'intero processo radiazione solare-idrogeno, che comportano un considerevole utilizzo specifico del territorio. Si ritiene che tali processi potrebbero significativamente contribuire a soddisfare la futura domanda di idrogeno in Europa solo nel caso di utilizzo di materiale da rifiuto quale fonte primaria (CDR).

Per le applicazioni nel lungo termine (> 30 anni) occorrerà invece considerare esclusivamente i processi che utilizzano fonti alternative, molti dei quali tuttoggi in



**Figura 7**

Confronto tra i futuri costi di produzione dell'idrogeno. Si assume un incremento annuo del 2% del costo del gas naturale, con un costo attuale di 0,15 \$/m<sup>3</sup>, incremento del costo di produzione del 30% nel caso di sequestro del  $\text{CO}_2$



via di sviluppo. Tra questi, i cicli termochimici alimentati da fonte nucleare sono ritenuti economicamente più vantaggiosi. Nel caso di utilizzo di fonti rinnovabili, sono i cicli termochimici alimentati da fonte solare a essere ritenuti più vantaggiosi sia in termini di utilizzo specifico del territorio che di costi di produzione.

Inoltre, nel caso dell'elettrolisi con elettricità prodotta da fonti rinnovabili quali fotovoltaico ed eolico senza accumulo, va considerata la sfavorevole condizione di utilizzo dell'elettrolizzatore. Infatti, le ore di effettivo funzionamento a potenza nominale dell'impianto risultano in genere non superiori alle 2000 h/a, fatto che rende la quota di ammortamento dell'elettrolizzatore estremamente onerosa per il costo totale di produzione dell'idrogeno. Come mostrato in figura 7, con il crescere del costo del gas naturale, si prevede per i prossimi decenni un'inversione dei costi di produzione dell'idrogeno che risulterà in una maggiore competitività dei processi ibridi nel medio termine e dei processi interamente alimentati da fonti alternative (come i cicli termochimici da solare) nel lungo termine.

In questo ultimo caso, trattandosi ancora di processi in via di sviluppo tecnologico (tabella 2), diversamente da quelli di origine fossile, è prevedibile una riduzione dei costi di produzione derivante dal miglioramento tecnologico: il raggiungimento del pareggio (*break-even point*) per i processi di produzione più innovativi (come i cicli termochimici) sarà pertanto tanto più accelerato quanto maggiori saranno gli impegni in attività di ricerca e sviluppo.

Altri processi da fonti rinnovabili che presentano costi più elevati (elettrolisi eolica, fotovoltaico, biotecnologie) possono invece giocare un ruolo importante per le piccole produzioni decentralizzate.

## Programmi ENEA sui cicli termochimici di idrolisi

L'ENEA è attualmente impegnata in attività di ricerca e sviluppo di cicli termochimici di idrolisi alimentati da energia solare termica con il Progetto "TEPSI", nell'ambito del programma nazionale strategico: "Nuovi sistemi di produzione e gestione dell'energia", finanziato dal fondo integrativo speciale per la ricerca.

Al progetto, che ha una durata triennale, partecipano l'ENEA come coordinatore e diverse Università italiane. Dopo una attività preliminare di selezione dei numerosi cicli termochimici sinora proposti, le attività di ricerca si sono indirizzate sullo sviluppo del ciclo zolfo-iodio e del ciclo delle ferriti miste (tabella 3).

Il ciclo zolfo-iodio, come prima accennato, è attualmente tra i più studiati a livello mondiale e si trova in una fase di sviluppo più avanzata rispetto ad altri processi termochimici. Il programma di ricerca ENEA prevede lo studio delle operazioni fondamentali, la ricerca di varianti per migliorare il rendimento del ciclo, e la messa a punto di un impianto dimostrativo su scala di laboratorio. L'obiettivo finale è quello di sviluppare una versione solare di tale processo.

A tal fine uno degli obiettivi è quello dello studio della tecnologia di interfacciamento con la fonte solare, in particolare modo per quanto riguarda la sezione ad alta temperatura per la concentrazione e la dissociazione dell'acido solforico, una delle reazioni fondamentali del ciclo.

Il secondo processo termochimico studiato nel progetto TEPSI riguarda il ciclo basato sull'uso di ferriti miste. Si tratta di un ciclo particolarmente innovativo basato su due sole reazioni di tipo gas-solido, estremamente interessante dal punto di vista del basso costo dei materiali impiegati come reagenti e di quelli impiegati per la realizzazione dell'impianto.



to chimico. In tal caso il programma di ricerca e sviluppo prevede la produzione dei materiali reagenti con diverse metodologie e le successive verifiche in termini di durata, di resa e di rendimento

complessivo. Anche in questo caso è prevista la realizzazione di un impianto completo su scala di laboratorio.

Per informazioni:

[alberto.giaconia@casaccia.enea.it](mailto:alberto.giaconia@casaccia.enea.it)

## Bibliografia

1. LIPMAN T.E. *What Will Power the Hydrogen Economy? Present and Future Sources of Hydrogen Energy*, UC-DITS-RR-04-10, Institute of Transportation Studies – Davis One Shields Ave., University of California, July 2004.
  2. EWAN B.C.R., ALLEN R.W.K., *A Figure of Merit Assessment of the Routes to Hydrogen*, *Int. J. Hydrogen Energy*. 2005, vol.30, p.809-819.
  3. MOELLER S., KAUCIC D., SATTTLER C., *Hydrogen Production by Solar Reforming of Natural Gas: A Comparison Study of Two Possible Process Configurations*, *J. Sol. Energ. - T ASME*. 2006, vol.128, p.16-23.
  4. TROMMER D., NOEMBRINI F., FASCIANA M., RODRIGUEZ D., MORALES A., ROMERO M., STEINFELD A., *Hydrogen production by steam-gasification of petroleum coke using concentrated solar power – I. Thermodynamic and kinetic analyses*, *Int. J. Hydrogen Energy*. 2005, vol.30, p.605-618.
  5. IWASAKI W. *A Consideration of the Economic Efficiency of Hydrogen Production from Biomass*, *Int. J. Hydrogen Energy*. 2003, vol.28, p.939-944.
  6. BRACCIO G., MATERA D., GAMBERALE M., ADDABBO V., SHARMA V.K., *Effect of Different Parameters and Variables on the Cost of Hydrogen Produced from Biomass Using Gasification Plants of Low to Medium Thermal Capacity*, *Int. Energy Journal from Asian Institute of Technology*, Bangkok (Thailand), 2006, in press.
  7. SIMBECK D., CHANG E., *Hydrogen Supply: Cost Estimate for Hydrogen Pathways – Scoping Analysis*, NREL Report NREL/SR-540-32525, July 2002.
  8. BROWN L.C., BESENBRUCH G.E., LENTSCH R.D., SCHULTZ K.R., FUNK J.F., PICKARD P.S., MARSHALL A.C., SHOWALTER S.K., *High Efficiency Generation of Hydrogen Fuels Using Nuclear Power*, General Atomic Project 30047, June 2003.
  9. STEINFELD A., *Solar hydrogen production via a two-step water-splitting thermochemical cycle based on Zn/ZnO redox reactions*, *Int. J. Hydrogen Energy*. 2002, vol.27, p.611-619.
- IO' GIACONIA A., GRENA R., LANCHI M., LIBERATORE R., TARQUINI P., *H<sub>2</sub>/Methanol Production by Sulfur-Iodine Thermochemical Cycle Powered by Combined Solar/Fossil Energy*, 2005 AIChE Spring National Meeting, Atlanta (Georgia, USA), 10-14 aprile 2005.

# La metrologia nello sviluppo delle attività umane

La domanda di accuratezza e di affidabilità nei diversi settori di misura è crescente nel tempo. Questa domanda, a sua volta, richiede con continuità lo sviluppo di nuovi campioni sempre più accurati e di nuove procedure di taratura. In questo articolo viene presentato il ruolo che l'ENEA svolge come Istituto Metrologico Primario nel settore delle radiazioni ionizzanti

**RAFFAELE FEDELE LAITANO**

**ENEA**  
Istituto Nazionale di Metrologia delle  
Radiazioni Ionizzanti

*Tratto da:* ENERGIA, AMBIENTE E INNOVAZIONE 4/06

## 1. Introduzione

**M**olti aspetti delle attività umane sono legati ai risultati di misurazioni. Tali risultati sono infatti usati per attuare decisioni in relazione a: processi produttivi, attività commerciali, attività scientifiche e tecnologiche, problemi sanitari e ambientali ecc.. In concomitanza con lo sviluppo delle diverse attività, la tipologia delle misurazioni è stata nel corso del tempo in continua evoluzione: dalle misure riguardanti le dimensioni e la massa degli oggetti, diffuse sin dalle epoche più remote, alle misure del tempo e man mano di tutte le altre grandezze relative ai fenomeni dinamici, termici, elettrici ecc.. Nei periodi più recenti sono poi diventate sempre più importanti le misure di ulteriori grandezze come quelle legate ai parametri fisiologici umani, agli agenti nocivi nell'ambiente ecc.. Con l'evoluzione delle attività umane non è però solo aumentato il numero di grandezze da misurare ma si è costantemente evoluta soprattutto la qualità delle misurazioni. Il continuo progredire della tecnologia e dello sviluppo ha infatti richiesto, e continua tuttora a richiedere, sia una sempre maggiore accuratezza nei vari metodi di misura sia il continuo sviluppo di metodi innovativi per nuove tipologie di misura. Come sarà illustrato nel seguito, questo processo è reso possibile dallo sviluppo della metrologia: la scienza delle misure, la quale si occupa in particolare della definizione (e della evoluzione) delle unità di misura, dello studio e della realizzazione dei loro campioni, dello sviluppo dei metodi di misura e dei metodi di taratura degli strumenti usati per effettuare le diverse possibili misurazioni. Nel passato i campioni delle unità di misura erano diversi fra paesi (e anche fra regioni dello stesso paese) differenti per connotati socio-economici e amministrativi: una situazione questa, sempre meno compatibile con il progredire degli scambi industriali e commerciali. La necessa-

ria uniformità dei vari sistemi campione è oggi possibile grazie al fatto che gli istituti metrologici nazionali, aventi il compito di fare ricerca sui metodi di misura e di sviluppare i relativi campioni di riferimento, hanno costituito negli anni recenti una struttura interconnessa a livello internazionale. Grazie a tale struttura la confrontabilità e l'accettabilità internazionale dei risultati delle misure sono quindi oggi rese possibili.

Evidenziare i principali nessi fra sviluppo e metrologia unitamente alla descrizione della struttura metrologica nazionale e internazionale costituisce lo scopo di questa rassegna. In questo quadro, sarà illustrato in particolare il ruolo istituzionale che l'ENEA svolge a tal riguardo. L'ENEA ha infatti per l'Italia un'importante funzione in campo metrologico poiché svolge, tramite il suo Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti, il ruolo di Istituto Metrologico Primario, cioè di organismo cui è demandato per legge il compito di sviluppare e mantenere sempre operativi i campioni nazionali di misura, nel settore delle radiazioni ionizzanti.

## 2. Origini ed evoluzione della metrologia

La capacità di effettuare misure affidabili è stata sempre una delle condizioni per lo sviluppo delle attività umane sin dalle più antiche società strutturate. Vi è inoltre stata sempre consapevolezza che una condizione di base per l'affidabilità del risultato di una misura è che il mezzo di misura usato sia riferibile a un sistema-campione ben definito. La riferibilità di una misura esige che lo strumento usato per quella misura debba essere "tarato" rispetto a un campione di riferimento. Il campione di misura di una qualsiasi grandezza misurabile è necessario per realizzare l'unità di misura con cui si intende esprimere quella data grandezza. Affinché i risultati delle misure siano immediatamente compren-

prensibili e confrontabili nell'ambito di una comunità di utenti, è poi necessario che questi campioni siano concordati e accettati come riferimento univoco entro quella data comunità. In assenza di un tale campione di riferimento le misure dovrebbero essere di volta in volta espresse in unità stabilite arbitrariamente, con l'impossibilità di valutare in modo diretto e oggettivo l'entità della grandezza misurata e con conseguenze di contenziosi facilmente immaginabili. Per questo motivo, sin dalle più antiche società strutturate è vivo l'interesse nel definire e sviluppare mezzi e procedure di misura unitamente ai primi rudimentali campioni di riferimento. La moderna scienza delle misure e dei campioni di riferimento - la metrologia - vede infatti le sue origini già nelle antiche civiltà mesopotamica, egiziana, cinese, greca (per citare quelle più largamente note). In queste civiltà ritroviamo infatti autorità preposte alla definizione dei campioni e delle unità di misura cui riferire in modo univoco le misurazioni effettuate nell'ambito dei propri territori. L'importanza della correttezza dei risultati di misura è stata sempre ritenuta elevata sin dalle più antiche società organizzate. Nell'antico Egitto il faraone puniva con una pena (che, nel caso di misure attinenti alla costruzione delle piramidi, poteva anche essere quella capitale) chi forniva risultati sbagliati per non

aver effettuato, nelle misure di lunghezza, la taratura periodica dei propri mezzi di misura rispetto al campione di riferimento di allora<sup>1</sup>, il "cubito reale", costituito da un blocco di granito di circa 50 cm (figura 1). Fino agli albori dell'età industriale, l'interesse delle misure si concentra prevalentemente nelle misure delle masse, delle capacità volumetriche e delle lunghezze. Con il progredire dello sviluppo scientifico e tecnologico, industriale e commerciale, l'interesse pratico si estende man mano a misure di sempre più nuove e a più numerose grandezze (nei settori meccanico, elettrico, termodinamico ecc.) e quindi alla realizzazione dei rispettivi campioni per la taratura degli strumenti di misura di tali grandezze. L'intensificarsi degli scambi ha nel tempo attivato l'esigenza di uniformare entro regioni con confini sempre più ampi i campioni di misura definiti in ciascun Paese. Alla fine del secolo XIX, in una fase di grande crescita dello sviluppo industriale, i paesi più industrializzati ritennero ormai indifferibile l'attuazione di un accordo internazionale nel settore. È da questa esigenza che venne siglato a Parigi nel 1875 un accordo diplomatico, "*La Convention du Mètre*", grazie al quale si concordò fra gli iniziali 17 paesi firmatari (fra cui l'Italia) di adottare come comune sistema di misura il "Sistema Metrico Decimale". Il nuovo sistema era

**Figura 1**  
Papiro egiziano in cui è raffigurato, in basso al centro, il "Cubito Reale Egiziano", il campione cui venivano riferite le misure di lunghezza nell'Egitto dei faraoni a partire da circa il 3000 a. C.<sup>1</sup>



basato in larga parte sui rivoluzionari cambiamenti delle unità di misura già introdotti in Francia nel 1795 e dai quali, in particolare, era scaturito il metro (figura 2). Il metro fu definito come la decimilionesima parte di un quarto del meridiano terrestre passante per Parigi. Con l'introduzione del



sistema metrico venivano abolite in Francia oltre settecento unità di misura (con nomi spesso mutuati da parti del corpo umano: piede, passo, cubito, pollice, spanna, braccio, ecc) differenti, pur a parità di denominazione, nelle diverse località. Nell'ambito della "Convenzione del Metro" viene istituito a Sèvres (Francia) il Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) un organismo internazionale<sup>2</sup> avente il compito di realizzare campioni di misura internazionalmente riconosciuti – fra i più importanti all'epoca, il metro (figura 3) - e di promuovere lo sviluppo della moderna scienza delle misure: la metrologia.

Una successione di eventi conseguenti a questo accordo è la creazione, in ciascun Paese, di istituti metrologici con il compito di sviluppare i campioni nazionali di misura e di confrontarli periodicamente a livello internazionale per assicurare l'uniformità e la comparabilità delle misure. Gli istituti metrologici nazionali nei singoli paesi nascono in tempi diversi, in funzione del proprio livello di sviluppo, a partire dalla Germania, l'Inghilterra e gli USA con i primi istituti metrologici nel mondo: PTB nel 1887, NPL nel 1900 e NBS (oggi NIST) nel 1901, rispettivamente. Agli inizi del secolo XXI i Paesi aderenti alla "Convenzione del Metro" sono 51 (dagli originari 17) e in ciascuno di questi opera un'istituzione metrologica per lo sviluppo dei campioni di

misura. La tipologia dei campioni che realizzano le unità di misura, è andata anch'essa allargandosi nel tempo per soddisfare le crescenti esigenze di accuratezza nella misura di grandezze sempre più numerose. Queste esigenze sono espresse nei più svariati settori dell'industria, del commercio, della tecnologia, della medicina, dell'ambiente ecc.. È sempre più vasta la quantità di decisioni prese sulla base dei risultati di misurazioni nei più svariati settori. Queste decisioni influenzano in modo diretto settori dell'economia e della salute umana e da esse può dipendere l'esistenza o l'eliminazione di barriere negli scambi internazionali. La riferibilità delle misure a sistemi campione internazionalmente riconosciuti è un requisito essenziale affinché i risultati delle misure siano accettati a livello internazionale. Questo requisito può essere soddisfatto solo a condizione di disporre di una consolidata struttura metrologica operante a livello nazionale e inserita in un contesto internazionale di verifiche e controlli. Dal 1875 - anno in cui si attua il primo accordo internazionale sulla metrologia (v. sopra) - l'organizzazione internazionale della metrologia si è continuamente evoluta fino ad assumere la struttura descritta nello schema in figura 4.

Anche il sistema delle unità di misura e dei campioni si evolve nel tempo. Oggi le unità di misura ufficialmente adottate da tutti i paesi aderenti alla "Convenzione del Metro" sono quelle definite nel "Sistema Internazionale" (SI)<sup>3</sup>.

Negli anni recenti, con il perfezionamento dei metodi e delle tecnologie di misura, si è consolidata la tendenza ad abbandonare il concetto di campione inteso come oggetto fisico da custodire con grande cura in appositi ambienti controllati. Oggi quasi tutti (e in prospettiva tutti) i campioni delle grandezze fisiche sono invece realizzati mediante rigorose sequenze di misurazioni. Ciò è reso possibile dall'introduzione di nuove definizioni delle uni-

**Figura 2**  
Esemplare di uno dei primi campioni del metro a seguito dell'introduzione del Sistema Metrico Decimale in Francia il "18 germinale dell'anno III" (7 aprile 1795)



**Figura 3**

Esemplare di un campione del metro del secolo scorso (basato sempre sulla originaria definizione del 1795, rimasta in uso fino al 1960) realizzato con una barra di platino-iridio

tà di misura delle grandezze fisiche di base, basate essenzialmente su costanti fondamentali della fisica (la velocità della luce nel vuoto, la carica elementare, la costante di Planck ecc.). Il metro, ad esempio è stato ridefinito nel 1960 come un multiplo della lunghezza d'onda di una specificata radiazione emessa dal Krypton 86 e nel 1983 (a tutt'oggi) come la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in un tempo uguale a  $1/299\,792\,458$  di secondo

### 3. Importanza della metrologia nei diversi settori di attività

Come si è già sopra ricordato, misurare è sempre stato un atto connesso con l'attività umana organizzata. Con il progredire del livello tecnologico, produttivo, commerciale e dei servizi, cresce in ciascun paese anche la necessità di accuratezza nelle misurazioni in settori di attività sempre più vasti.

Ciò è richiesto dall'esigenza di verificare le proprietà tecnologiche e i connotati funzionali che sono sempre più numerosi nei prodotti e nei servizi quando essi evolvono qualitativamente. In una società tecnologicamente sviluppata l'incidenza delle operazioni di misurazione sul costo finale di un prodotto o di un servizio è quindi sempre crescente. L'incidenza delle misurazioni è crescente anche nella vita quotidiana di ciascuna persona in una società sviluppata.

Ciascuno di noi impegna una parte non trascurabile del proprio tempo nell'effettuare direttamente delle misure: l'orario durante il lavoro, gli spostamenti e il tempo libero; i parametri climatici, quali la temperatura la pressione e l'umidità; il peso del proprio corpo ecc.. Ciascuno di noi è inoltre regolarmente interessato al risultato di misurazioni che altri effettuano a nostro carico: i consumi di elettricità, di acqua, di gas; l'ora e la durata delle conversazioni telefoniche; le pesate del negoziante; la velocità della

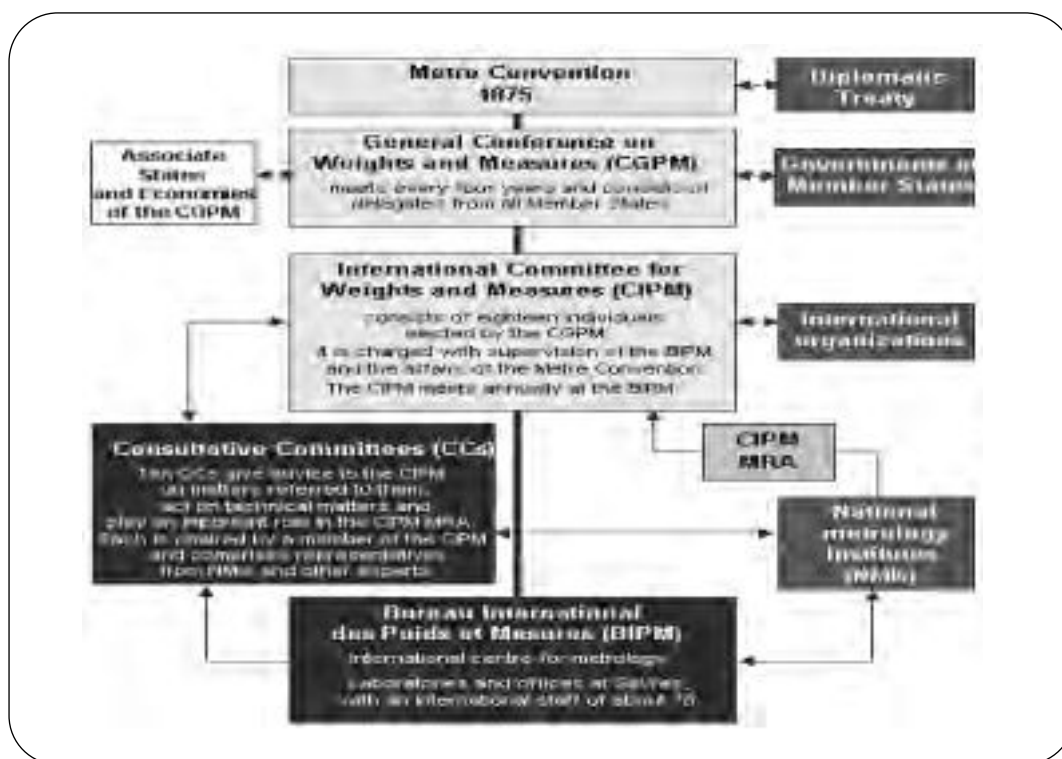


propria auto ecc.. Un ruolo di particolare criticità rivestono poi le misure inerenti alle verifiche sulla salute umana (le analisi cliniche, le misure della temperatura corporea, della pressione arteriosa ecc.) e alla salvaguardia ambientale (misure dei contaminanti nell'aria e negli alimenti).

In tutti questi casi il risultato della misurazione ha un peso nella fase decisionale successiva alla misura. In un'analisi clinica, ad esempio, a seconda dei valori ottenuti si può decidere (debitamente o indebitamente) di iniziare o arrestare una cura medica, oppure in una misura dimensionale di un componente industriale si può decidere (debitamente o indebitamente) di utilizzare o scartare quel componente. La correttezza della decisione e i costi delle eventuali azioni di rimedio conseguenti a misure errate dipendono dall'affidabilità della misura.

È utile ricordare che l'incidenza dei costi connessi a misurazioni (controlli qualitativi) nella produzione di manufatti non è trascurabile e può arrivare fino a circa un quarto del loro valore per prodotti a tecnologia avanzata, quali si hanno nell'industria aeronautica e automobilistica. Gli interventi di rimedio in campo sanitario (ad es. le prescrizioni terapeutiche a seguito di analisi del sangue) o in campo ambientale (ad es. le restrizioni nel traffico a seguito di elevate concentrazioni di inquinanti nell'aria) sono strettamente legati ai risultati (talvolta corretti, talvolta errati) di





**Figura 4**  
Organizzazione internazionale della metrologia ([www.bipm.org](http://www.bipm.org)). La General Conference on Weights and Measures (CGPM), costituita da esperti in scienza della misura a livello internazionale, elabora i temi scientifici su cui sono basate le decisioni della CGPM. Gli Istituti Metrologici Nazionali (NMI) concorrono alle elaborazioni del CIPM tramite i Comitati Consultivi. Il BIPM è la sede scientifica internazionale dove gli NMI confrontano i rispettivi campioni

misurazioni. I costi di questi interventi di rimedio possono essere molto elevati e sono indebiti se tali interventi sono conseguenti a misurazioni errate. Analoghe valutazioni valgono nel caso dei costi connessi a misure non affidabili attinenti a settori d'attività industriali o commerciali.

L'affidabilità di una misura è legata a diversi fattori, ma in primo luogo dipende dall'affidabilità degli strumenti di misura. A sua volta l'affidabilità di uno strumento di misura dipende dal fatto che esso sia opportunamente tarato.

La taratura di uno strumento di misura è la prima indispensabile operazione che permette di ottenere il valore della grandezza che si vuole misurare (ad es. la temperatura, il tempo, la velocità ecc.) a partire dall'indicazione (ad es. le variazioni di un indicatore numerale o analogico) direttamente fornita dallo strumento di misura. Uno strumento di misura non correttamente tarato fornisce risultati sbagliati e quindi non è affidabile.

La taratura degli strumenti di misura è un'operazione essenziale per la quale è

necessario disporre di specifici campioni di riferimento e di idonei laboratori. Lo sviluppo dei campioni di riferimento e la definizione delle procedure di taratura nei più svariati settori di misura costituiscono il compito principale della metrologia.

La metrologia è una disciplina in continua evoluzione poiché la domanda di accuratezza e di affidabilità nei diversi settori di misura è crescente nel tempo.

Questa domanda a sua volta richiede con continuità lo sviluppo di nuovi campioni (caratterizzati da accuratezze crescenti) e di nuove procedure di taratura.

Ogni 10-20 anni, negli ultimi 50 anni, i requisiti di accuratezza sono aumentati di circa un fattore 10 nei diversi campi di misura attinenti principalmente al settore industriale e a quello della salute e dell'ambiente. Una breve rassegna dei settori di attività dai quali la scienza della misura, la metrologia, riceve continuamente una domanda di crescente accuratezza, sarà utile a quantificare l'impegno che oggi gli istituti metrologici sono chiamati a soddisfare in ciascun settore di misura.

## 4. L'esigenza di affidabilità nelle misure nei diversi settori di attività

Una domanda di maggiore accuratezza e affidabilità nelle misure si evidenzia da anni sia nel tradizionale settore delle misure elettriche, meccaniche, del tempo ecc., sia in nuovi settori d'attività dalla chimica, alle scienze della salute, dell'ambiente ecc.. Le più recenti aree della metrologia sono legate alle necessità di misura nel campo delle nanotecnologie, delle applicazioni laser, delle tecniche optoelettroniche, della caratterizzazione delle proprietà dei nuovi materiali, delle applicazioni mediche delle radiazioni ionizzanti, della specificazione e quantificazione dei contaminanti ambientali (gas e particolato atmosferico) ecc.. Nel seguito sono esemplificati alcuni dei settori dove oggi le esigenze di accuratezza di misura si manifestano maggiormente e per i quali è richiesto o un miglioramento della metrologia tradizionale (in termini di maggiore accuratezza dei campioni esistenti) o lo sviluppo di sistemi metrologici del tutto nuovi (nuovi campioni). Per una rassegna dettagliata sul nesso oggi esistente fra la metrologia e i diversi settori dell'industria e dei servizi si veda il rapporto pubblicato sull'argomento dal BIPM<sup>4</sup>.

### 4.1 - Stato attuale ed evoluzione della metrologia nel settore industriale

In campo industriale è richiesta una elevata accuratezza delle misure conseguente alle sempre più strette tolleranze imposte (nella fase di costruzione e di utilizzazione) ai componenti e ai sistemi di tipo meccanico ed elettrico/elettronico. Questa richiesta riguarda tutti i tradizionali settori di misura (misure elettriche, dimensionali, di massa, pressione, flusso, umidità ecc.) e quindi i corrispondenti campioni di riferimento. Una crescente evoluzione

qualitativa è richiesta in particolare ai campioni di tempo e frequenza che sono alla base dei sistemi di navigazione spaziale e dei sistemi di posizionamento. Le immagini di oggetti sulla terra fornite dai satelliti hanno risoluzioni sempre più elevate (ormai ben al di sotto del metro), ciò richiede oggi ai campioni di frequenza (necessari per la taratura dei sistemi di posizionamento del tipo GPS ecc.) accuratezze molto elevate. Gli attuali campioni basati sugli orologi atomici al cesio consentono infatti accuratezze dell'ordine di una parte su  $10^{15}$ . Una grande accuratezza è anche richiesta nelle misure di fluidi e in particolare quelle svolte dall'industria petrolifera (petrolio e gas). Date le quantità in gioco, errori di alcune parti su mille possono in questi casi determinare perdite economiche quantificabili in centinaia di milioni di dollari.

La necessità di disporre di adeguati sistemi campione per misure di grandezze, quali la forza, la viscosità, l'elasticità, il trasferimento di calore ecc. o per la caratterizzazione di proprietà, quali la granulometria di polveri, il colore, gli odori ecc., costituiscono attualmente un rilevante impegno di ricerca e sviluppo per la metrologia in questi settori.

Un particolare impegno si profila per quella che viene indicata come la "nanometrologia". Da tempo la produzione di manufatti è impegnata con tecnologie che si sono evolute dalle dimensioni micrometriche a quelle nanometriche. Non si tratta tuttavia solo di affrontare un problema di scala, ma di tener conto anche di una fenomenologia diversa. Ad esempio la caratterizzazione di una superficie liscia oggi può richiedere analisi dei materiali dove entrano in gioco le strutture caotiche delle superfici quando l'analisi delle strutture viene spinta a livello nanometrico. I metodi di misura sono perciò concettualmente diversi da quelli usati tradizionalmente per un'analisi più "grossolana" della regolarità di una superficie. Nuovi cam-

pioni di riferimento sono perciò necessari a questo scopo se si vuole comprovare, (per esigenze industriali, commerciali, scientifiche ecc) con metodi riproducibili e accettati internazionalmente, che un prodotto possiede effettivamente le caratteristiche strutturali ad esso attribuite nominalmente. Le esigenze di misurare - e certificare - piccolissime dimensioni riguardano un numero crescente di applicazioni come la litografia con UV, l'impiego dei nanotubi e dei fullereni, la deposizione di film sottili su vetri o metalli, l'uso di fibre ottiche per telecomunicazioni, "l'electron tunneling", tecniche associate alla micro-meccanica e alla farmacologia ecc.<sup>5</sup>.

#### 4.2 - I problemi della riferibilità metrologica nel settore ambientale e sanitario

Le misure fatte per scopi medici e per la salvaguardia ambientale (ad es. le misure di colesterolo nel sangue o di polveri e gas nell'aria, di radiazioni ionizzanti in campo medico e ambientale) sono anch'esse sempre più numerose e di vasta tipologia. Queste misure riguardano in particolare:

- la diagnostica e la terapia medica (ad es. le analisi cliniche in diagnostica e la dosimetria in radioterapia);
- il controllo della presenza di agenti chimici o biologici nocivi negli alimenti o di sostanze estranee nell'organismo umano (antidoping);
- il controllo della presenza di contaminanti chimici o fisici nell'aria o nelle acque (ad es. misura delle concentrazioni di gas nocivi, di particolato ecc.);
- la verifica della presenza di organismi geneticamente modificati (OGM) negli alimenti;
- la verifica dei livelli di rumore, fumo, vibrazioni, ecc. in ambienti di lavoro o pubblici;
- il monitoraggio del cambio climatico globale mediante la misura (oltre che del-

le temperature) di parametri quali gas serra, ozono ecc.;

- le biotecnologie (biologia cellulare, biochimica, chimica delle proteine, biologia molecolare) nelle diverse aree applicative (medicina, analisi qualitative e quantitative, industria, controlli fiscali e forensi ecc.).

Molte di queste misure (in particolare quelle basate su metodi chimici e chimico-biologici) non hanno ancora la medesima qualità metrologica di quella raggiungibile nella misure di grandezze fisiche (ad es. massa, lunghezza, tempo ecc.) per le quali si dispone sia di accurati campioni di riferimento sia di consolidate procedure di taratura per gli strumenti usati nelle misure correnti. Per molte misure di tipo chimico non sono sempre disponibili campioni di riferimento, non sempre i possibili sistemi campione sono confrontati a livello internazionale e quindi universalmente accettati come sistemi di riferimento; in altri casi essi non sono ancora univocamente definibili in quanto a tale scopo potrebbero essere seguiti approcci concettuali fra loro diversi. Stante questa situazione, autorità a livello nazionale e internazionale<sup>6, 7, 8</sup> da tempo sono impegnate a stimolare l'attuazione dei processi di riferibilità per le determinazioni di tipo chimico, con la messa a punto di campioni e di procedure di misura adeguati alle principali nuove esigenze di determinazioni quantitative.

D'altra parte anche per le misure in campo medico e ambientale è necessario avere un'adeguata accuratezza, in termini di riproducibilità, confrontabilità e credibilità dei risultati ottenuti in tempi e in luoghi diversi. Un risultato non affidabile in questo settore di misure può avere infatti non solo conseguenze di ordine sanitario ma anche di natura economica: basti pensare alle implicazioni conseguenti ai blocchi del traffico o alle cure mediche quando questi provvedimenti sono basati su risultati di misure non corretti. Pertanto molta parte

**Tabella 1** - Alcuni esempi di analisi di tipo chimico-fisico (per analisi cliniche, o per misure di Contaminanti/sostanze nocive in matrici ambientali e alimentari) per le quali sono iniziati studi di riferibilità metrologica a livello internazionale da parte del BIPM e di Istituti metrologici nazionali<sup>9</sup>

| Diagnostica medica                     | Alimenti                                 | Ambiente  | Biotecnologie(*)                              |
|--|--|---|---|
| Colesterolo nel sangue                 | Pb nel vino                              | Cd e Pb nell'acqua potabile                               | Estrazione del DNA                            |
| Glucosio nel sangue                    | As nei frutti di mare                    | Gas serra CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> nell'ambiente | Quantificazione del DNA                       |
| Creatina nel sangue                    | Elementi (e.g. Cu, Cd,Zn) nel vino       | Emissioni di SF6 e CFC                                    | Quantificazione del rapporto peptidi/proteine |
| Elementi in traccia (Pb,Se) nel sangue | As, Se, Hg, Pb, metil-Hg nel tonno       | Ozono nell'aria   |   |
| Calcio nel siero                       | Cd, Zn nel riso                          | Pb/Cd nei sedimenti                                       |   |
| Droga nell'urina                       | Gamma HCH/p,p - DDT nel pesce            | Metalli negli scarti di miniere rocciose                  |   |
| Steroidi anabolizzanti nell'urina      | Contaminanti organici nelle cozze        | Umidità nei combustibili fossili                          |   |
| Ormoni nel sangue                      | Metil-mercurio nel salmone               | PAH nei terreni e nei sedimenti                           |   |
|  | Elementi in traccia nella farina di soia | Emissioni di SO <sub>2</sub> in impianti industriali      |   |
|  | Antibiotici nella carne                  |   |   |
|  | Ormoni della crescita nella carne        | Zolfo nei combustibili                                    |   |
|  | Vitamine e minerali                      | Etanolo in matrici acquose                                |   |

La metrologia riguardante le biotecnologie è sempre più importante per la crescente quantità di misure nel settore (9). Il suo obiettivo è di rendere riproducibili, affidabili e confrontabili metodi di misura basati su tecniche molto diversificate (NMR, spettroscopia a fluorescenza, spettrometria di massa, cromatografia su liquidi ecc.), per i quali non esistono campioni di riferimento in senso tradizionale e per molti dei quali non si ha ancora un adeguato livello di standardizzazione.

dell'attività di ricerca metrologica è oggi dedicata alla soluzione di questo problema di riferibilità, strettamente connesso all'affidabilità delle misure nei settori dell'ambiente, e della salute e alla loro reciproca accettabilità sul piano internazionale. Nella tabella 1 sono riportate alcune tipologie di misura per le quali il CIPM e il BIPM (figura 4) ha da tempo iniziato un'attività di studio e di standardizzazione affinché per tali misure si possano realizzare dei riferimenti campione<sup>9</sup>. Questo studio è condotto prevalentemente dagli istituti metrologici nazionali di diversi paesi e ha come obiettivo la possibilità di certificare in modo univoco, e uniforme a livello internazionale, l'affidabilità delle misure anche nel settore chimico-fisico d'interesse in campo medico e ambientale. La misura delle radiazioni ionizzanti è invece quel settore, fra le misure in campo medico e ambientale, in cui negli anni recenti si è già raggiunta una ragguardevole affidabi-

lità. Ciò è principalmente dovuto alla ricerca e allo sviluppo che negli ultimi anni si sono avuti sui metodi sperimentali per effettuare misure assolute e per realizzare quindi idonei campioni primari di riferimento. Della metrologia delle radiazioni ionizzanti si descriveranno più oltre i principali sviluppi, in relazione a quanto è stato realizzato a tutt'oggi presso l'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti dell'ENEA.

## 5. Costi-benefici derivanti dallo sviluppo dei programmi metrologici

I costi legati alle operazioni di misura nelle attività industriali, commerciali, sanitarie, ambientali ecc., di un paese sviluppato ammontano a valori stimati fra il 3% e il 6% del suo PIL<sup>10</sup>. Una parte ridotta, ma essenziale, di questi costi riguarda lo sviluppo e il mantenimento delle attività metrologiche nel paese, quale prerequisito per

l'affidabilità di tutti i processi di misura. Il ritorno economico degli investimenti sulle attività metrologiche è stato quantificato, ed è di sensibile entità. I paesi che investono una percentuale dello 0,006% del loro PIL in metrologia sono in grado di raggiungere un più avanzato sviluppo di quelli il cui corrispondente investimento è solo di un quarto inferiore (4). Esempi in questa direzione sono quelli degli Stati Uniti d'America, Singapore e la Repubblica di Corea in relazione ai processi di misura richiesti per lo sviluppo nei settori delle nuove tecnologie, della produzione alimentare, dei farmaceutici, della salute (misure cliniche e strumentazione associata). In quest'ultimo settore, ad esempio, il beneficio derivanti dai costi metrologici (richiesti per realizzare campioni di riferimento per le diverse tipologie di misura) è stato analizzato da diversi studi del NIST<sup>11, 12, 13</sup>. Si è valutato al riguardo che una sovrastima (dovuta a errore) del 3% nelle misure di colesterolo può dar luogo a un incremento del 5% di risultati falsi positivi che, a loro volta, determinano controlli ripetuti (con costi aggiuntivi) o interventi medici (di cui non vi è in realtà necessità). In generale anche piccoli errori in questo campo possono dar luogo a costi indebiti sia in termini economici che di tipo sanitario. In USA, in particolare, la spesa legata alla cura della salute umana (circa 1.300 miliardi di dollari annui) è circa il 14% del PIL (con riferimento al 2001). I citati studi del NIST evidenziano inoltre che il 10% di questa spesa è dovuta a costi per misurazioni (per diagnostica clinica e terapia) e che circa il 30% di questi ultimi costi potrebbe essere risparmiato se si evitasse di ripetere misurazioni a seguito di errori o del mancato uso di procedure standardizzate e basate su campioni di riferimento. La conclusione è che gli investimenti nelle infrastrutture metrologiche nazionali siano fra quelli a più elevato ritorno in termini di benefici<sup>14, 15</sup>. Anche la Commissione Europea ha avviato uno stu-

dio sul rapporto costi-benefici per le attività di misura e prova nei paesi sviluppati<sup>16</sup>. Lo studio esamina in particolare i settori delle nanotecnologie, dell'industria automobilistica e farmaceutica, dei controlli sull'inquinamento ambientale, della diagnostica medica. Da questo rapporto si apprende che nell'UE si spendono circa 83 miliardi di euro per misure e prove nei diversi settori di attività. Ad esempio, circa 13 miliardi di euro annui sono spesi per attività legate a misure e prove in campo sanitario e circa 5 miliardi di euro annui per misure legate ai controlli delle emissioni nocive nel settore automobilistico. La metrologia, quale prerequisito per l'affidabilità delle misure in tutti i settori di attività, emerge da quest'analisi come fattore essenziale affinché questa non trascurabile spesa non sia affetta da sprechi e sia ottimizzata con positivi ritorni di natura economica e sanitaria. In definitiva, gli istituti metrologici nazionali, soprattutto quelli nei paesi più sviluppati, hanno un impatto sempre più marcato sulla competitività nazionale e internazionale e sulla qualità della vita nel proprio paese.

## 6. La metrologia negli scambi internazionali e i recenti accordi multilaterali nel settore

Fra le cause che tradizionalmente hanno dato luogo a barriere commerciali negli scambi internazionali vi è sempre stata la mancanza di un reciproco riconoscimento dei risultati di misure e di prove tese a certificare la reale rispondenza di un prodotto (o servizio) alle caratteristiche denunciate. Alla base di questo problema vi è stata la non immediata accettazione dei certificati di taratura (degli strumenti di misura) emessi dagli istituti metrologici nazionali dei diversi paesi. Analogamente si è posto tradizionalmente per i certificati di prova (di strumenti, materiali e prodotti vari) a causa della non comparabilità dei metodi di prova seguiti nei rispet-



tivi paesi. Ciò ha sempre avuto come conseguenza la ripetizione di misure e prove nei paesi importatori/esportatori con un evidente aggravio di costi, di ritardi e di contenziosi sui risultati.

Un importante evento finalizzato ad eliminare le barriere tecniche al libero scambio di beni e servizi, ha avuto luogo a Parigi il 14 ottobre 1999: la firma di un Accordo di Mutuo Riconoscimento (MRA) relativo ai campioni, alle misure e alle tarature<sup>17</sup>. Tale accordo è stato firmato dai responsabili degli istituti metrologici nazionali (per l'Italia erano rappresentati l'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris, l'Istituto di Metrologia Gustavo Colonnetti, del CNR e l'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti, dell'ENEA) con incarico ad essi conferito dalle autorità nazionali (per l'Italia i Ministeri delle Attività Produttive e degli Esteri). La sigla MRA denota l'Accordo di mutuo riconoscimento dei campioni nazionali di misura e dei certificati di taratura e misura emessi dagli Istituti Metrologici Nazionali. L'accordo specifica, in un ampio e dettagliato testo i vincoli da rispettare per il mutuo riconoscimento della validità dei campioni nazionali e dei certificati di taratura ad es-

si riferiti e impegna quindi ciascun paese firmatario a mantenere l'operatività degli istituti metrologici nazionali ai livelli prescritti. L'accordo ha dunque lo scopo di fornire ai governi un fondamento tecnico per ridurre le barriere negli scambi internazionali riguardanti: attività produttive e commerciali, dati ambientali; sanitari; statistici e tutto ciò che sia dedotto da un processo di misurazione e che attenga all'attuazione dei Sistemi Qualità nella produzione, nei servizi, nella pubblica amministrazione. L'MRA fissa le condizioni alle quali si possono accettare i certificati di taratura, di misurazione e di prova emessi dagli Istituti Metrologici Nazionali e dai laboratori ed organismi accreditati in altri paesi. La validità di questo accordi è quindi legata all'accuratezza dei campioni di misura nazionali e dei certificati di taratura e di misura emessi dagli Istituti Metrologici Nazionali. A questo scopo gli Istituti Metrologici Nazionali devono: a) effettuare periodicamente, sotto il controllo di organismi internazionali nel settore (BIPM, EUROMET ecc.), misure e confronti internazionali tesi a stabilire il grado di equivalenza dei campioni nazionali di misura sviluppati in ciascun paese; b) comprovare a

**Figura 5**

La pubblicazione riportata in figura (consultabile al sito in rif. 2) descrive i termini dell' "Accordo di mutuo riconoscimento dei campioni nazionali di misura e dei certificati di taratura e misura emessi dagli istituti metrologici nazionali" (MRA)





a livello internazionale le proprie capacità di taratura e misura (CMC); c) attuare un idoneo *Sistema Qualità* a dimostrazione e supporto dei propri metodi sia sul piano tecnico che organizzativo. Al fine di consentire una armonizzazione dei diversi sistemi di qualità in attuazione della norma ISO/IEC 17025, gli istituti metrologici europei partecipano alle iniziative del Quality System Forum dell'EUROMET e al progetto INITIATION della Comunità Europea.

Il testo dell'MRA, i firmatari dell'accordo, i risultati dei periodici confronti internazionali fra gli istituti metrologici, le capacità di taratura e misura validate dalla comunità metrologica internazionale per ciascun istituto nazionale, sono consultabili al sito web del BIPM: [www.bipm.org](http://www.bipm.org). Una sintesi in italiano del testo dell'MRA è riportata in<sup>18</sup>.

L'accordo internazionale sulla metrologia ora descritto, avrebbe rischiato di vedere compromesse le sue finalità se il sistema di validazione e controllo che l'MRA esercita sugli Istituti Metrologici Nazionali non si fosse esteso anche ai Centri di Taratura. Questi sono laboratori idoneamente attrezzati e con competenti risorse umane, i quali sono accreditati per effettuare la taratura degli strumenti di misura. In ciascun paese, gli Istituti Metrologici Primari sono impegnati prevalentemente nell'attività di ricerca e sviluppo sui campioni primari di misura e nel mantenimento della loro efficienza tramite continue intercomparazioni internazionali. Si tratta di un impegno che non consentirebbe di soddisfare contemporaneamente anche le quotidiane richieste di taratura provenienti da tutto il territorio nazionale. L'attività di taratura degli Istituti Metrologici Nazionali è per forza di cose limitata solo ad alcune tipologie di taratura, laddove la gran parte delle esigenze in questo campo viene soddisfatta per l'appunto dai Centri di Taratura. Questi laboratori devono poter essere accreditati per svolgere questa funzione. Il pro-

cesso di accreditamento è svolto in ogni paese dal proprio organismo di accreditamento competente con il coinvolgimento del rispettivo Istituto Metrologico Nazionale. L'organismo italiano per l'accreditamento dei Centri di Taratura è il SIT (Servizio di Taratura in Italia)<sup>19</sup>. Esistono analoghi organismi negli altri paesi. Tali organismi si coordinano a livello europeo tramite l'EA (European cooperation for Accreditation, e a livello extraeuropeo tramite l'ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation). Anche questi organismi di accreditamento internazionali<sup>20, 21</sup> hanno siglato specifici accordi multilaterali che, per i Centri di Taratura, hanno finalità analoghe (uniformità di regole, verifiche delle capacità tecniche, affidabilità ecc.) a quelle che ha l'MRA per gli Istituti Metrologici Primari. Grazie a questi accordi, l'operazione di accreditamento fornisce una condizione di garanzia della esistenza, verificata a livello internazionale, di mezzi tecnici e procedure che comprovano l'equivalenza dei certificati emessi. L'obiettivo di questa operazione è di ottenere misure credibili e accettabili ovunque, diminuendo l'importanza di continue, costose e spesso non necessarie azioni di misura e di certificazione condotte ripetitivamente nei vari paesi.

Tutto ciò in definitiva fornisce agli utilizzatori una garanzia aggiuntiva dei prodotti e dei servizi che, acquisendo una accettazione valida internazionalmente, possono circolare liberamente nel mercato mondiale, attenuando gli effetti di eventuali barriere commerciali.

## 7. La struttura della metrologia in Italia e il ruolo dell'ENEA in questo settore

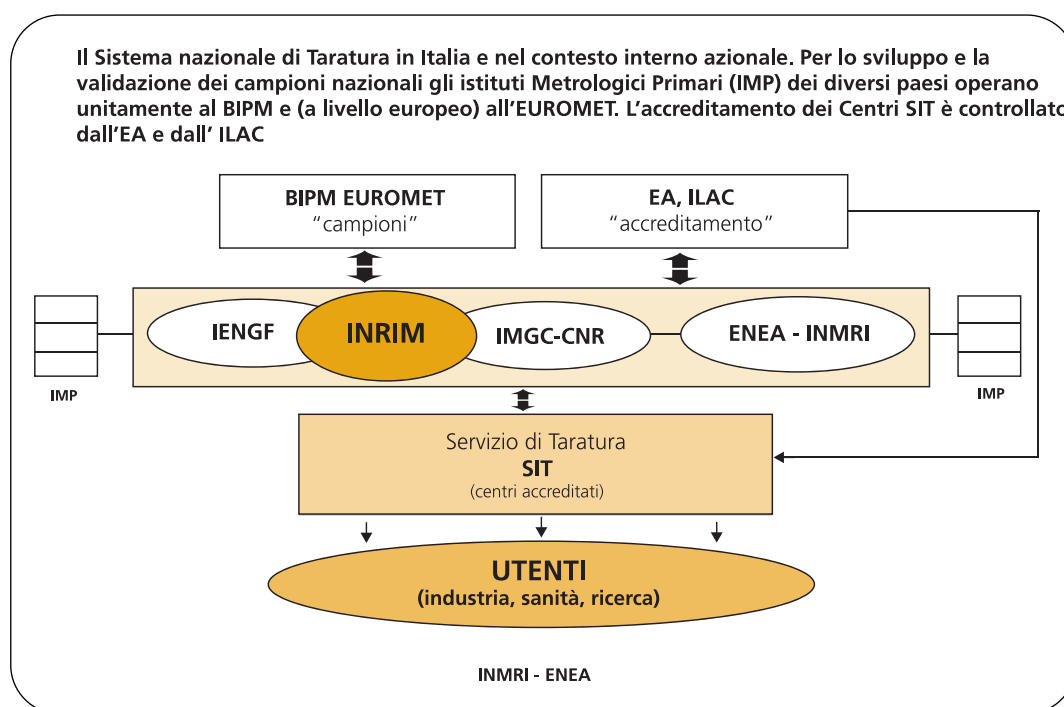
In ogni paese sviluppato esiste un Istituto Metrologico Nazionale (NMI) avente il compito ufficiale di sviluppare il sistema di riferimento primario per la misura di tutte le grandezze d'interesse. Un tale sistema è

costituito, come si è sopra descritto, dai campioni nazionali delle unità di misura delle diverse grandezze. L'Italia, pur essendo uno dei paesi firmatari del primo accordo metrologico internazionale (la "Convention du Mètre" del 1875, v. sopra), solo negli anni recenti ha formalmente istituito il proprio sistema metrologico nazionale. In precedenza i campioni di riferimento per le diverse tipologie di misura erano stati sviluppati e resi disponibili per la taratura degli strumenti di misura nel Paese solo in un ambito scientifico e volontaristico. Entro questo ambito operavano infatti tradizionalmente l'Istituto di Metrologia G. Colonnetti (IMGC) del CNR, l'Istituto Elettrotecnico Nazionale G. Ferraris (IEN) e successivamente il Laboratorio di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti (LMRI) dell'ENEA. Ciascuno di questi tre organismi era di fatto riconosciuto a livello nazionale e internazionale come l'istituzione detentrica dei campioni primari di misura nei rispettivi settori di competenza: l'IMGC del CNR per le misure termiche, meccaniche ecc., l'IEN nel settore elettrotecnico, del tempo, ecc., il LMRI dell'ENEA per le misure delle radiazioni ionizzanti. Nessuno di questi tre organismi

aveva tuttavia il riconoscimento formale di istituto metrologico nazionale da parte della legislazione italiana. Questa carenza legislativa, che rendeva l'Italia unica eccezione nell'ambito dei paesi sviluppati (tutti dotati di un proprio istituto metrologico nazionale riconosciuto per legge), venne colmata con l'approvazione della legge n. 273, 11 agosto 1991, che istituisce il sistema metrologico nazionale. L'importanza pratica di questo atto legislativo può essere misurata dal fatto che, in sua assenza, ciascuno in Italia avrebbe potuto in linea di principio rivendicare il ruolo di detentore dei campioni primari di misura facendo quindi venir meno il fondamentale requisito in base al quale i campioni nazionali di ciascuna unità di misura devono essere, per definizione, unici per ciascun paese. La legge n. 273/1991 riconosce il ruolo di fatto svolto dai tre organismi citati designando ciascuno di essi quale istituto metrologico primario nel proprio settore di competenza. Nel 2006 gli istituti IMGC-CNR ed IEN sono stati accorpati in un unico organismo, l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), e quindi gli istituti metrologici primari in Italia sono attualmente: INRIM ed IN-

**Figura 6**

Il sistema nazionale di taratura in Italia è costituito dagli istituti metrologici nazionali, INRIM (nel quale sono di recente confluiti i due istituti metrologici IENGF e IMGC-CNR) ed INMRI-ENEA, e dai centri di taratura SIT



MRI-ENEA operanti nei rispettivi settori di competenza. A questi due istituti fa capo la rete dei centri secondari di taratura operante nell'ambito del Servizio di Taratura in Italia (SIT). Questi centri sono laboratori autorizzati, in quanto tecnicamente e organizzativamente idonei, ad effettuare la taratura di strumenti di misura nei diversi settori d'interesse, in quanto accreditati dal SIT e riconosciuti perciò a livello internazionale. I centri SIT hanno, fra gli altri obblighi, quello di tarare periodicamente i loro campioni secondari rispetto ai corrispondenti campioni primari sviluppati presso ciascuno dei due istituti metrologici nazionali di competenza. Il sistema nazionale di taratura, costituito dagli istituti metrologici primari e dai centri SIT ad essi riferibili (si veda lo schema in figura 6), può emettere certificazione di taratura riconosciuta a livello in-

ternazionale grazie al fatto che esso soddisfa i requisiti scientifici e organizzativi previsti dall'accordo internazionale di mutuo riconoscimento (MRA) sopra citato. Questo tipo di certificazione di taratura è l'unico ad essere riconosciuto per l'attuazione dei Sistemi di Qualità che oggi tutti i laboratori che forniscono prestazioni scientifiche all'esterno (in campo industriale, sanitario, ecc.) sono ormai chiamati ad adottare. Nell'ambito del Sistema Nazionale di Taratura, l'ENEA ha dunque il ruolo di Istituto Metrologico Primario nel settore delle radiazioni ionizzanti e questo ruolo è svolto dall'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti (INMRI). L'INMRI è un istituto costituito dall'ENEA nel 1991 presso il Centro Ricerche della Casaccia come evoluzione del Laboratorio di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti. Questo laborato-

**Tabella 2 - Grandezze e unità SI per la misura delle radiazioni ionizzanti**

| Grandezza   | Nome (simbolo)  | Nome speciale (simbolo)         |
|---|---|---------------------------------|
| Esposizione (per raggi X e $\gamma$ )   | coulomb al kilogrammo (C/kg)                            |                                 |
| Energia specifica   | joule al kilogrammo (J/kg)                              | gray (Gy)                       |
| Dose assorbita, kerma   | joule al kilogrammo (J/kg)                              | gray (Gy)                       |
| Equivalente di dose, equivalente di dose ambiente, equivalente di dose direzionale, equivalente di dose personale                                     | joule al kilogrammo (J/kg)                              | sievert (Sv)                    |
| Rateo di dose assorbita, rateo di kerma   | joule al kilogrammo al secondo (J/kg s)                 | gray al secondo (Gy/s)          |
| Rateo di equivalente di dose, rateo di equivalente di dose ambiente, rateo di equivalente di dose direzionale, rateo di equivalente di dose personale | joule al kilogrammo al secondo (J/kg s)                 | sievert al secondo (Sv/s)       |
| Attività (di un radionuclide)   | secondo alla meno uno ( $s^{-1}$ )                      | becquerel (Bq)                  |
| Concentrazione di attività (di un radionuclide)   | secondo alla meno uno al kilogrammo ( $s^{-1}kg^{-1}$ ) | becquerel al kilogrammo (Bq/kg) |
| Fluenza di particelle   | metro alla meno due ( $m^{-2}$ )                        |                                 |
| Rateo di fluenza di particelle  | metro alla meno due al secondo ( $m^{-2}/s$ )           |                                 |
| Rateo di emissione di particelle  | secondo alla meno uno ( $s^{-1}$ )                      |                                 |

**Tabella 3** - I campioni nazionali per la misura delle radiazioni ionizzanti operanti presso l'INMRE-ENEA e le rispettive grandezze SI di cui questi campioni realizzano l'unità di misura. Le caratteristiche dei sistemi campione sono descritte nel D. M. n. 591/1991<sup>6</sup>. Nella tabella sono riportati anche gli intervalli di misura, i livelli di accuratezza e i tipi di radiazione per la cui misura i campioni sono stati progettati

| Grandezza fisica  | Campione  | Radiazione di riferimento   | Intervallo di accuratezza (s) | Intervallo di misura  |
|---|---|---|-------------------------------|---|
| Esposizione (#)   | •Camera a ionizzazione ad aria libera per basse energie   | Raggi x 10-50 kV  | 0,5 - 1                       | (3 10 <sup>-8</sup> - 2 10 <sup>-4</sup> ) C kg <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> |
|   | •Camera a ionizzazione ad aria libera per medie energie   | Raggi x 60-300 kV   | 0,5 - 1                       | (2 10 <sup>-8</sup> - 9 10 <sup>-6</sup> ) C kg <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> |
|   | •Camera a ionizzazione di trasferimento **  | Radiazione gamma del <sup>137</sup> Cs  | 0,8 - 1,3                     | (2 10 <sup>-8</sup> - 9 10 <sup>-6</sup> ) C kg <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> |
|   | •Camera a ionizzazione a cavità con pareti di grafite   |   |                               |   |
| Kerma in aria (#)   | •2 Camere a ionizzazione ad aria libera per basse e medie energie con procedure di conversione esposizione/kerma  | Raggi x 10-50 kV e 60-300 kV  | 0,5 - 1                       | (1 10 <sup>-7</sup> - 7 10 <sup>-3</sup> ) Gy s <sup>-1</sup>                 |
|   | •Camera a ionizzazione di trasferimento con procedura di conversione esposizione/kerma **   | Radiazione gamma del <sup>137</sup> Cs  | 0,8 - 1,3                     | (7 10 <sup>-7</sup> - 3 10 <sup>-4</sup> ) Gy s <sup>-1</sup>                 |
|   | •Camera a ionizzazione a cavità con pareti di grafite con procedura di conversione esposizione/kerma  | Radiazione gamma del <sup>60</sup> Cs   | 0,5                           | (2 10 <sup>-4</sup> - 7 10 <sup>-3</sup> ) Gy s <sup>-1</sup>                 |
| Equivalente di dose ambiente, direzionale e personale (#) | •2 Camere a ionizzazione ad aria libera per basse e medie energie con fantocci per l'irraggiamento e procedura di conversione kerma/equivalente di dose | Raggi x 10-50 kV e 60-300 kV  | 0,5 - 1                       | (8 10 <sup>-7</sup> - 8 10 <sup>-3</sup> ) Sv s <sup>-1</sup>                 |
|   | •Camera a ionizzazione a cavità con fantocci per l'irraggiamento e procedura di conversione kerma/equivalente di dose                                   | Radiazione gamma del <sup>60</sup> Co   | 0,5                           | (2 10 <sup>-4</sup> - 8 10 <sup>-3</sup> ) Sv s <sup>-1</sup>                 |
| Dose assorbita: in grafite in acqua (#)                   | •Calorimetro in grafite   | Radiazione gamma del <sup>60</sup> Co   | 0,5 - 0,7                     | (2 10 <sup>-3</sup> - 2 10 <sup>-2</sup> ) Gy s <sup>-1</sup>                 |
|   | •Calorimetro ad acqua (in fase sperimentale)  | " " "   |                               |   |
|   | •Calorimetro in grafite e camera a ionizzazione a cavità in fantoccio d'acqua   | " " "   |                               |   |
| Dose assorbita: in materiali tessuto equivalenti (#)      | •Camera a ionizzazione ad estrapolazione  | sorgenti beta di <sup>204</sup> Tl, <sup>147</sup> Pm, <sup>90</sup> Sr/ <sup>90</sup> Y e <sup>85</sup> Kr | 3                             | (3 10 <sup>-7</sup> - 5 10 <sup>-4</sup> ) Gy s <sup>-1</sup>                 |
| Kerma in aria di riferimento (#)                          | •Camera a ionizzazione di trasferimento con procedura di conversione esposizione/kerma rif. **  | Radiazione gamma del <sup>192</sup> Ir  | 1,1                           | (1 10 <sup>-4</sup> - 7 10 <sup>-3</sup> ) Gy s <sup>-1</sup>                 |
| Emissione di neutroni                                     | •Bagno al solfato di manganese  | Sorgenti di neutroni di Am-Be e <sup>252</sup> Cf   | 0,4                           | (10 <sup>5</sup> - 10 <sup>7</sup> ) s <sup>-1</sup>                          |
|   | •Contatore Lungo (Long Counter) *   | " " "   | 0,7                           | (10 <sup>3</sup> - 10 <sup>7</sup> ) s <sup>-1</sup>                          |
| Neutron Flux Density                                      | •Campione di densità di flusso di neutroni termici **   | Neutroni termici  | 0,8                           | 1,2 10 <sup>4</sup> cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>                          |
| Attività  | •Sistema di conteggio a coincidenza 4πβ-γ   | Emettitori β e β-γ  | 0,1 - 3                       | (1 - 20) kBq  |
|   | •Rivelatori a NaI a pozzetto  | Emettitori γ-γ e <sup>222</sup> Rn  | 0,5 - 3                       | (1 - 20) kBq  |
|   | •Camera a ionizzazione ad alta pressione*   | Emettitori γ  | 0,2 - 3                       | (10 - 2 10 <sup>4</sup> ) kBq   |
|   | •Spettrometro gamma HPGe *  | Emettitori γ  | 1 - 5                         | (1 - 10 <sup>5</sup> ) Bq   |
|   | •Cella elettrostatica   | Radiazione del <sup>222</sup> Rn  | 1                             | (1 - 15) kBq  |
| Concentrazione di attività                                | •Camere radon di diverso volume   | Radiazione del <sup>222</sup> Rn (e figli)  | 2 - 10                        | (10 <sup>2</sup> - 10 <sup>4</sup> ) Bq/m <sup>3</sup>                        |

\* Campione secondario di alta precisione.

\*\* Sei sorgenti di neutroni Am-Be con moderatori di grafite e polietilene, con metodo di misura per attivazione neutronica dell'oro.

(s) Valori corrispondenti alla incertezza tipo composta (1σ) in %.

(#) L'intervallo di misura è riferito al rateo della grandezza, poiché tale riferimento può essere più significativo.

rio, nato nel 1980, scaturiva a sua volta da un'attività nel settore metrologico svolta nell'ente sin dai primi degli anni settanta.

Prima del 1991 l'attività metrologica svolta dall'ENEA, pur non dettata da alcun compito di legge, si poneva comunque l'obiettivo di sviluppare sistemi di misura campione nel campo delle radiazioni ionizzanti. Si intendeva in tal modo realizzare le condizioni tecnico-scientifiche per svincolare il paese da una sudditanza economica e tecnologica, essendo necessario, prima di allora, rivolgersi a istituti metrologici all'estero per la taratura di strumenti di misura delle radiazioni ionizzanti.

Sulla base del livello qualitativo comprovato a livello internazionale e sulla base dell'unicità delle attività di questo laboratorio in ambito nazionale, l'ENEA veniva poi designato, nel corso della iniziativa legislativa sull'organizzazione della metrologia in Italia, come uno dei tre istituti metrologici primari nazionali.

Per assolvere il compito di istituto metrologico nazionale l'ENEA, tramite l'INMRI, svolge attività di ricerca e sviluppo per realizzare i campioni nazionali per la misura delle radiazioni ionizzanti.

L'esistenza di questi sistemi campione è il presupposto per garantire a livello nazionale l'affidabilità delle misure delle radiazioni ionizzanti e la loro comparabilità a livello internazionale. Infatti i complessi di misura usati correntemente nel paese per le diverse esigenze forniscono risultati significativi solo se essi hanno la possibilità di essere tarati rispetto ai campioni nazionali di riferimento riconosciuti a loro volta a livello internazionale. L'insieme delle attività svolte dall'INMRI costituiscono il presupposto per l'affidabilità delle misure delle radiazioni ionizzanti e per l'attuazione dei Sistemi di Qualità nei seguenti settori:

- radioterapia e radiodiagnostica medica;
- radioprotezione in campo ambientale, ospedaliero e industriale;
- trattamento, sterilizzazione e diagnosi di materiali mediante radiazioni ionizzanti.

## 8. La domanda nazionale nel campo della metrologia delle radiazioni ionizzanti

L'attività metrologica svolta dall'INMRI-ENEA è essenziale per l'affidabilità delle misure delle radiazioni ionizzanti nel Paese, e in particolare per l'attuazione dei Sistemi Qualità, nei settori della medicina, della radioprotezione e della ricerca scientifica. Un presupposto essenziale per quest'affidabilità è infatti la taratura degli strumenti di misura che, nel settore delle radiazioni ionizzanti, è peraltro richiesta dalla normativa nazionale e internazionale. I soggetti che a livello nazionale necessitano regolarmente dell'attività dell'INMRI-ENEA (metodi di misura e certificazioni di taratura degli strumenti nel settore delle radiazioni ionizzanti) comprendono:

- i centri ospedalieri di radioterapia;
- le agenzie per la protezione ambientale (ARPA) di tutte le Regioni italiane;
- gli organismi centrali di vigilanza e controllo, in particolare l'APAT;
- gli organismi della protezione civile e della difesa;
- le industrie che impiegano o producono radioisotopi o strumenti di misura delle radiazioni ionizzanti;
- le università e i centri di Ricerca;
- i centri SIT (presso industrie ed enti pubblici) accreditati per la taratura di strumentazione radiologica.

I complessi sperimentali campione sviluppati - con le associate procedure di taratura - dall'INMRI-ENEA riguardano tutte le tipologie di misura delle radiazioni ionizzanti d'interesse nei settori sopra specificati. Le classi di strumenti di misura per i quali l'INMRI-ENEA ha realizzato i sistemi di taratura includono in particolare la strumentazione per:

- dosimetria per la radioterapia con fotoni, elettroni, protoni;
- dosimetria personale e ambientale per radiazione x, beta, gamma e neutronica.
- misura della radioattività in varie matrici ambientali (aria, acqua, terreni, ali-

- menti ecc.);
- misura della contaminazione radioattiva superficiale.

Nel paragrafo seguente è descritta brevemente la funzione e la tipologia degli apparati sperimentali studiati e messi a punto presso l'INMRI-ENEA per realizzare i campioni nazionali di misura delle radiazioni ionizzanti.

## 9. I sistemi di misura campione sviluppati dall'INMRI-ENEA per la misura delle radiazioni ionizzanti

I sistemi campione dell'INMRI-ENEA comprendono circa 20 linee sperimentali cui sono associati i relativi impianti d'irraggiamento (irradiatori per radiazione alfa, beta e gamma, macchine a raggi x, sorgenti neutroniche, sorgenti dei più importanti radionuclidi incluso il radon, un acceleratore "Microtrone" da 20 MeV. Con questi apparati sperimentali è possibile effettuare la misura assoluta delle grandezze del Sistema Internazionale (SI) relative alle radiazioni ionizzanti ed elencate nella tabella 2. I sistemi campione consentono quindi di realizzare l'unità di misura di riferimento per ciascuna di queste grandezze. Le unità di misura SI realizzate presso l'INMRI-ENEA sono poi trasferite, tramite i processi di taratura, dai campioni nazionali agli strumenti di misura normalmente usati per scopi pratici. La misura delle grandezze fisiche per gli scopi pratici correnti è sempre basata, in tutti i settori di misura, sull'uso di strumenti tarati (rispetto ai propri campioni di riferimento). Una misura assoluta è invece una misura che utilizza strumenti non tarati preventivamente rispetto a campioni della grandezza oggetto della misura. Una tale misura richiede che siano soddisfatte sperimentalmente le condizioni che sono alla base della definizione della grandezza d'interesse. I sistemi campione, una volta riconosciuti come campioni nazionali, sono unici in un dato paese poiché deve essere garantita l'unicità dell'unità di misura che

quel paese adotta. Questa unità di misura deve essere poi coerente con le analoghe unità realizzate e adottate negli altri paesi. L'unicità di questo riferimento non implica però che esso rimanga statico nel tempo: ciascun campione (relativo a ciascuna delle grandezze SI) è infatti oggetto di miglioramento continuo consentendo misure assolute e quindi unità di misura sempre più accurate. Tutto ciò si riflette sulla possibilità di effettuare misure sempre più accurate anche al livello dell'utente finale nelle diverse attività produttive, commerciali, scientifiche, sanitarie ecc..

Per far fronte ai diversi tipi di misure richieste nei diversi settori d'interesse (si veda par. 7) è necessario disporre di un ampio numero di campioni primari.

Questi apparati sperimentali sono elencati nella tabella 3 unitamente alle grandezze di cui realizzano l'unità di misura SI<sup>3</sup>, all'intervallo di misura e all'accuratezza corrispondente. Il sistema dei campioni nazionali consente la misura assoluta di grandezze quali: la dose assorbita, l'esposizione, l'equivalente di dose (nelle sue diverse accezioni), la concentrazione di attività di radionuclidi (incluso il radon e la sua progenie), la fluenza di neutroni, ecc. I diversi tipi di campioni primari e di metodi di taratura sviluppati presso l'INMRI-ENEA sono in grado di far fronte a tutte le principali esigenze nei vari settori di misura quali la radioterapia, radiodiagnostica, radioprotezione, trattamento di materiali con alte dosi ecc.. L'INMRI-ENEA ha il compito di mantenere e sviluppare le caratteristiche di questi apparati di misura ai livelli qualitativi che gli accordi internazionali sulla metrologia primaria impongono.

Le caratteristiche e le funzioni di ciascuno di questi apparati di misura campione, necessari per poter effettuare la taratura degli strumenti di misura correntemente usati per la misura di radiazioni ionizzanti, sono riportate nel decreto ministeriale 591/1993 che elenca e descrive tutti i campioni pri-

*segue a pag. 97*



### Scheda 1 - I campioni primari realizzati presso l'ENEA per la misura della "esposizione", una grandezza di largo uso nella misura delle radiazioni ionizzanti

Fra le diverse grandezze fisiche introdotte nel Sistema Internazionale (SI) per la misura delle radiazioni ionizzanti, la grandezza "esposizione" è di particolare importanza. L'esposizione misura la capacità di ionizzare l'aria da parte della radiazione x e gamma. Una volta nota la quantità di ionizzazione (ovvero la carica elettrica) prodotta in una data massa di aria da parte di questo tipo di radiazione, è possibile determinare il valore di un'ulteriore grandezza, la "dose assorbita", legata all'energia che quella medesima radiazione può cedere a una massa di qualsiasi altro mezzo diverso dall'aria (ad esempio un organismo biologico). L'importanza della dose assorbita deriva dal fatto che essa è direttamente correlabile agli effetti biologici delle radiazioni ionizzanti, sia per le applicazioni in radioterapia sia per esigenze di radioprotezione. Per misurare l'esposizione è necessario usare strumenti opportunamente tarati. La taratura richiede il riferimento a uno specifico campione primario il quale effettua una misura assoluta della grandezza, cioè una misura che non necessita di alcuna taratura preventiva. Il campione in questione misura quindi la grandezza esposizione (il cui simbolo è X) sulla base della sua definizione:

$$X(P,E) = \frac{dQ}{dm}$$

dove  $dQ$  è la carica di un solo segno generata, in una massa  $dm$  di aria centrata nel punto P, da fotoni di energia E. E' richiesto inoltre che  $dQ$  sia la carica che si produce in aria quando tutti gli elettroni generati dai fotoni nella massa  $dm$  sono arrestati completamente in aria. In  $dQ$  non va incluso il contributo di carica prodotto dalla radiazione di frenamento (bremsstrahlung) degli elettroni secondari generati dai fotoni primari. L'unità di misura dell'esposizione nel Sistema Internazionale (SI) è il coulomb al chilogrammo (C/kg). In Italia il campione primario nazionale di esposizione realizzato presso l'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti dell'ENEA, è costituito da un gruppo di tre apparati sperimentali progettati per misure assolute alle diverse energie della radiazione. Questi sistemi di misura, basati tutti su particolari camere a ionizzazione, sono fra loro molto diversi essendo differenti le condizioni di misura dell'esposizione alle diverse energie della radiazione x e gamma.

La misura assoluta dell'esposizione è molto impegnativa a causa dei numerosi fattori correttivi da determinare (sia teorici che sperimentali) e dei piccoli valori di corrente (fino a  $10^{-16}$  A) che si devono poter misurare con la necessaria accuratezza (0,01%). I fattori correttivi sono necessari per tener conto delle differenti condizioni sperimentali rispetto a quelle richieste dalla definizione dell'esposizione.

Con particolari sistemi dosimetrici (le cosiddette camere a ionizzazione "a cavità") tarati per misurare l'esposizione, si può poi determinare la dose assorbita in acqua che è la grandezza d'interesse per la radioterapia. Per la conversione da esposizione a dose assorbita in acqua si fa ricorso alla cosiddetta "teoria della cavità" che attiene a uno specifico settore della fisica delle radiazioni ionizzanti.



**Figure 7 e 8**  
I sistemi campione "camera ad aria libera" (al centro della foto a destra) e "camera a cavità" (indicata dalla freccia nella foto a sinistra) realizzati presso l'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti dell'ENEA per la misura assoluta dell'esposizione dovuta, rispettivamente, a radiazione x con energia da 50 a 300 keV e a radiazione gamma da 1,25 MeV

## Scheda 2 - I campioni primari realizzati presso l'ENEA per la misura dell'attività dei radionuclidi

Le misure riguardanti i radionuclidi sono d'interesse in campo ambientale per poter monitorare la presenza di sorgenti radioattive nonché la loro variazione nel tempo e nelle diverse matrici ambientali (aria, terreni, alimenti ecc.). Le misure relative ai radionuclidi sono inoltre sempre più importanti in campo medico, sia per la radiodiagnostica (analisi PET e SPECT) sia per la radioterapia oncologica (brachiterapia). In quest'ultimo caso l'accuratezza di misura deve essere la più elevata possibile. La grandezza d'interesse per tutti questi tipi di misure è "l'attività" di un radionuclide, definita come: dove  $dN$  è il numero di trasformazioni nucleari spontanee che hanno luogo nel tempo  $dt$  in una determinata massa di un dato radionuclide (la sorgente radioattiva). Nota l'attività si può determinare l'energia emessa da una sorgente radioattiva nel suo processo di decadimento, una volta che siano conosciute le modalità con cui essa emette radiazione (lo schema di decadimento). Questa energia è poi importante per determinare la dose assorbita cioè la grandezza fisica correlata agli effetti biologici negli organismi che possono aver interagito con le radiazioni emesse dalla sorgente. L'unità di misura dell'attività nel Sistema Internazionale (SI) è il secondo alla meno uno ( $s^{-1}$ ). A questa unità è assegnato il nome speciale becquerel (Bq). Quindi 1 Bq è l'attività di una sorgente radioattiva che decade con una trasformazione nucleare al secondo.

Le misure di attività dei radionuclidi richiedono una grande varietà di strumenti (spettrometri, contaminametri, contatori con scintillatori solidi o liquidi, ecc.) ciascuno dei quali necessita di una specifica taratura. La taratura richiede a sua volta un campione primario in grado di effettuare una misura "assoluta" di attività, cioè una misura che non ha bisogno di alcuna taratura preventiva.

Anche i campioni primari per le misure di attività sono costituiti da apparati sperimentali di diverso tipo. Essi sono infatti progettati in funzione dello schema di decadimento che caratterizza un dato radionuclide (tipo di particelle emesse, energia e correlazioni temporali fra di esse, tempo di dimezzamento, ecc.). Per la categoria dei radionuclidi che decadono con emissione di radiazione beta e gamma in rapida successione temporale (praticamente in coincidenza rispetto alla risoluzione temporale del circuito di misura) uno dei principali campioni primari di attività è il "sistema di conteggio in coincidenza  $4\pi\beta-\gamma$ ". Con questo apparato sperimentale si determina l'attività di una sorgente da una misura della radiazione beta e gamma emessa dal radionuclide. Questa misura è particolarmente complessa a causa dei numerosi effetti fisici e strumentali che alterano il risultato della misura se non tenuti debitamente in conto.

Nota l'attività della sorgente ottenuta con il sistema campione, si possono realizzare ulteriori sorgenti - diverse per massa, forma e attività - da utilizzare per la taratura dei vari tipi di strumenti di misura di uso corrente.

Numerosi altri campioni sviluppati presso dell'Istituto per misure di attività sono basati su metodi di misura diversi. Fra questi, particolare importanza rivestono le camere radon dove vengono prodotte atmosfere con radon a diverse concentrazioni per la taratura dei sistemi di misura del radon ambientale.

### Figure 9 e 10

Nella foto a sinistra è mostrato un particolare di uno dei sistemi campione - il sistema di conteggio in coincidenza  $4\pi\beta-\gamma$  - realizzati presso l'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti dell'ENEA per la misura assoluta dell'attività dei radionuclidi. La foto a destra mostra il sistema campione camera radon (da circa 1000 litri) per la taratura dei sistemi di misura del radon



mari su cui è basato il Sistema Nazionale di Taratura. Nelle due schede seguenti sono delineati a titolo esemplificativo i metodi di misura su cui sono basati alcuni dei sistemi campione sviluppati presso l'INMRI-ENEA. I metodi sperimentali descritti riguardano due tipologie di misure assolute, fra loro molto diverse e sviluppate per soddisfare le esigenze di taratura in tre distinti settori applicativi: la radioprotezione, la radiodiagnostica medica e la radioterapia oncologica.

Questi sistemi di misura, come del resto tutti gli altri sistemi campione, sono oggetto di continua evoluzione in funzione della crescente richiesta di affidabilità delle misure e dello sviluppo delle conoscenze scientifiche nei rispettivi settori.

Una dettagliata descrizione dei compiti istituzionali, delle attività e delle attrezzature sperimentali dell'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti è riportata nel sito web dell'Istituto<sup>22</sup>.

## Bibliografia

1. National Conference of Standards Laboratories, NCSL International, Boulder CO, USA, [www.ncsli.org/](http://www.ncsli.org/).
2. Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), [www.bipm.org](http://www.bipm.org).
3. The International System of Units, Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), F-92312 Sèvres Cedex, France (1998), [www.bipm.org](http://www.bipm.org).
4. Evolving Needs for Metrology in Trade, Industry and Society and the role of the BIPM, Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), F-92312 Sèvres Cedex (France), 2003 (la pubblicazione è consultabile nel sito [www.bipm.org](http://www.bipm.org)).
5. European Union, The need for measurement and testing in nanotechnology, compiled by the High Level Expert Group on Measurement and Testing under the European Framework Programme for Research and Development, March 2002.
6. European Union, Council Directive 98/79/EC of the European Parliament and of the Council of 27 October 1998 on In Vitro Diagnostic Medical Devices, December 1998.
7. ISO 15189:2003, Medical Laboratories . Particular requirements for quality and competence, ISO, 2003.
8. European Union, Council Directive 96/23/EC on the performance of analytical methods and the interpretation of results, August 2002.
9. Consultative Committee for Amount of Substance, Report of the 10<sup>th</sup> Meeting Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), F-92312 Sèvres Cedex (France), 2004.
10. Quinn T.J., Metrology, its role in today's world, Report BIPM/94-5, Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), F-92312 Sèvres Cedex (France), 1994.
11. Leech D.P., The Economic Impacts of NIST Cholesterol Standards Program, NIST Planning Report 00-4, September 2000.
12. Semerjia H.G., Beary E.S., Impact of Metrology on the Economy and Quality of Life, International symposium on Measurement Standards 2002, Tokyo, April 2002.
13. Klee G.F., Requirements of physicians for standardized/comparable measurements; Impact on medical decisions, a study at the Mayo Clinic, USA, June 2002.
14. Swan G.M.P., The Economics of Measurement, Manchester, Manchester Business School of the University of Manchester, Report for NMS Review, June 1999.

15. Bowns S., Department of Trade and Industry National Measurement System Policy Unit, Review of the Rationale for and Economic Benefit of the U.K National Measurement System, PA Consulting Group, November 1999.
16. Williams G., The assessment of the economic role of measurements and testing in modern society, Oxford, United Kingdom, Pembroke College, University of Oxford, European Measurement Project funded under the GROWTH Programme by the DG-Research of the European Commission, July 2002.
17. Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes, Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), F-92312 Sèvres Cedex, France (BIPM) 1999, [www.bipm.org](http://www.bipm.org).
18. Molinar G., Gli accordi di mutuo riconoscimento, Tutto Misure, anno VI n. 4, 2002.
19. Servizio di Taratura in Italia (SIT), [www.sit-italia.it](http://www.sit-italia.it).
- 20- European co-operation for Accreditation (EA), [www.european-accreditation.org](http://www.european-accreditation.org).
21. International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC), [www.ilac.org](http://www.ilac.org).
22. Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti (INMRI-ENEA), [www.inmri.enea.it/](http://www.inmri.enea.it/).
23. R F Laitano, M P Toni, M. Pimpinella and M Bovi, Determination of the  $K_{wall}$  correction factor for a cylindrical ionization chamber to measure air-kerma in  $^{60}\text{Co}$  beams, *Phys. Med. Biol.* 47 (2411) 2002.
24. Attix F.H., Introduction to radiological physics and radiation dosimetry, John Wiley & Sons 1986.
25. International Atomic Energy Agency, Absorbed dose determination in photon and electron beams, an international code of practice, TRS 277, IAEA Vienna 1997.
26. National Council on Radiation Protection and Measurements, A Handbook of Radioactivity Measurements Procedures, NCRP Report 58, NCRP Bethesda MD USA, 1985.
27. De Felice P., Data acquisition System for the  $4\pi\beta(\text{PC})-\gamma$  coincidence-counting equipment and the gamma-ray spectrometers at the laboratory of ionizing radiation metrology of ENEA, *Applied Radiation and Isotopes* 38 No 10, 857, 1987.
28. Sahagia, M., Ivan, C., Grigorescu, E.L., Capogni, M., De Felice, P., Fazio, A., Standardization of  $^{65}\text{Zn}$  by  $4\pi\text{PC}-\gamma$  coincidence counting method with efficiency extrapolation, *Appl. Radiat. Isot.* 60, 423-427, 2004.
29. Guerra, A.S., Laitano, R.F., Pimpinella, M., Characteristics of the absorbed-dose-to-water standard at Enea, *Phys. Med. Biol.* 41, 657-674, 1996.
30. Seuntjens J. and Palmans H. Correction Factors and Performance of a  $4^\circ\text{C}$  Sealed Water Calorimeter, *Phys. Med. Biol.* 44 627-46, 1999.

Per informazioni:

*laitano@casaccia.enea.it*

# L' ENEA e le tecnologie per la salute

Ricerca nel settore biomedico e sviluppo di tecnologie per la diagnosi e la terapia sono tra le priorità di questo secolo. Collegare l'offerta di tecnologie e i risultati delle ricerche ENEA con la domanda del mondo ospedaliero e del sistema delle imprese può risultare una sfida vincente

## **DONATELLA TIRINDELLI**

con la collaborazione  
di Elena Fantuzzi,  
Gian Piero Gallerano,  
Antonella Lai, Carmela Marino,  
Elisabetta Nava, Luigi Picardi,  
Antioco Francesco Sedda

ENEA  
Dipartimento  
Biotecnologie, Agroindustria  
e Protezione della Salute

*Tratto da:* ENERGIA, AMBIENTE E INNOVAZIONE 5/06

I piani di ricerca a livello nazionale e internazionale indicano i temi della salute fra le priorità di ricerca e sviluppo tecnologico. Il VII Programma Quadro dell'Unione Europea pone una speciale attenzione "all'integrazione orizzontale" delle aree scientifiche prioritarie, privilegiando, quindi, quelle che intersecano temi diversi, e viene incoraggiato un approccio multidisciplinare.

Il tema salute dell'uomo è il primo dei dieci punti strategici del Piano Nazionale della Ricerca (PNR) 2005-2007, mentre al secondo e terzo punto sono indicati il rilancio dell'industria farmaceutica e nuove applicazioni dell'industria biomedicale. Anche il PNR sottolinea i temi dell'internazionalizzazione, della multidisciplinarietà e della collaborazione pubblico-privato.

La specificità dell'offerta dell'ENEA nel campo della salute risiede principalmente nella ricerca e nelle applicazioni delle radiazioni ionizzanti e non-ionizzanti, presenti nell'Ente fin dalla sua costituzione, sia dal punto di vista fisico-ingegneristico, sia da quello biologico. È opinione diffusa che la competenza e le attività dell'Ente nel campo delle radiazioni costituiscano una potenzialità unica nel Paese sia per completezza di approcci (produzione, utilizzo, effetti sull'uomo in termini dosimetrici e biologici) che per numerosità e tipologie di infrastrutture disponibili, potendo quindi rispondere alla richiesta di multidisciplinarietà nella ricerca e sviluppo tecnologico.

D'altro canto, le competenze relative all'utilizzo di materiali innovativi e nanotecnologie, e allo sviluppo di tecnologie e biotecnologie vegetali, sono state già in alcuni casi indirizzate ad attività in campo biomedico.

È utile, quindi, fornire un quadro conoscitivo della situazione attuale e delineare le prospettive future dell'ENEA, che intende mettere a disposizione del mondo medi-

co, istituzionale e industriale le proprie competenze e tecnologie per le attività che concernono il tema della Salute.

## Ricerca e applicazioni delle radiazioni ionizzanti per la radioterapia e la medicina nucleare

### Quadro di riferimento

Il PNR 2005-2007 al primo punto cita, nell'ambito della salute dell'uomo, lo studio e il trattamento dei tumori e delle malattie degenerative con nuovi approcci derivati dalla conoscenza del genoma umano. Per quanto attiene i tumori una delle modalità terapeutiche ormai consolidate è la *radioterapia*.

La ricerca e l'innovazione tecnologica hanno potenziato tale terapia e hanno permesso la realizzazione, l'ottimizzazione e l'utilizzazione delle attuali complesse facilities di irraggiamento (terapia conformazionale tridimensionale, radioterapia a intensità modulata "IMRT", radioterapia intraoperatoria "IORT" ecc.) e dei relativi piani di trattamento.

Alla radioterapia convenzionale, che usa elettroni o raggi gamma, si affianca l'adroterapia che utilizza fasci di protoni, di neutroni e di ioni carbonio.

La protonterapia, nella quale sono impiegati sia protoni che ioni, è usata ormai in modo routinario nei paesi più industrializzati per alcune patologie specifiche (melanoma uveale e tumori della base cranica), ma presenta riconosciuti vantaggi anche in numerosi altri casi (come i tumori della prostata), in cui la malattia è ben definita e prossima ad organi critici.

Nei paesi industrializzati negli ultimi anni sono stati costruiti vari centri di protonterapia e di adroterapia, e sono sinora stati trattati circa 30.000 pazienti con risultati superiori ad altre metodi-



che più convenzionali. Infatti, la terapia con fasci di protoni di energia compresa tra 60-70 MeV (per tumori poco profondi) e 100-200 MeV (per tumori profondi) costituisce la metodica in linea di principio ottimale per concentrare la dose somministrata nei volumi tumorali, mantenendo i valori delle dosi impartite ai tessuti normali circostanti sotto i livelli di tolleranza. Oggi funzionano diversi centri negli USA, in Giappone, in Russia, in Europa e in Cina, e altri saranno realizzati entro il 2007.

Secondo un recente studio dell'AIRO (Associazione Italiana Radioterapia Oncologica) il bacino d'utenza stimato in Italia è pari a 16.000 pazienti l'anno, il 13% del bacino di utenza della radioterapia. In Italia, attualmente, la protonterapia è praticata a Catania presso un Centro INFN per il solo melanoma oculare con un utilizzo molto limitato dalle ricerche di fisica di base, e sono in costruzione il centro CNAO a Pavia e il centro dell'Azienda Provinciale per la Protonterapia (ATreP) a Trento. Le installazioni con possibilità di trattare tumori di tutti i tipi hanno una potenzialità media di circa 1.000 pazienti l'anno. Da questi numeri si può stimare ad oggi per l'Italia una richiesta di impianti di protonterapia superiore alla decina.

Un ostacolo alla diffusione della protonterapia è il costo decisamente elevato delle facilities di irraggiamento. A livello mondiale finora solo quattro ditte hanno già realizzato almeno un impianto completo per protonterapia: IBA (Ion Beam Accelerators), Mitsubishi (Giappone), Hitachi (Giappone) ACCEL (Germania). Ci sono alcune industrie italiane interessate ad implementare attività di ricerca e sviluppo in tema di protonterapia: ANSALDO superconduttori, aziende di componentistica chimica (ZANON) ed elettronica (OCEM), di componentistica meccanica di alta pre-

cisione, robotica, automazione (CECOM).

Un'altra tecnica di radioterapia non convenzionale alla quale l'ENEA può dare un contributo è la Boron Neutron Capture Therapy (BNCT). Si tratta di una tecnica terapeutica, ancora in fase sperimentale, che sfrutta l'interazione di un campo di neutroni termici con l'isotopo  $^{10}\text{B}$  somministrato al paziente (mediante farmaci opportuni che si concentrano prevalentemente nelle cellule tumorali). La reazione  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  produce due frammenti ad alto LET e corto *range* (paragonabile alle dimensioni cellulari) che causano un danno significativo alla cellula tumorale in cui sono state prodotte.

La BNCT può essere utile per la cura di tumori localmente avanzati che, oltre alla massa tumorale principale, presentano microscopiche infiltrazioni nella profondità dei tessuti sani. Attualmente gli studi sono dedicati al glioma di alto grado (tumore del sistema nervoso centrale), al melanoma cutaneo e, più recentemente, al fegato espianato. Le prime applicazioni cliniche sono state fatte negli USA e in Giappone, e sono poi state avviate anche in Europa (Olanda, Svezia, Finlandia e Repubblica Ceca). Nell'ambito dell'EORTC (European Organisation for Research and Treatment of Cancer) è stato insediato un gruppo di lavoro, coordinato dall'Università di Essen, dedicato alla BNCT. Esistono ampi margini di miglioramento per questa terapia particolarmente complessa contenente variabili ancora da ottimizzare (sistemi molecolari come veicoli del boro, farmacocinetica e biodistribuzione di tali molecole). I reattori nucleari di ricerca sono attualmente le sorgenti neutroniche utilizzate per produrre flussi di neutroni sufficientemente intensi tali da rendere i tempi di irraggiamento ragionevoli. Da alcuni anni, il reattore veloce TAPIRO (localizzato presso il Centro Ri-

cerche ENEA della Casaccia) è utilizzato per la ricerca sulla BNCT.

Nel campo della *medicina nucleare*, la diagnostica ha un mercato mondiale consolidato di un miliardo di dollari all'anno, mentre la terapia con radiofarmaci rappresenta un mercato ancora in fase di pieno sviluppo.

Nel 1997 negli USA solo quattro radiofarmaci terapeutici, per un mercato annuale di 48 milioni di dollari, erano commercializzati:  $^{131}\text{I}$  per tumori follicolari tiroidei,  $^{89}\text{Sr}$  e  $^{153}\text{Sm}$  per palliazione del dolore da metastasi ossee, e  $^{32}\text{P}$  per la policitemia rubra (fonte: Frost & Sullivan per Battelle National Laboratory, vd. J Nucl Med 1998,39(7)).

Fino al 2000, prodotti come  $^{186}\text{Re}$ -EDTMP,  $^{117\text{m}}\text{Sn}$ -DTPA e  $^{153}\text{Sm}$ -Quadramet per la palliazione del dolore, il monoclonale CC49 ( $^{90}\text{Y}$ ) per il tumore del colon, il prodotto per brachiterapia Therasphere ( $^{90}\text{Y}$ ), il Biostent ( $^{188}\text{Re}$ ) per la restenosi coronarica e lo  $^{125}\text{I}$  per la brachiterapia del tumore prostatico hanno fatto salire il mercato del 35%, mentre la crescita ipotizzata, sempre dalla stessa fonte sopra citata, dal 2001 al 2010 supererà ampiamente il mercato della diagnostica, arrivando a 1,6 miliardi di dollari nei soli USA.

A tutto ciò vanno aggiunti gli sviluppi prodotti dalla ricerca, che soprattutto negli USA è floridissima da parte dei centri di ricerca universitari e federali, ma anche da un numero sempre crescente di istituzioni private.

Il motivo di tale sviluppo della medicina nucleare terapeutica ha una duplice spiegazione: l'efficacia medica attualmente non sostituibile, in quanto mirata direttamente al bersaglio, e la concreta possibilità di ridurre sensibilmente i costi complessivi del sistema sanitario in oncologia, cardiologia, reumatologia.

Presso il Reattore TRIGA del Centro Ricerche Casaccia esistono da vari anni competenze, facilities e un impegno ope-

rativo nel campo della sintesi, caratterizzazione e sperimentazione di nuovi radiofarmaci e radiodiagnostici.

Nell'ambito di un progetto integrato sulla radioterapia, l'ENEA può svolgere un ruolo catalizzante in tema di *ricerca radiobiologica traslazionale*.

Il termine ricerca traslazionale è sempre più spesso utilizzato per indicare un'attività di ricerca dettagliata sui fattori che influenzano la progressione tumorale allo scopo di migliorare i risultati terapeutici in base alla trasposizione dei dati di laboratorio in un protocollo clinico. Purtroppo, il boom della ricerca biomedica degli ultimi 20 anni non si è tradotto in miglioramenti sostanziali nel settore della radioterapia. Il principale motivo risiede nel fatto che il trasferimento della conoscenza di base all'applicazione clinica non è sufficientemente diretto e richiede una ricerca continua sia in laboratorio che in clinica.

L'identificazione di molecole e processi che regolano la risposta alle radiazioni sia del tumore che dei tessuti normali può permettere non soltanto di stabilire un nesso tra una data molecola e la radiosensibilità, ma anche di utilizzare quella molecola come bersaglio per una strategia terapeutica di radiosensibilizzazione. Gli studi clinici devono poter disporre di un forte *background* biologico per evitare insuccessi o effetti collaterali che avrebbero potuto essere previsti. Inoltre, dato che terapie geniche e biofarmaci saranno sempre più utilizzati per il trattamento del cancro in combinazione con le radiazioni ionizzanti, molti quesiti dovranno ancora essere affrontati e risolti utilizzando metodologie innovative accanto a quelle più tradizionali.

Occorre inoltre considerare che lo sviluppo delle nuove sofisticate tecnologie di irradiazione, che permettono una elevata conformazione della dose con conseguente impiego di dosi di radiazioni più elevate e ipofrazionate,

pone nuovi interrogativi di tipo radiobiologico per la corretta valutazione del danno ai tessuti sani e per l'identificazione di pazienti con elevato rischio di recidiva locoregionale. Per sfruttare appieno queste nuove tecnologie, in termini di costo-efficacia e di guadagno terapeutico per i pazienti, è indispensabile migliorare le conoscenze biologiche e isto-patologiche del tumore nel singolo paziente attraverso nuove modalità di genomica, proteomica e imaging funzionale, integrando questi risultati con il decorso clinico della malattia.

La radiobiologia classica riveste ancora la sua importanza nello studio di nuove terapie, degli effetti sui tessuti normali e delle interazioni radiochemioterapiche, ma necessita di una implementazione con le conoscenze derivanti dall'enorme sviluppo della biologia molecolare e di focalizzazione allo scopo di disporre di laboratori dedicati in stretta collaborazione con i reparti clinici di radioterapia.

Infatti, i recenti risultati ottenuti dalla ricerca traslazionale nella comprensione delle vie biologiche intra ed extra cellulari e l'incremento della comprensione del genoma umano sono l'elemento fondante per lo sviluppo e il futuro ruolo della radioterapia oncologica.

In campo internazionale sono operanti vari gruppi di lavoro e associazioni che promuovono gli obiettivi della ricerca traslazionale, con enfasi anche sulle attività di formazione multidisciplinare.

## Competenze, strutture e attività: le proposte ENEA

Le competenze presenti in ENEA nel settore delle radiazioni ionizzanti costituiscono un insieme multidisciplinare per la ricerca e per potenziali applicazioni innovative in radioterapia e radiodiagnostica.

Le competenze e le strumentazioni attualmente impiegate sono principalmente quelle afferenti alle Unità che si occupano di acceleratori (Frascati), ai reattori TRIGA e TAPIRO (Casaccia), ai laboratori di biologia (Casaccia) e alle attività modellistiche di supporto (Bologna):

- *fisica delle radiazioni*: produzione di radiazioni con facilities sperimentali, quali acceleratori di elettroni, di protoni, generatori di neutroni, campioni di metrologia delle radiazioni ionizzanti, nonché reattori di ricerca;
- *radiobiologia*: meccanismi ed effetti delle radiazioni sull'uomo e sui tessuti biologici (biologia cellulare, biologia molecolare, cancerogenesi, radioprotezione, epidemiologia);
- *radiochimica*: sintesi, caratterizzazione e sperimentazione clinica di nuove molecole marcate da utilizzare come radiofarmaci e radiodiagnostici;
- *radioprotezione e modellistica*: applicazioni di calcolo con metodo Monte Carlo per la progettazione di facilities, studi dosimetrici e piani di trattamento su fantocci antropomorfi complessi (voxel);
- *utilizzo di radiazioni per tecniche diagnostiche di stato solido*.

A Frascati, ambito culturale storicamente comune con INFN, sono presenti competenze consolidate in trent'anni di attività, in frequente collaborazione con INFN, CERN, ISS, Progetto TERA, e l'industria biomedicale. Le competenze spaziano da quelle teoriche-progettuali (modellistica di acceleratori di elettroni e protoni dalla sorgente al *beam delivery*, con particolare esperienza degli acceleratori per uso medicale) a quelle sperimentali (sintonia strutture acceleranti e misure RF, impianti da ultra alto vuoto, diagnostiche e sicurezze). Le ricerche negli anni 80 e 90 hanno portato alla realizzazione del-

la macchina Novac 7 per la Radioterapia Intraoperatoria (IORT) con un buon esempio di trasferimento tecnologico verso la ditta Hitesys (oggi Info&Tech) che ha fornito 20 macchine IORT operative attualmente presso altrettanti ospedali italiani. Per quel che riguarda gli acceleratori di elettroni, ne sono attualmente operativi 3, due linac e un microtrone, dedicati all'alimentazione di due impianti prototipi di FEL – THz e ad attività di irraggiamento materiali con elettroni e gamma. L'attività effettuata nella progettazione e sviluppo di impianti di protonterapia ha portato all'installazione di un linac per protoni da 7 MeV (l'iniettore del TOP Linac) attualmente utilizzato per produzione (limitata dalle condizioni del bunker) di F-18 e per irraggiamenti a bassa intensità. Inoltre sono sotto test due sezioni acceleranti della successiva parte dell'acceleratore TOP.

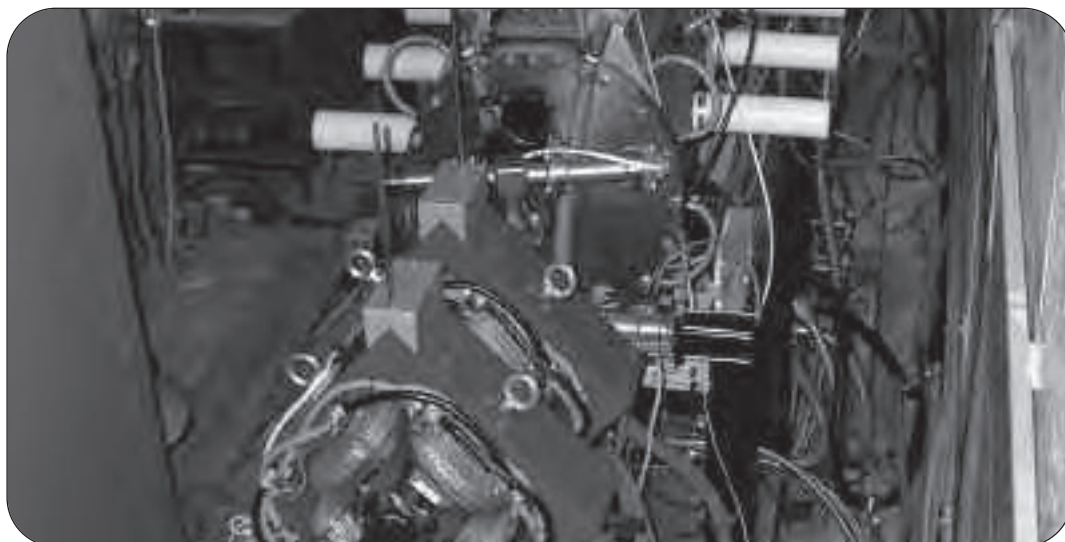
Le competenze acquisite possono essere utilizzate per la progettazione di un impianto importante, in particolare per i protoni, che sia operativo e quindi con un output medicale, ma anche traino per ulteriori sviluppi tecnologici nei campi della radioterapia, radiobiologia, radiochimica, radiodiagnostica.

Presso il CR ENEA di Bologna (in collaborazione con il CR Casaccia) sono svolte da alcuni anni delle attività di studio e progettazione (con tecniche Monte Carlo) finalizzate all'impiego del reattore veloce TAPIRO (CR Casaccia) come sorgente di neutroni per la BNCT.

Presso l'impianto TAPIRO sono state quindi realizzate tre *facilities* sperimentali di irraggiamento con caratteristiche peculiari:

1. La *facility* "HYTHOR" (progettata e costruita dall'INFN di Legnaro) fornisce un fascio neutronico termico ed è utilizzata per irraggiare colture cellulari e animali da laboratorio per la sperimentazione di composti del boro per il melanoma cutaneo (in collaborazione con l'Università di Padova e i laboratori di biologia CR ENEA Casaccia), e per testare strumentazioni per studi di microdosimetria neutronica (in collaborazione con l'INFN di Legnaro).
2. La *facility* "EPIX" (progettata e costruita dall'ENEA in collaborazione con l'Università di Pisa) fornisce un fascio neutronico epitermico (con capacità di penetrazione maggiore rispetto ai neutroni termici) ed è uti-

**Figura 1**  
Acceleratore TOP  
(CR ENEA Frascati)



lizzata per esperimenti con modelli animali di glioblastoma e per testare metodi di dosimetria su fantocci antropomorfi (in collaborazione con l'Università di Milano).

3. La facility "EPIMED" (progettata e costruita dall'ENEA in collaborazione con l'Università di Pisa, usufruendo anche di finanziamenti da parte dell'INFN e del Comitato EUROSEA di Torino) fornisce un fascio neutronico epitermico finalizzato alla sperimentazione clinica su alcuni tumori non superficiali (per esempio alcuni tumori cerebrali come i glioblastomi). A differenza delle facilities "HYTHOR" ed "EPIX", in "EPIMED" la posizione di irraggiamento è esterna al reattore.

L'utilizzo potrà essere eventualmente esteso anche alla sperimentazione su altri organi (fegato, polmone). Attualmente sono a disposizione due aperture del fascio di irraggiamento ( $12 \div 12 \text{ cm}^2$  e  $20 \div 20 \text{ cm}^2$ ). Entro il 2006 saranno effettuate le misure di caratterizzazione del fascio di irraggiamento (in collaborazione con altri Centri di ricerca) al fine di verificare i parametri calcolati in fase di progettazione. I risultati sperimentali saranno poi confrontati con quelli delle facilities europee attualmente impegnate nella BNCT.

Presso il Reattore TRIGA del CR Casaccia esistono da vari anni competenze, facilities e un impegno operativo nei seguenti campi: sintesi, caratterizzazione e sperimentazione di nuovi radiofarmaci e radiodiagnostica; produzione di radiofarmaci per applicazioni di radioterapia metabolica, brachiterapia iniettiva e noniniettiva; sperimentazione di molecole con azione farmacologica in patologie neurodegenerative; sintesi di molecole con azione antiangiogenica su tumori solidi; messa a punto di nuovi protocolli per la brachiterapia vascolare post-angioplastica; sviluppo di dispositivi scintigrafici, studi di farmaco-cinetica *in vivo* e *in vitro*, per applicazioni di medicina nucleare e imaging medicale.

Le attività, svolte in collaborazione con alcuni ospedali (Policlinico Gemelli, Ospedale S. Eugenio, Policlinico Tor Vergata), dove è anche effettuata la sperimentazione clinica e i trattamenti sui pazienti, con Fondazioni (Beat ALS) e con aziende (IDI Farmaceutici, CELLTECH), hanno portato al deposito di cinque brevetti italiani e due europei.

Sempre nel CR Casaccia sono presenti laboratori di biologia cellulare e molecolare attigui a una apparecchiatura per l'irraggiamento di piccoli animali e colture cellulari e a uno stabulario convenzionale per roditori di standard medio-alto rispetto ad analoghi impianti di enti pubblici.



**Figura 2**  
Facility "EPIMED"  
(TAPIRO, CR ENEA  
Casaccia)



Le attività sono finalizzate all'obiettivo di sviluppare metodologie, modelli e tecnologie innovativi per la valutazione degli effetti di agenti nocivi fisici e chimici sulla salute umana a seguito di esposizioni ambientali, occupazionali o terapeutiche. Le competenze di radiobiologia sono inoltre applicate alla caratterizzazione biologica (radiosensibilità) dei tessuti sani e tumorali da utilizzare nei protocolli e piani di trattamento.

Nell'ottica di un ulteriore sviluppo delle applicazioni in radioterapia e in medicina nucleare, si possono individuare i seguenti temi:

- utilizzo di facilities di irraggiamento ENEA per tecniche di radioterapia non convenzionali già attuate all'estero (BNCT al TAPIRO, adroterapia con TOP); studio di fattibilità di una nuova facility per la ricerca sulla FNT (*Fast Neutron Therapy*) e BNCEFNT (*Boron Neutron Capture Enhanced Fast Neutron Therapy*, terapia con neutroni veloci potenziata con la BNCT);
- caratterizzazione "biologica" dei tessuti umani nel trattamento radioterapico con le attuali tecniche conformazionali convenzionali (fotoni ed elettroni), o con tecniche non convenzionali, quali BNCT o adroterapia (terapia con protoni o ioni). Le attività finalizzate allo sviluppo di metodologie, di modelli e tecnologie innovative per la valutazione degli effetti di agenti fisici e chimici per esposizioni cliniche di tipo diagnostico e/o terapeutico, possono fornire il necessario supporto per la sperimentazione preclinica per la definizione dei protocolli di trattamento previsti dalle nuove tecnologie di irraggiamento;
- utilizzo di codici di calcolo Monte Carlo su fantocci voxel per applicazioni dosimetriche. Infatti l'applicazione dei codici di trasporto delle radiazioni su fantocci numerici antropomorfi complessi, ricavati con tecniche tomografiche (CT e MR) e pertanto in grado di ri-

produrre con grande fedeltà le caratteristiche morfologiche, permettono valutazioni dosimetriche e di radioprotezione per il paziente e per il personale sanitario ben più puntuali e precise di quanto ottenibile con fantocci analitici (ADAM-MIRD) tradizionalmente utilizzati. Inoltre i fantocci voxel costituiscono un potenziale di sviluppo notevole anche nel caso di simulazioni di piani di trattamento per terapie innovative e sperimentali.

### Ricerca e applicazioni delle tecnologie fisiche e dei materiali per la diagnostica medica

#### Quadro di riferimento

Il grande sviluppo delle tecnologie biomediche e della diagnostica è avvenuto in un arco di tempo relativamente breve, nel corso del quale la ricerca scientifica ha permesso di mettere a frutto in campo medico tutte le scoperte e le innovazioni tecnologiche disponibili (dalla meccanica all'elettronica, dalla chimica alla biologia, dall'informatica alla scienza dei materiali).

Grazie a queste intelligenti integrazioni di conoscenze tra settori diversi, sono stati realizzati moltissimi prodotti: dalle siringhe agli organi artificiali, dal filo per suture alle protesi impiantabili, dai reagenti per la diagnostica biochimica basati sull'ingegneria genetica, alle attrezzature chirurgiche ecc.

Per quanto riguarda l'industria biomedicale in Italia, si tratta di un settore caratterizzato dalla presenza prevalente di piccole industrie. Anche se in alcuni casi si presentano realtà con alto contenuto tecnologico, in generale le dimensioni non consentono investimenti significativi e necessari per lo studio e la realizzazione di nuovi prodotti tecnologicamente avanzati nella diagnostica per immagini in grado



di entrare con successo sul mercato nazionale e internazionale.

## Competenze, strutture e attività: le proposte ENEA

### *Dispositivi scintigrafici per diagnostica*

L'esperienza nel campo dei dispositivi scintigrafici nasce essenzialmente come collaborazione con l'INFN e l'Università "La Sapienza" di Roma per lo sviluppo di sistemi di imaging dedicati alla diagnosi precoce del tumore al seno. L'ENEA ha messo in campo l'esperienza consolidata nell'uso dei codici di trasporto di particelle nucleari e nel settore delle misure nucleari. Attualmente, esistono competenze per la realizzazione di sensori scintigrafici miniaturizzati per la rivelazione di raggi gamma. Si tratta sostanzialmente di rivelatori scintigrafici di elevato rapporto d'aspetto, in cui la miniaturizzazione è spinta al massimo, tramite la sostituzione dei rivelatori a fototubo con altri a stato solido. Al momento i rivelatori utilizzati sono commerciali, ma esiste una intesa per lo sviluppo di rivelatori ad hoc con un partner italiano. I sensori brevettati potranno essere inseriti singolarmente in cateteri usa-e-getta, o assemblati insieme in rivelatori compatti dedicati alla ispezione di piccoli organi (ad esempio tiroide), o utilizzati per l'imaging di piccoli animali durante la sperimentazione pre-clinica. In questi anni si è acquisita esperienza nello sviluppo di teste di misura basate su matrici di cristalli scintillanti da utilizzare per la realizzazione di immagini planari. Il ciclo di sviluppo ha interessato la progettazione di collimatori, il dimensionamento dei cristalli, il loro assemblaggio e integrazione con foto-tubi, l'elettronica di acquisizione del segnale, la conversione ADC e i software di rendering di immagini planari. Sempre nel campo dei rivelatori, vengono realizzati sensori di luminescen-

za di campioni puntuali (spots) di materiali biologici, destinati ad analisi genomiche o proteomiche sulla base del concetto dei *DNA-chips*, esempio di collaborazione multidisciplinare tra diversi gruppi ENEA: il rivelatore, una matrice di fotodiodi di silicio amorfo integrata con i relativi transistori di pilotaggio, viene realizzato nelle "camere pulite" del CR ENEA di Portici e la deposizione localizzata dei materiali biologici viene realizzata da fisici e biologi del CR Casaccia.

### *Diagnostica per immagini alle frequenze del Terahertz (THz)*

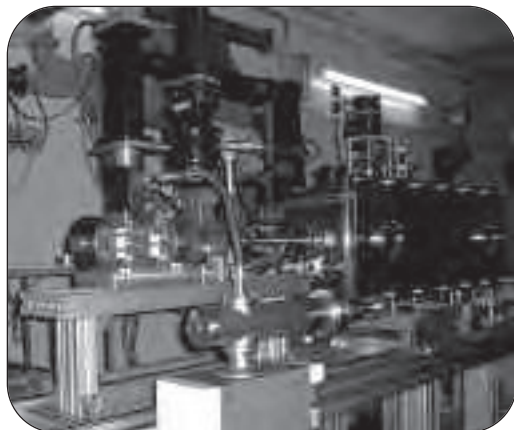
L'attività di diagnostica nella regione del THz è stata sviluppata nell'ambito del progetto Europeo THz-BRIDGE, coordinato dall'ENEA e dedicato allo studio dell'interazione della radiazione THz con i sistemi biologici, anche al fine di valutarne gli effetti e contribuire alla definizione di limiti d'esposizione.

Presso il CR ENEA di Frascati sono in funzione due sorgenti laser ad elettroni liberi (FEL) nella regione spettrale del THz, con caratteristiche uniche in termini di potenza e campo elettrico di picco nonché di accordabilità spettrale.

Le sorgenti trovano impiego nello studio dell'interazione con i sistemi biologici e nella diagnostica per immagini. Possono essere inserite utilmente in diversi progetti che includono: l'irraggiamento di sistemi biologici (DNA, membrane, cellule, tessuti, meccanismi d'interazione, dosimetria e standard d'esposizione); l'applicazione in tecniche di rilascio selettivo e controllato di farmaci e il *THz sensing and imaging* attraverso tecniche di acquisizione d'immagini, rivelazione a distanza, *Near Field Microscopy*, sistemi "label free" di analisi del DNA, analisi non invasiva dei tessuti ossei e cartilaginei e integrazione con tecniche complementari di imaging biomedico, quali risonanza magnetica nucleare ed ecografia.

L'attività di ricerca di base sullo sviluppo delle sorgenti THz, insieme allo sviluppo di materiali avanzati per componenti e rivelatori a frequenze del THz, costituisce la base per la realizzazione di sistemi di imaging per le applicazioni in campo biomedico, consentendo il confronto e la validazione con altre tecniche consolidate di diagnostica per immagini.

**Figura 3**  
FEL-CATS (Compact  
Advanced THz Source)  
ENEA Frascati)



#### *Diagnostica laser non distruttiva*

Nell'ambito più generale delle competenze di tecnologie fisiche nel settore della laseristica, un'applicazione particolare riguarda l'impiego di metodologie laser non invasive per il dosaggio di traccianti non radioattivi. È stato progettato e costruito un apparato di spettroscopia di assorbimento IR con diodo laser a 4,33 micron (TDLAS) per la determinazione del  $^{13}\text{C}$  nella diagnosi di patologie gastriche e metaboliche e per la ricerca nell'esperto umano di marker patologici di provenienza endogena per il monitoraggio dello stato di stress ossidativi.

È stato inoltre progettato e costruito un sistema di spettroscopia fotoacustica con laser a  $\text{CO}_2$  (sensibilità attuale 0,2 ppb) per la ricerca nell'esperto umano di marker patologici di provenienza endogena (rivelazione di tracce di  $\text{CH}_2=\text{CH}_2$  e di  $\text{CH}_3-\text{CH}_3$ ) per il monitoraggio dello stato di stress ossidativo e l'analisi del  $\text{CH}_4$  nel tumore del colon.

In tema di metodologie diagnostiche, esiste anche una attività per l'individuazione di nuovi marker molecolari di patologie, basata sulla spettroscopia di fluorescenza dei tessuti, che sfrutta la differente intensità relativa delle bande di fluorescenza emesse da tessuti sani e tumorali.

#### *Materiali innovativi*

Nel settore dei materiali innovativi, ENEA può fornire una serie di competenze di tipo generale da applicare a tematiche relative alla salute con interventi relativi a:

- prove meccaniche, funzionali e non distruttive dei materiali interessati per la fabbricazione di macchinari e sensori;
- realizzazione di mezzi di contrasto in forma di nanomateriali a partire da nanoparticelle a base di silicio prodotte via laser;
- applicazione del microscopio elettronico in teleoperazione di Brindisi a campagne organizzate di ispezione di materiali e campioni di interesse biomedico.

Nel CR Casaccia sono disponibili varie attrezzature, di norma utilizzate per analisi non distruttive su materiali speciali inorganici. In particolare, alcune analisi ad alta risoluzione nel settore della radiografia e degli ultrasuoni appaiono fortemente connesse alla tematica della salute, e precisamente: radiografia microfuoco e microtomografia, ultrasuoni a bassa frequenza, alta frequenza e microscopia ultrasonora.

#### *Radiografia microfuoco e microtomografia*

Apparecchi radiografici microfuoco, avendo uno spot di emissione di circa  $10\ \mu\text{m}$  o inferiore, permettono la rivelazione di oggetti dell'ordine di  $8-20\ \mu\text{m}$  con una risoluzione di  $500\ \text{nm}$ . Si ritiene quindi fondamentale avere simili sistemi di indagine possibilmente accoppiati a microtomografi. È possibile anche utilizzare me-

todi complementari, quali la laminografia: l'immagine viene ottenuta muovendo in maniera sincrona la sorgente X e il rivelatore e ponendo l'oggetto da ispezionare con angoli predeterminati. I punti del *piano focale*, ad esempio il piano dell'oggetto includente il punto di intersezione dell'asse di rotazione e l'asse del fascio di Rx, sono in genere sullo stesso punto del rivelatore. Le immagini dei punti dell'oggetto fuori da questo piano risultano "mosse" durante la rotazione del rivelatore e della sorgente e quindi possono essere facilmente rimosse dall'immagine risultante dall'area del piano focale. Questo metodo risulta particolarmente utile quando si devono ispezionare aree di interfaccia: contatto bioprotesi/osso. Altre applicazioni possibili della microtomografia nel settore biomedico sono: analisi puntuale delle microcalcificazioni a livello coronarico o del cuore; analisi di microstrutture venose; analisi di ministumenti diagnostici o chirurgici.

### Ultrasuoni

Nel CR ENEA di Brindisi gli ultrasuoni sono impiegati, tra l'altro, per la misura della velocità di propagazione per il controllo del modulo di elasticità (esami in bassa frequenza 0.5÷4 MHz). Tale tecnica è applicabile ai processi di ispezione dei materiali. Il modulo di elasticità dei materiali (modulo di Young) è correlato alla velocità di trasmissione degli ultrasuoni, ed è quindi possibile monitorare tramite questo parametro le caratteristiche fisiche/meccaniche di materiali per il settore biomedico ed il loro eventuale degrado.

## Biotecnologie e tecnologie per la salute

### Quadro di riferimento

Il recente sviluppo delle conoscenze nel campo della biologia cellulare e mole-

colare ha profondamente modificato l'approccio alla valutazione della nocività di agenti fisici e chimici di rilevanza ambientale, occupazionale e terapeutica. Da una tossicologia di carattere descrittivo, seppure basata su metodi sensibili e specifici e solidi dati quantitativi, si è passati a un approccio che mira a integrare quei dati con conoscenze sui meccanismi d'azione a livello molecolare e cellulare. Questo processo richiede lo sviluppo di modelli sperimentali, metodologie innovative, diverse competenze che traducano le nuove conoscenze in strumenti di ricerca e prodotti finali con impatto sulla protezione della salute.

Secondo l'OCSE, le biotecnologie si caratterizzano come l'applicazione di principi scientifici e di ingegneria per la produzione di materiali a partire da agenti biologici, utilizzando conoscenze derivanti dalla biologia, dalla biochimica, dalla genetica, dalla microbiologia, dalla ingegneria biochimica, dalla chimica combinatoria e dai processi di separazione. Le biotecnologie rappresentano l'esempio più caratteristico dell'industria ad alta tecnologia. Sono altamente *science based* e i loro prodotti incorporano una elevata quantità di ricerca e sviluppo avanzati che possono essere utilizzati in molti settori di attività: farmaceutico, agricolo, alimentare, ambientale.

È opinione universalmente condivisa che lo sviluppo del settore biotec rappresenti uno dei principali fattori di successo per l'economia e l'industria mondiale. In Italia la ricerca nel settore delle biotecnologie è avanzata, e rappresenta, oltre che un'opportunità di sviluppo, una necessità strategica per rilanciare la competitività del sistema industriale italiano. Da un confronto fra USA ed Europa risulta che le imprese specializzate in USA tendono a focalizzarsi più dei partner europei sul tema della salute, mentre le imprese europee sono distribuite tra settore della salute, settore agricolo e settore chimico-ambientale.

## Competenze, strutture e attività: le proposte ENEA

### *Meccanismi ed effetti di agenti fisici e chimici sulla salute umana*

In ENEA, le competenze presenti nei settori della cancerogenesi, citogenetica, citologia analitica, radiobiologia, tossicologia, oncologia molecolare e sperimentale, immunologia, epidemiologia si articolano in:

- studi su modelli murini con inattivazione di singoli geni (knock-out) ottenuti per ricombinazione omologa, che mimano il danno indotto da radiazioni ionizzanti e sostanze chimiche per la comprensione di meccanismi di cancerogenesi e differenziamento cellulare mediati da tali geni;
- studi dell'espressione e dei meccanismi di attivazione, attraverso saggi dell'attività chinasi di complessi DNA-enzima e dello stato funzionale mediante saggi di legame (binding) proteina-DNA, di singoli componenti di complessi proteici implicati nelle prime fasi della riparazione delle rotture a doppia elica del DNA su sistemi sperimentali *in vivo* e *in vitro* prima e dopo esposizione a radiazioni ionizzanti e sostanze chimiche;
- studi di meccanismi di attivazione di *pathway* apoptotici in linee cellulari geneticamente modificate e modelli animali sensibili e resistenti al danno attraverso l'immissione di sostanze modulanti o peptidi specifici per l'individuazione e studio di nuovi bersagli molecolari per la cura dei tumori. A questo riguardo, è necessario sviluppare piattaforme per *highthroughput screening* mirato alla identificazione di molecole di potenziale interesse terapeutico/radiosensibilizzante;
- studi per l'individuazione di meccanismi molecolari e degli effetti sinergici tra radiazioni ionizzanti, composti chi-

mici e modulazione della risposta immunitaria;

- sviluppo, standardizzazione e valutazione di nuove tecniche per la misura dell'integrità genomica e riproduttiva, e della suscettibilità individuale, con particolare riferimento a metodi di citologia analitica per la misura delle rotture nel DNA a livello di singole cellule e di fenomeni apoptotici (citometria a flusso, COMET, TUNEL), metodi di citogenetica molecolare per la misura di alterazioni cromosomiche di rilevanza nella cancerogenesi (FISH, painting), metodi basati su amplificazione (RT-PCR quantitativa), determinazione di SNPs e sequenziamento del DNA, analisi proteomiche per la valutazione dello stato funzionale recettoriale; sviluppo di piattaforme per *highthroughput screening* mirato alla identificazione di molecole di potenziale interesse terapeutico/radiosensibilizzante.

Nella valutazione del rischio per la salute umana derivante da agenti nocivi di interesse ambientale, è necessario identificare nuovi biomarcatori di esposizione, effetto e suscettibilità ad agenti tossici di rilevanza ambientale ed elaborare modelli per la stima del rischio mediante valutazioni tossicologiche integrate. I dati ottenuti su biomarcatori a breve termine vengono correlati con le stime di effetti irreversibili a lungo termine (compromissione del potenziale di fertilità, insorgenza di tumori) per la chiarificazione delle fasi intermedie di processi fisiopatologici complessi.

Vengono svolte, inoltre, attività di *epidemiologia ambientale*, avvalendosi della Banca Dati Epidemiologica dell'ENEA, in cui sono raccolti i dati di mortalità per causa a partire dal 1969. L'epidemiologia ambientale si propone di studiare e interpretare le relazioni fra l'ambiente e la salute umana sia per evidenziare eventuali fonti di "rischio", sia per valutare la reale sostenibilità dei

contesti territoriali, sia come supporto alla pianificazione delle politiche di intervento per la prevenzione e il risanamento. I dati da utilizzare come indicatori di impatto sulla salute delle popolazioni come, ad esempio, i dati di incidenza dei tumori o le schede di dimissione ospedaliera (SDO), sono generalmente dispersi tra le diverse strutture competenti e richiedono un lungo lavoro di acquisizione, reperimento ed elaborazione. Gli unici dati sanitari immediatamente disponibili per tutti i comuni italiani sono i dati di mortalità per causa, che vengono registrati da oltre un secolo dall'ISTAT su tutto il territorio nazionale e sono raccolti nella banca dati epidemiologica dell'ENEA che consente di effettuare elaborazioni statistiche per la valutazione dello stato di salute delle popolazioni residenti in diversi contesti territoriali al fine di caratterizzare e interpretare le relazioni tra l'ambiente e la salute umana.

Parallelamente alle attività di ricerca a medio-lungo termine, sono condotti studi orientati alla necessità di fornire elementi tecnico-scientifici per la soluzione di problematiche prioritarie di protezione della salute umana, identificate sulla base di conoscenze scientifiche e valutazioni di carattere economico e sociale (inquinamento elettromagnetico e chimico in ambiente urbano, inquinamento da composti con possibile attività endocrina, valutazioni di rischio in particolari ambienti di lavoro).

Ad esempio, nel settore del bioelettromagnetismo, le attività scientifiche sono focalizzate alla valutazione dell'inquinamento da campi EM a basse e alte frequenze e statici e all'individuazione di effetti biologici su modelli specifici di cellule stabilizzate o colture primarie, per l'identificazione e caratterizzazione di possibili danni citogenetici, morfologici e funzionali; parallelamente vengono sviluppati sistemi espo-

sitivi e tecnologie per il controllo e l'analisi dell'esposizione.

## Biotecnologie e tecnologie vegetali per la salute

### *La pianta come biofabbrica*

Una linea di attività riguarda l'utilizzo di piante intese come "biofabbriche" per la produzione di molecole di interesse biomedico-farmaceutico, con un approccio che potrebbe rappresentare un'alternativa efficace, biologicamente sicura e economicamente vantaggiosa rispetto ai sistemi di produzione convenzionali (batteri, lieviti, cellule di mammifero) finora adottati dall'industria farmaceutica. In questo campo sono state sviluppate alcune ricerche pionieristiche e attualmente l'impegno è rivolto principalmente alla produzione di anticorpi e alla formulazione di nuovi vaccini diretti contro HIV-1 e HPV-16. In particolare alcuni dei vaccini prodotti sono già stati saggiati su modelli sperimentali animali con risultati che appaiono molto promettenti, documentati su importanti riviste internazionali. È stata completata la realizzazione di anticorpi stabili in grado di funzionare come modulatori di attività proteiche all'interno del citoplasma. Queste molecole possono essere utilizzate come reagenti per interferenza molecolare in applicazioni biomediche e nel settore agrario. Per lo svolgimento di questo tipo di attività ENEA dispone nel CR Casaccia di infrastrutture d'avanguardia, quali una serra biosicura, impianti tecnologici per l'allevamento confinato di piante e patogeni vegetali geneticamente modificati.

Il progetto presenta una serie di vantaggi:

- possibilità di sintetizzare proteine complesse funzionali simili ai corrispettivi naturali;
- sicurezza intrinseca del prodotto ricombinante (per la salute degli animali o dell'uomo);



- possibilità di immagazzinare e processare grandi quantità di molecole bioattive (fondamentale in caso di improvvise pandemie);
- notevole abbattimento dei costi di produzione;
- possibilità di trasferimento rapido dalla ricerca pre-competitiva alla produzione industriale.

A livello internazionale esiste un grande interesse per la messa a punto di piattaforme per l'espressione eterologa in pianta di anticorpi, antigeni o peptidi anti-microbici.

L'ENEA è inserito nel più grosso consorzio di ricerca internazionale su questo argomento (FP-VI *Integrated Project "Pharmaplanta. Recombinant pharmaceuticals from plants for human health"*).

Gli obiettivi futuri sono rappresentati da:

- realizzazione di una piattaforma scientifica, tecnologica e industriale dedicata alla produzione di molecole di interesse biofarmaceutico utilizzando il sistema "pianta-biofabbrica";
- dimostrazione che la produzione in pianta, già di per sé competitiva rispetto ai sistemi di espressione tradizionali in termini di costi, lo sia anche in termini di equivalenza sostanziale e di rese del prodotto finale;
- identificazione di "nuovi" vantaggi derivanti dall'uso delle piante in campo biofarmaceutico soprattutto per la realizzazione/produzione di vaccini.

#### **Patogeni opportunisti nell'ambiente**

Sono state perfezionate metodiche per la caratterizzazione fenotipica e molecolare di comunità microbiche in terreni e ambienti diversi, per la valutazione di una loro potenziale patogenicità nell'uomo. È stato costituito un network italiano per la valutazione del rischio biologico associato a impieghi biotecnologici di rizobatteri come

*Burkholderia cepacia*, che da una parte è in grado di promuovere lo sviluppo di piante di interesse agrario, ma dall'altra è implicata nella esacerbazione dei sintomi in pazienti affetti da fibrosi cistica.

Il laboratorio di Microbiologia del CR Casaccia è il primo in Italia dove sono state sviluppate tecniche per identificazione e tipizzazione, e l'unico con un'ampia collezione di isolati naturali, riconosciuto tra i centri di riferimento dalla Società Italiana Fibrosi Cistica.

#### **Farmaci estratti da piante**

L'ENEA è anche impegnato nello studio di sostanze naturali da utilizzare in medicina sia umana che veterinaria:

- per il controllo delle parassitosi esterne nei confronti delle quali si sono sviluppate resistenze preoccupanti (pediculosi del capo che rappresentano un problema in tutte le scuole europee e pediculosi degli animali da fibra in tutti i paesi produttori di fibre pregiate);
- nei confronti di malattie, come la malaria, sia dal punto di vista del controllo dei vettori che dal punto di vista della lotta al parassita responsabile della patologia;
- e, recentemente, anche nel campo della terapia delle lesioni esterne con la messa a punto di un medicamento "all in one" attualmente sperimentato sugli animali.

L'ENEA intende, quindi, sviluppare, mettendo a sistema le diverse competenze descritte nel settore della salute, conoscenze di base, metodologie, procedure e tecnologie per il trasferimento al Sistema Sanitario Nazionale e all'industria del settore di prodotti, farmaci e sistemi d'avanguardia per terapia e diagnosi di patologie ad alto impatto sociale.

Per informazioni:  
tirindelli@casaccia.enea.it



## Il fotovoltaico: sviluppo della ricerca e opportunità per l'industria

Lo sviluppo delle fonti rinnovabili di energia è condizione necessaria per affrontare la transizione energetica imposta dalle problematiche sempre più pressanti connesse all'approvvigionamento dei combustibili fossili e ai rischi di cambiamento climatico. In questo ambito riveste un particolare rilievo lo sviluppo e la diffusione della tecnologia solare fotovoltaica che, seppure ancora lontana dalla maturità, è in grado di fornire un contributo sempre più rilevante alla produzione di energia elettrica

**ANNA DE LILLO**

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

*Tratto da:* ENERGIA, AMBIENTE E INNOVAZIONE 6/06

## La tecnologia fotovoltaica a livello europeo<sup>1</sup>

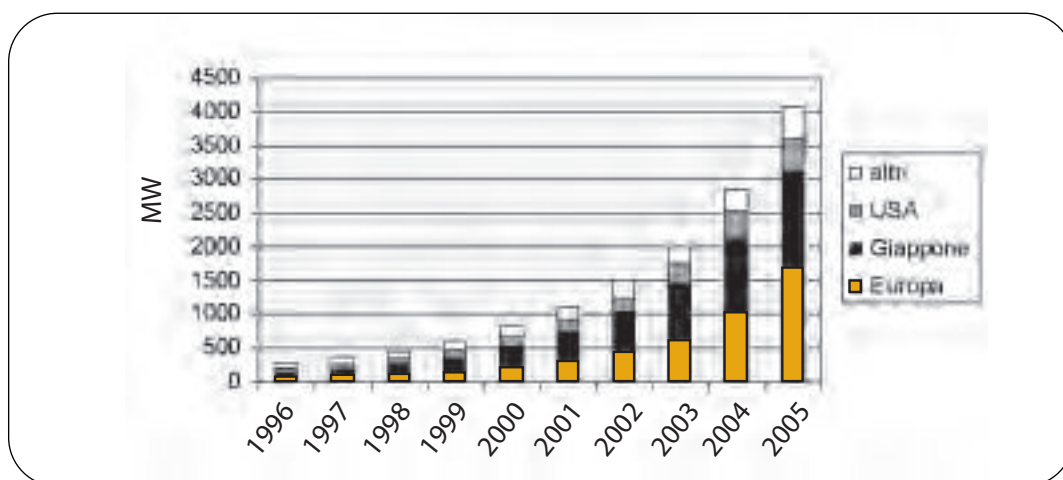
Il mercato fotovoltaico (PV) mondiale, che continua a crescere a ritmi del 40% oramai da oltre 5 anni, si sta velocemente diffondendo (figura 1) anche in Europa<sup>2</sup>. Questo fenomeno non è casuale: l'Europa si è fortemente impegnata nel settore e i prossimi anni saranno decisivi per lo sviluppo di questa tecnologia che, oltre ai benefici di tipo energetico e ambientale, presenta un elevato potenziale tecnologico in grado di dare un contributo significativo alla crescita economica.

- coinvolgere gli stakeholder nella formulazione di programmi di ricerca;
- stabilire una stretta connessione e coordinamento tra industria, ricerca e mercato.

Il suo ruolo è di definizione, supporto e accompagnamento alla realizzazione di un piano strategico coerente che prevede di:

- mobilitare tutti i partecipanti per un impegno sul fotovoltaico a lungo termine;
- implementare la Strategic Research Agenda (SRA) europea per il fotovoltaico del prossimo decennio e assicurare il suo adempimento;
- assicurare la leadership all'industria PV europea.

Figura 1 - Distribuzione geografica potenza PV cumulata  
Fonte: IEA



### Gli indirizzi dell'Unione Europea

L'Unione Europea, sin dalla fine degli anni 70, ha promosso attività di ricerca e sviluppo (R&S) nel fotovoltaico allo scopo di rendere tale opzione una reale risorsa energetica e un'opportunità di crescita socio-economica. Visti i notevoli risultati ottenuti nell'arco di oltre 20 anni, il Consiglio Europeo ha promosso nel 2003 l'istituzione di una Piattaforma Tecnologica Europea di settore per:

- contribuire ad un rapido sviluppo del PV europeo a livello mondiale per la produzione sostenibile di elettricità;

Complessivamente l'impegno europeo in termini di finanziamenti alla R&S è prevalentemente rappresentato dalla somma dei finanziamenti e delle attività che ciascun governo autonomamente decide. Pertanto detto impegno, al momento, non implica un'azione coordinata tra i diversi Stati membri.

### La politica di settore dell'Unione Europea

A livello europeo diversi atti legislativi e documenti ufficiali definiscono la politica di settore dell'Unione. In particolare:

<sup>1</sup> Per i termini tecnici si veda il glossario a fine articolo.

<sup>2</sup> L'analisi che segue non tiene conto della Cina il cui mercato interno e la cui produzione nazionale, pur essendo in forte crescita, sono poco noti non partecipando la Cina ad alcun organismo internazionale del settore.

- il Libro bianco del 1997 pone l'obiettivo di installare 3 GW di potenza fotovoltaica entro il 2010;
- il Libro verde del 2000 si propone l'obiettivo di raddoppiare il contributo delle rinnovabili dal 6% al 12% entro il 2010;
- la Direttiva sulla produzione di energia da Fonti Rinnovabili ha l'obiettivo di portare il contributo delle rinnovabili per la produzione di elettricità dal 14% al 22% entro il 2010.

Gli obiettivi politici sono evidenti e sono stati più volte dichiarati:

- diversificare le fonti di energia e garantire la sicurezza negli approvvigionamenti;
- contribuire alla crescita sostenibile dell'economia mondiale e dei paesi in via di sviluppo;
- sviluppare una forte industria high-tech europea nel campo delle rinnovabili ed assicurarne un ruolo primario a livello mondiale.

L'impegno europeo, distribuito secondo le possibilità/capacità dei singoli Stati membri, contribuirà a far divenire il fotovoltaico il maggior contribuente alla produzione di energia elettrica nel mondo. L'obiettivo di produrre, entro il 2010, il 22% dell'elettricità da fonte rinnovabile, candida l'Europa quale maggior produttore di energia fotovoltaica.

## I grandi attori nel quadro europeo

La situazione tra i diversi Stati membri dell'Unione Europea è molto differenziata ed eterogenea. Le attività di R&S possono essere incluse in programmi più generali sulle rinnovabili (in questo caso il PV deve confrontarsi con le altre tecnologie a meno che non ci siano programmi specifici), oppure essere inserite in programmi il cui obiettivo principale è lo sviluppo tecnologico. Le attività vengono per lo più svolte da enti pubblici di ricerca e università e in parte cofinanziate dai Programmi Quadro dell'UE.

Gli Stati membri che attualmente contribuiscono maggiormente alla crescita del mercato delle installazioni sono la Germania e la Spagna (figura 2).

La Germania, in particolare, è riuscita a dimostrare la sostenibilità di una scelta di questo tipo traendone benefici di tipo ambientale, energetico e sociale nonché un ruolo di leader tecnologico all'avanguardia nel settore. La Germania ha avviato programmi di ricerca sul fotovoltaico già dalla seconda metà degli anni 70 creando laboratori pubblici su attività fortemente innovative. Il programma di incentivazione "100.000 roofs", avviato nel 1999, vedeva l'industria tedesca, con

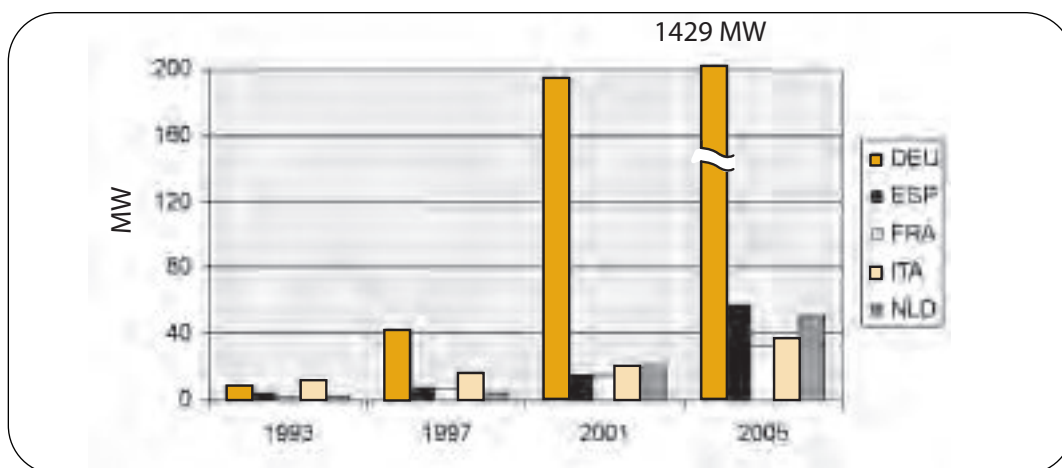


Figura 2 - Distribuzione della potenza cumulata nei principali paesi europei  
Fonte: IEA

circa 3.000 occupati, operare nelle seguenti attività:

- produzione wafer silicio: 10 MW/anno;
- produzione celle: 8-MW/anno;
- produzione moduli: 10 MW/anno;
- installazione: circa 100 imprese.

Nel 2005, a conclusione del programma "100.000 roofs" e all'avvio del nuovo programma di incentivazione in conto energia, gli occupati sono diventati 23.000, le imprese di settore circa 3.500 e il fatturato complessivo è pari a 1,8 miliardi di euro, in particolare:

- produzione wafer silicio: 360 MW/anno;
- produzione celle: 340 MW/anno;
- produzione moduli: 360 MW/anno;
- produzione moduli a film sottile: (a-Si, CdTe e CIS): 11 MW/anno.

Gli analisti di settore e lo stesso governo tedesco prevedono per i prossimi 5 anni una crescita analoga, con ritmi sempre molto sostenuti (30-40% l'anno).

## Un raffronto con il Giappone e gli Stati Uniti

Il governo giapponese ha portato avanti negli ultimi quindici anni una politica di lungo termine che include ricerca e sviluppo, dimostrazione, promozione e sostegno del mercato.

convenzionale: al 2010 la competitività per le utenze domestiche, al 2020 per le utenze commerciali e al 2030 per quelle industriali. Attualmente il sistema incentivante prevede lo scambio di energia sul posto al netto dei consumi con la valorizzazione dell'energia prodotta pari a 0,2 €/kWh e piccoli prestiti agevolati. In pratica, anche in assenza di incentivazione, il mercato continua a crescere ad un tasso di oltre il 20% l'anno.

Negli Stati Uniti il DOE (Department of Energy) gestisce, attraverso il "National Center for Photovoltaic", il programma nazionale di ricerca. Obiettivo prioritario del programma è la formazione di partnership tra industrie, laboratori pubblici e università. A livello di governo centrale non esiste l'incentivazione al mercato, che però è largamente praticata a livello di singoli Stati o Municipalità con programmi differenziati.

Analizzando i dati resi disponibili dall'IEA (tabella 1) sui costi della ricerca sul PV e sul sostegno al mercato, si nota che l'Europa ha notevolmente aumentato le spese in R&S, anche se con una minore efficacia rispetto a USA e Giappone perché il programma complessivo è semplicemente la somma dei singoli programmi nazionali, mentre gli incentivi eu-

Tabella 1 - Spesa pubblica per il PV in R&S, dimostrazione e mercato negli anni 2002 e 2005 (milioni €)

|               | R&S        |              | Dimostrazione |             | Incentivazione mercato |              | Totale     |              |
|---------------|------------|--------------|---------------|-------------|------------------------|--------------|------------|--------------|
|               | 2002       | 2005         | 2002          | 2005        | 2002                   | 2005         | 2002       | 2005         |
| Giappone      | 59         | 30,1         | 36            | 77,9        | 185                    | 19,2         | 280        | 127,2        |
| Europa        | 58         | 75           | 11            | 15          | 62                     | 303,5        | 131        | 393,5        |
| USA           | 35         | 61,4         | 0             | 1           | 80                     | 145,8        | 115        | 208,2        |
| <b>Totale</b> | <b>152</b> | <b>166,5</b> | <b>47</b>     | <b>93,9</b> | <b>327</b>             | <b>468,5</b> | <b>526</b> | <b>728,9</b> |

Fonte: IEA-PVPS Annual Report 2002 e 2004

Il programma giapponese "PV2030" ha come obiettivo la realizzazione al 2030 di impianti per una potenza da 50 a 200 GW. Il programma di ricerca e sviluppo è articolato in tre principali obiettivi, tutti finalizzati all'ottenimento della competitività con i costi di produzione elettrica

ropei al mercato sono in forte crescita grazie al programma tedesco che contribuisce per circa il 65% del totale dei costi sostenuti. Anche gli Stati Uniti, dopo un lungo periodo di stasi, stanno aumentando consistentemente il budget di ricerca sulla tecnologia.

## Stato attuale e potenzialità della tecnologia fotovoltaica

### Tecnologie commerciali

La tecnologia del silicio cristallino, nelle sue forme monocristallina (m-Si) e policristallina (p-Si) e è oggi la tecnologia dominante nelle applicazioni commerciali (figura 3).

ca il 7%), anche se tali tecnologie hanno, in linea di principio, le potenzialità per un impiego del fotovoltaico su vasta scala. La scarsa pratica su linee di produzione di film sottili richiede ancora un grosso sforzo congiunto tra industria e ricerca al fine di completare la conoscenza di tutti i parametri in gioco.

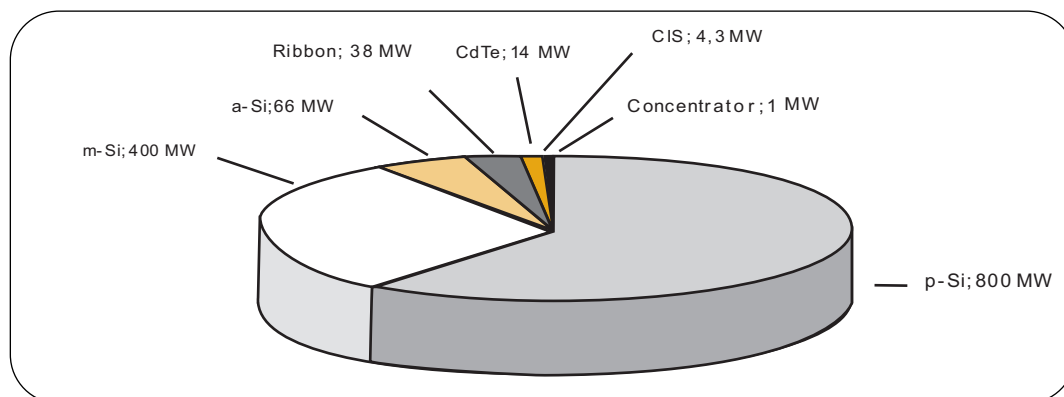


Figura 3 - Suddivisione del mercato per tecnologie  
Fonte: IEA

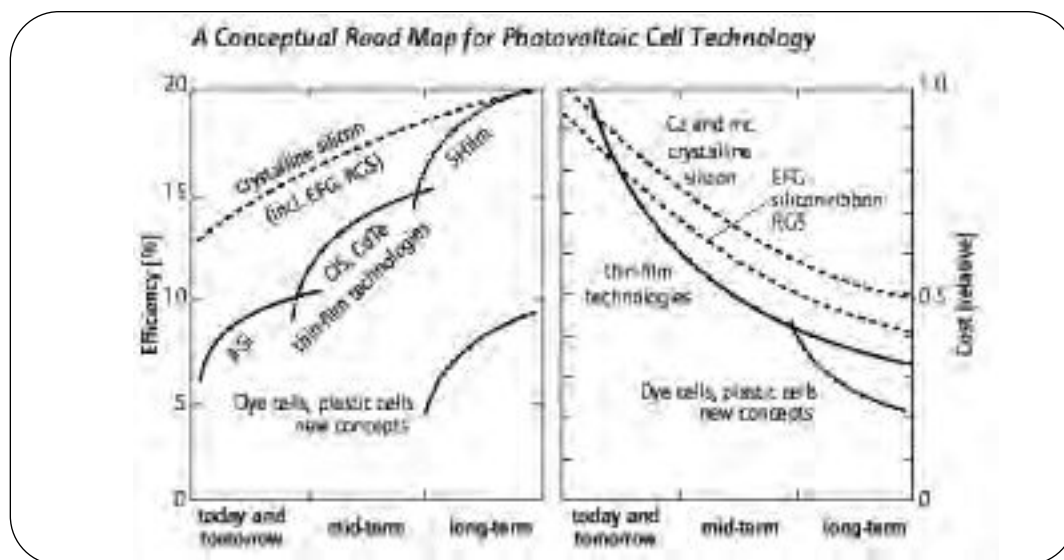


Figura 4 - Road map IEA  
Fonte: IEA

Tutti gli analisti, inoltre, concordano nel ritenere che tale materiale dominerà il mercato per i prossimi dieci anni e, pur essendo una tecnologia consolidata da molti anni, è ancora passibile di miglioramenti che dovrebbero aumentarne l'efficienza (fino al 20%) e diminuirne i costi (fino a 1 €/Wp).

La quota di mercato delle tecnologie a film sottile di tipo commerciale (a-Si, CdTe, CIS) è molto contenuta (cir-

Sebbene da anni siano state proposte soluzioni alternative al silicio cristallino nell'ottica di utilizzare materiali più economici e processi più semplici, esso rimane la tecnologia che ancora attira il maggior interesse dei ricercatori. Circa il 60% dei fondi dedicati alla ricerca PV sono impiegati, a livello internazionale, in attività sul silicio cristallino. L'ottimizzazione di questa tecnologia è, infatti, ancora argomento di ricerca per i grandi laboratori

internazionali, essendo possibili ancora sensibili riduzioni dei costi e miglioramenti di efficienza. Le proiezioni IEA di sviluppo della tecnologia fotovoltaica confermano queste previsioni (figura 4). La road map IEA prevede ancora nel lungo termine un forte apporto del silicio cristallino il cui costo diminuisce secondo una curva di apprendimento oramai nota e con efficienze via via maggiori. Infine il quadro delle tecnologie commerciali è completato dalla tecnologia della concentrazione che utilizza piccole celle ad altissima efficienza con concentratori ottici di grande superficie e poco costosi. Gli alti costi di sistema (ottica, inseguimento, raffreddamento) sono compensati dall'alta efficienza.

### *Tecnologie emergenti*

A livello di laboratorio esistono diverse nuove tecnologie sostanzialmente basate o sul concetto di basso costo o sull'alta efficienza o su una combinazione dei due. La maggior parte di queste tecnologie richiede ancora un forte impegno nella ricerca di base anche se, per alcune, esistono piccole linee prototipali. Le nuove tecnologie possono essere suddivise in due grandi famiglie:

- Basso costo:
  - Celle organiche;
  - Celle a base di materiali nanostrutturati;
  - Celle "dye sensitised".
- Alta efficienza
  - Celle a multigiunzione per la concentrazione;
  - Nuovi tipi di conversione.

Alcune tecnologie, quali quelle per le celle "dye sensitised" e quelle a multigiunzione, sono già in fase di sviluppo preindustriale. La ricerca sulle celle organiche è considerata ad alto rischio ma ad alta potenzialità; ne è stata dimostrata la fattibilità ma con efficienze bassissime e scarsa stabilità.

Le celle a base di materiali nanostrutturati sono particolarmente promettenti perché gli strati nanostrutturati potrebbero

sostituire, a bassissimo costo, il silicio nel processo manifatturiero delle celle e inoltre potrebbero avvantaggiarsi di competenze sviluppate per altri settori.

I costi di produzione delle nuove tecnologie non sono ancora valutabili: tutta l'attività è fortemente orientata sull'efficienza, la stabilità e il tempo di vita.

## La tecnologia fotovoltaica in Italia

### Il passato

Le istanze energetico-ambientali nate agli inizi degli anni 70 hanno contribuito ad avviare, a livello mondiale, le attività di R&S nel settore. Nella prima metà degli anni 80 anche l'Italia, seppure in ritardo rispetto alle altre realtà internazionali, decideva di impegnarsi in attività che si presentavano molto promettenti sia in termini di diversificazione degli approvvigionamenti energetici che di riduzione dell'impatto ambientale. In considerazione del carattere di ricerca energetica applicata, l'ENEA è stato l'ente pubblico di ricerca preposto allo sviluppo della tecnologia, anche avvalendosi di collaborazioni su temi specifici con il CNR, l'università e i laboratori dell'industria nazionale (ENI). L'industria, nel frattempo, aveva dato avvio alla produzione destinata al mercato delle applicazioni di nicchia, da sempre competitive, e della dimostrazione.

Le attività ENEA sono state fin da allora impostate su tre filoni principali:

- ricerca e sviluppo su nuovi materiali e tecnologie di celle e moduli, con particolare enfasi su quelle basate sui film sottili;
- ricerca e sviluppo, in collaborazione con l'industria nazionale, sulle celle al silicio cristallino ad alta efficienza;
- analisi, studio e verifica sperimentale delle prestazioni dei componenti, degli impianti e delle applicazioni PV.



Notevoli investimenti pubblici tra la fine degli anni 80 e la prima metà degli anni 90 hanno consentito lo sviluppo di competenze ad ampio spettro e la messa a punto di laboratori attrezzati con impianti di deposizione dei materiali e caratterizzazione di materiali e dispositivi, utili alle diverse esigenze sperimentali.

Contemporaneamente l'industria italiana si collocava tra le prime cinque al mondo e la potenza installata, grazie al programma dimostrativo di ENEL ed ENEA, ci poneva al terzo posto, a livello mondiale, dopo Giappone e USA.

Nella seconda metà degli anni 90 si è assistito ad un rapido cambiamento delle strategie di promozione del mercato mondiale, passando da investimenti per realizzare impianti dimostrativi di media-grande taglia, a investimenti rivolti alla generazione distribuita, con lo scopo di stimolare con continuità il mercato. Sono di questo periodo i grandi programmi nazionali di Giappone (Sunshine project - 5 GW al 2010), Stati Uniti (One Million Solar Roofs - 3 GW al 2010) e Germania (programma avviato come 1.000 roof top, ampliato poi a 100.000).

È qui che viene meno la coerenza del programma italiano: il ritardo nell'avvio del programma nazionale "Tetti fotovoltaici", soprattutto per la parte gestita dalle Regioni, la scarsa lungimiranza dell'industria nazionale, impegnata a rifornire il mercato tedesco che non aveva ancora al suo interno le capacità produttive necessarie a soddisfare la domanda nazionale, interrompono un processo che, con alti e bassi, aveva finalità strategiche sin dall'origine. Le attività di ricerca, oramai concentrate in ENEA e presso poche Università, non trovano il naturale sbocco presso industrie nazionali e, in assenza di un piano strategico nazionale, perdono in coerenza e finalità.

## Il presente

Il programma nazionale "Tetti fotovoltaici", pur nell'incertezza determinata da procedure di autorizzazione abbastanza farraginose, ha garantito la realizzazione di circa 20 MW nel periodo 2002-2005. Nel settembre 2005 il Ministero delle Attività Produttive lancia il primo bando per la realizzazione di impianti PV per complessivi 100 MW, distribuiti in varie taglie di impianto, incentivati mediante il pagamento a tariffe molto vantaggiose (0,46 - 0,49 €/kWh) dell'energia prodotta (conto energia). Si è cercato, in qualche modo, di ripercorrere la strada tedesca. Il bando ha avuto un forte successo di pubblico tanto che, nell'arco di una settimana, sono state presentate circa 3.000 domande per complessivi 87 MW. Il bando è stato reiterato con ampliamento della potenza installabile a 500 MW. L'industria nazionale ha continuato a latitare mentre si dava l'avvio, mediante bando emesso dalla Regione Lombardia congiuntamente con il Ministero dell'Ambiente, ad una iniziativa per la produzione di celle Cd-Te con una tecnologia messa a punto presso l'Università di Parma. Inoltre, alcune piccole imprese, nell'ambito di iniziative relative a bandi regionali per la competitività delle imprese, si sono affacciate al mondo industriale anche se timidamente e senza alcun background specifico.

A partire dal 2001 l'ENEA, pur proseguendo le attività più tradizionali, ha avviato un ambizioso programma di ricerca finalizzato allo sviluppo di un sistema fotovoltaico a concentrazione, tecnologia passibile di rapidi miglioramenti tecnologici soprattutto in un periodo in cui la produzione del feedstock di silicio non copre le esigenze delle linee di produzione e i miglioramenti in efficienza delle celle al silicio cristallino fanno ritenere possibile il loro impiego per la concen-

trazione. Il programma, anche a fronte di buoni risultati tecnici, non ha trovato, almeno a tutt'oggi, partner industriali disposti ad investire nel settore.

## La proposta ENEA

### Le competenze

Le attività di ricerca ENEA sul fotovoltaico, avviate negli anni 80, sono complessivamente cresciute fino al 2000 con interessi sempre più ampi via via che l'attenzione sulla tecnologia cresceva, sia a livello nazionale che internazionale. A riprova dell'importanza attribuita a queste attività, fu deciso di realizzare il Centro Ricerche di Portici (nato come CRIF: Centro Ricerche Fotovoltaiche), divenuto operativo nel 1990.

Parallelamente, a livello internazionale, si assisteva alla nascita dei più importanti centri di ricerca internazionali del settore: basti citare il SERI americano, oggi NREL (National Renewable Energies Labs), il Fraunhofer FhG-ISE tedesco o il NEDO giapponese, per avere una idea di come, a livello mondiale, si giudicasse importante uno sforzo sulla R&S nel campo delle energie rinnovabili, con particolare riguardo al fotovoltaico. Grazie ai diversi Accordi di Programma con i Ministeri dell'Industria e della Ricerca Scientifica, è stato possibile sviluppare tutte le competenze necessarie a svolgere un ampio programma di ricerca, che ha visto la messa a punto di laboratori attrezzati con impianti di deposizione e caratterizzazione.

Tali attività hanno favorito la collaborazione con i principali laboratori europei ed internazionali del settore sviluppando, a livello nazionale, le sinergie con i laboratori di ricerca universitari, pubblici e privati.

A partire dal 2000, le attività ENEA, non più finanziate a livello nazionale, hanno subito un graduale decremento in termi-

ni sia di risorse finanziarie che umane. Infatti il numero dei ricercatori che era pari a circa 100 unità nel 2000 è gradualmente diminuito: oggi sono presenti circa 50 ricercatori nel settore. Questo fenomeno, chiaramente correlato alla contemporanea diminuzione dei finanziamenti di settori passati dagli oltre 30 miliardi di lire annui alla fine degli anni 90 ai circa 4 milioni di euro attuali, ha favorito l'esodo di diversi gruppi di ricerca verso altre tecnologie affini.

In ENEA sono state sviluppate e studiate tre tecnologie commerciali che possono essere ottimizzate e migliorate in termini di costi e prestazioni. In particolare:

#### *Silicio cristallino*

Le attività svolte in questo campo sono finalizzate ad incrementare l'efficienza di conversione di celle al silicio cristallino mediante l'individuazione e la sperimentazione di nuove tecnologie e nuovi processi e/o fasi di processo suscettibili di essere impiegati in produzione con significative riduzioni dei costi. La gran parte delle attività è stata svolta nell'ambito di Contratti Comunitari che hanno visto la partecipazione dei principali centri di ricerca europei.

Nei laboratori del Centro Ricerche Casaccia sono state messe a punto tecniche realizzative del dispositivo basate su tecnologia laser, fotolitografia e serigrafia oltre, ovviamente, alle principali tecniche di caratterizzazione. Il laboratorio attrezzato con tutte le più importanti "facilities" tecnologiche e di caratterizzazione, che consentono di processare la cella in modo completo, dal wafer al dispositivo, dispone anche di una piccola linea di produzione prepilota in grado di operare sulle celle commerciali, e di una "clean room" per celle ad alta efficienza. Risultati di rilievo sono:

- la messa a punto e realizzazione di celle industriali di tipo innovativo al silicio multicristallino di larga area (>100 cm<sup>2</sup>)

- con efficienza di cella incapsulata del 17% (più di due punti assoluti superiori ai valori della produzione corrente);
- la messa a punto e realizzazione di celle al silicio multicristallino di larga area ( $>100 \text{ cm}^2$ ) a contatti sepolti realizzati via laser e griglia metallica realizzata per serigrafia, con efficienza del 16% (processo unico messo a punto nel laboratorio ENEA, che combina la tecnologia dei contatti sepolti con quello di serigrafia);
  - la messa a punto e realizzazione di dispositivi al silicio policristallino sottile (10-20 mm) cresciuto per Chemical Vapour Deposition (CVD) su substrati a basso costo (ceramica), realizzati con tecniche di drogaggio laser e serigrafia (grandi potenzialità per il distretto della ceramica nell'ottica del fotovoltaico realmente integrato nei materiali strutturali).

#### *Film sottili*

Le due grandi famiglie di materiali impieghi nei moduli a film sottile sono il silicio amorfo<sup>3</sup> e le sue leghe e i semiconduttori composti policristallini, in particolare CdTe e CIS (o CIGS).

L'ENEA ha sviluppato un ampio programma sul silicio amorfo che sembrava essere il candidato più interessante per la competitività della tecnologia fotovoltaica. Le attività sul silicio amorfo sono svolte nei laboratori di Portici e hanno compreso l'allestimento e la messa in opera di molte apparecchiature ed impianti sperimentali, sia di deposizione e caratterizzazione dei vari strati sottili che compongono una cella su diversi tipi di substrato che di realizzazione e caratterizzazione di celle e moduli integrati. Sono stati affrontati tutti gli aspetti relativi allo studio dei materiali: dalle teorie innovative alla modellistica, dalle proprietà opto-elettroniche e strutturali alle tecniche di "light

trapping". Sono state poi studiate, progettate, realizzate ed ottimizzate numerose celle solari, tenendo conto della vasta gamma di opzioni tecnologiche disponibili per questo tipo di dispositivi: deposizione di leghe di silicio amorfo di differente tipo (SiN, SiC, SiGe ecc.), sia drogate che non, e di altri materiali, sempre in forma di film sottile, necessari alla realizzazione di celle e moduli, come ossidi trasparenti e conduttori (TCO) e metalli. Il record di efficienza del 10,9% è stato ottenuto su una struttura stacked a-Si/a-Si da  $1 \text{ cm}^2$  depositata su vetro usando un reattore di deposizione a tre camere. Le indicazioni ottenute dallo studio delle celle a piccola area vengono sfruttate per la realizzazione di moduli e mini-moduli. Il modulo a maggiore efficienza 9,1% (7,5% stabilizzato) è stato certificato presso i laboratori del NREL.

Nella tecnologia delle celle solari a film sottile l'ossido trasparente e conduttivo (TCO) è usato come elettrodo frontale del dispositivo. L'ossido deve avere tre importanti qualità per assicurare il più efficace intrappolamento della luce all'interno del dispositivo: buona conducibilità elettrica, buona trasmissione ottica e una appropriata rugosità superficiale in grado di scatterare la luce che entra nella cella. Queste proprietà del TCO influenzano in maniera cruciale le performance del dispositivo. Il recente sviluppo di celle solari a base di silicio microcristallino ha portato l'attenzione internazionale su TCO a base di ZnO, per la sua alta stabilità in plasma di idrogeno e la relativamente bassa temperatura di deposizione. Non essendo disponibili sul mercato substrati di vetro ricoperti di ZnO nei laboratori ENEA del Centro Ricerche di Portici è stato progettato e realizzato un impianto Low Pressure-Metalorganic Chemical Vapour Deposition (LP-

<sup>3</sup> Più correttamente si intende in questo testo parlare di silicio amorfo idrogenato (a-Si:H) come si ottiene da tecniche di deposizione per PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition), e non di silicio amorfo privo di idrogeno come si ottiene tipicamente, ad esempio, per sputtering.

MOCVD) per la deposizione di film sottili di ZnO drogato su un'area di 30x30 cm<sup>2</sup>. La messa a punto dei parametri di deposizione ha consentito l'ottimizzazione delle proprietà del materiale su larga area sia in termini di uniformità che di rugosità del materiale. Le eccellenti proprietà di scattering della luce mostrate lo rendono idoneo all'uso come elettrodo frontale trasparente e conduttivo di dispositivi ad alta efficienza.

Inoltre sono state realizzate celle solari con eterogiunzioni silicio amorfo-silicio cristallino che hanno mostrato un'efficienza dell'ordine del 16% su piccola area e del 13% su 50 cm<sup>2</sup>.

Figura 5 - Cella ENEA/PhoCUS

#### *Concentrazione: Progetto PHOCUS*

Il Progetto PhoCUS (Photovoltaic Concentrators to Utility Scale) dell'ENEA ha lo scopo di dimostrare la fattibilità tecnica del fotovoltaico a concentrazione e le sue potenzialità, rispetto al fotovoltaico convenzionale, per il raggiungimento della competitività economica.

Nell'ambito del progetto PhoCUS sono state previste attività sia di Ricerca & Sviluppo sia di dimostrazione e sperimentazione sul campo. Le prime (da svolgere presso i laboratori dei Centri ENEA di Portici e Casaccia) sono relative ai principali componenti dell'impianto, quali la cella, il dispositivo ottico, il modulo, la struttura ad inseguimento e il sistema di condizionamento della potenza; le seconde prevedono l'installazione di facilities sperimentali presso il Centro ENEA di Portici e la realizzazione di più unità (3 sistemi) nell'Area Sperimentale ENEA di Monte Aquilone in Manfredonia.

Gli obiettivi principali del progetto sono di seguito riportati:

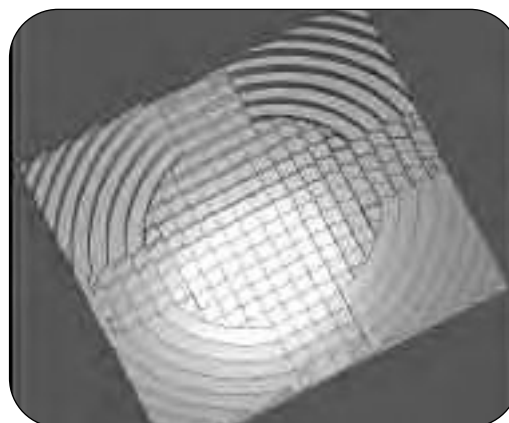
- 1) sviluppo di una unità standard da 5 kW e realizzazione, installazione, messa in servizio e sperimentazione di più unità presso Manfredonia;
- 2) sviluppo e messa a punto del processo per la realizzazione di celle in c-Si

ad alta efficienza con la installazione e messa in funzione della nuova linea presso il Centro di Portici;

- 3) sviluppo e messa a punto della tecnologia per la realizzazione di un modulo integrato a media concentrazione;
- 4) sviluppo e sperimentazione di sistemi cella solare/dispositivo ottico basati su tecnologie alternative;
- 5) sperimentazione e valutazione tecnico-economica dell'applicazione del foto-



Figura 6 - Lente prismatica PhoCUS



voltaico a media concentrazione in Italia. Per quanto riguarda il ricevitore, è stata progettata e realizzata interamente in ENEA una cella al silicio cristallino ad alta efficienza, che mostra efficienze superiori al 21% a concentrazione di 100 soli (figura 5).

Relativamente al concentratore è stato brevettato da ENEA e sviluppato in collaborazione con la Società Borromini un concentratore prismatico che mostra ottime caratteristiche ottiche con una tec-

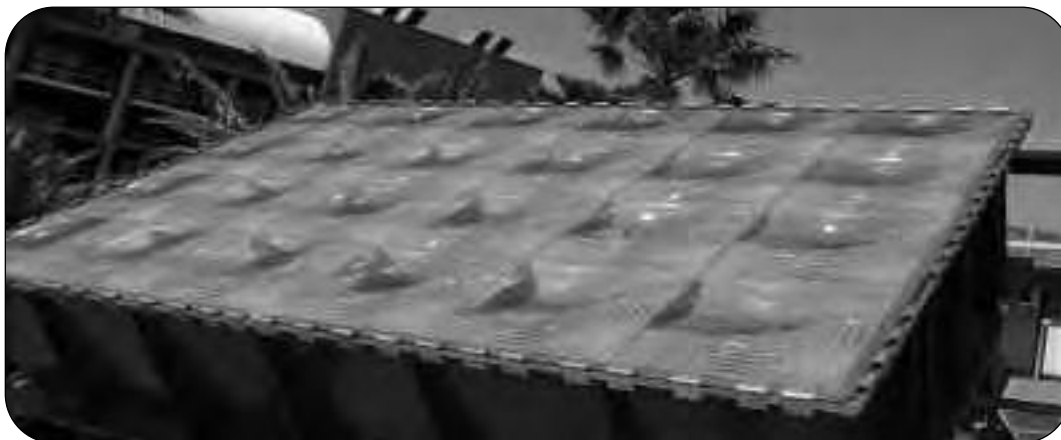


Figura 7 - Modulo PhoCUS

nologia di basso costo (figura 6).

Il modulo fotovoltaico è stato brevettato e sviluppato in collaborazione con Enitecnologie e consente di raggiungere valori di efficienza dell'ordine del 16% (figura 7).

L'ottimizzazione di un sistema fotovoltaico a concentrazione richiede, inoltre, lo sviluppo di componenti specifici del BOS (Balance of System), quali l'inseguitore solare e una specifica ingegneria di sistema per quanto riguarda il layout geometrico ed elettrico. Il fotovoltaico a concentrazione di tipo integrato richiede, infatti, l'uso di strutture in grado di inseguire il sole sui due assi. Lo sviluppo di tale componente è stato effettuato da ENEA in collaborazione con Galileo Avionica. Inoltre l'ENEA ha brevettato il sistema di controllo e movimentazione a basso costo e il sistema di controllo del puntamento che dà un'elevata accuratezza.

Per quanto riguarda l'architettura elettrica di impianto, essa è stata individuata in quella distribuita, basata sull'uso di inverter di tipo multistringa da connettere su una rete in Bassa Tensione. Tutte le attività di tipo impiantistico si stanno avvalendo della pluriennale e consolidata esperienza ENEA sugli impianti fotovoltaici, presente nel Centro di Portici e nell'Area sperimentale di Monte Aquilone in Manfredonia.

La prima unità prototipale mostra un'efficienza

operativa di sistema dell'ordine del 14%.

#### *Sistemi, componenti e applicazioni*

Le attività riguardano l'individuazione, realizzazione e sperimentazione di nuove applicazioni per impianti connessi a rete e stand alone, lo studio, la progettazione e la sperimentazione di componenti e la caratterizzazione e il testing dei moduli. A tal fine l'ENEA ha realizzato l'area sperimentale di Monte Aquilone (Manfredonia, Foggia) dove è stato realizzato nel 1990 Delphos, il primo grande impianto PV italiano da 600 kW connesso a rete e destinato allo studio e all'analisi delle problematiche di interconnessione su rete nazionale. Negli ultimi anni l'impegno ENEA ha riguardato, in modo più mirato, lo sviluppo di quelle applicazioni ove le caratteristiche di modularità del fotovoltaico vengono ulteriormente valorizzate da fattori esterni al fotovoltaico stesso. È questo il caso dell'integrazione del fotovoltaico nell'edilizia, ritenuto un connubio molto interessante da diversi paesi per la possibilità di realizzare facciate, tetti e pensiline "fotovoltaiche". A tal fine l'ENEA ha avviato, fin dal 1996, un programma di sviluppo e dimostrazione di componenti e sistemi per l'edilizia. Per quanto riguarda la caratterizzazione vengono effettuate tutte le misure classiche indoor e outdoor e test di vita accelerati al fine di valutare le prestazioni dei moduli commerciali e di laboratorio.

Inoltre, l'ENEA ha contribuito alla gestio-



ne tecnica del Programma Tetti fotovoltaici svolgendo un piano di attività di accompagnamento e supporto al Programma stesso. A tal fine, l'ENEA ha studiato e definito, sulla base delle proprie e altrui esperienze, i requisiti tecnici e le prescrizioni relative agli impianti per la generazione distribuita e ha provveduto alla raccolta, analisi e pubblicazione dei dati di funzionamento di un campione di impianti realizzati nell'ambito del Programma e allo sviluppo di sistemi dedicati per l'acquisizione e la trasmissione dei dati di esercizio. Questa attività viene ancora svolta per il monitoraggio degli impianti realizzati dalla Regione Lazio. Per quanto riguarda le applicazioni, recentemente è stato messo a punto il lampione fotovoltaico "Stapelia" (figura 8) ispirato alla forma stellata e pentagonale dell'omonimo fiore, studiato per andare incontro all'esigenza di impiego del fotovoltaico anche quando il pregio dei siti renderebbe arduo il suo inserimento. Cinque moduli triangolari semitrasparenti per una potenza nominale di 128/Wp formano la corolla, innestata su uno stelo alto sei metri. L'illuminazione è affidata ad alcuni led inseriti in corrispondenza del pistillo centrale, che diffondono la luce su superfici opaline a formare un calice luminoso. Inoltre, l'ENEA rappresenta l'Italia nell'Executive Committee dell'Implementing Agreement sul fotovoltaico (PVPS) e in quattro Task su sei attualmente attivi. La partecipazione all'Agreement assicura all'ENEA la costante informazione sugli

sviluppi del fotovoltaico e sulle diverse iniziative nei settori della ricerca, sviluppo, dimostrazione e diffusione nei 20 paesi partecipanti, peraltro i più attivi nel settore. L'ENEA garantisce infine la partecipazione italiana al CENELEC, organismo internazionale per la preparazione di standard e normativa tecnica.

#### *Tecnologie emergenti*

Per quanto riguarda le tecnologie emergenti nell'ambito del Progetto TEFIS (Tecnologie Fotovoltaiche a Film Sottile) è stata sviluppata dall'ENEA la tecnologia di fabbricazione delle celle fotovoltaiche a base di silicio microcristallino su substrati di vetro, destinati all'integrazione negli edifici. Tale tecnologia è prossima alla commercializzazione in Giappone. Il silicio microcristallino è un materiale che, rispetto al silicio amorfo, ha caratteristiche strutturali tali da consentire la realizzazione di dispositivi fotovoltaici con un'efficienza stabile più elevata, conservando i vantaggi economici e tecnologici del silicio amorfo: produzioni di massa a basso costo, disponibilità delle materie prime, buona compatibilità ambientale. Le celle realizzate sono del tipo "micro-morph", ossia dispositivi tandem con la cella inferiore di silicio microcristallino e con la superiore di silicio amorfo, ottenendo buoni risultati con la tecnica Very High Frequency PECVD, che permette elevate velocità di deposizione con conseguente riduzione dei tempi di lavorazione e quindi dei costi associati. Sono state ottenute celle con un'efficienza dell'11,3% utilizzando uno spessore degli strati attivi intrinseci della cella bottom e della top, rispettivamente, di circa 1,5 nm e di circa 300 nm, con una temperatura di processo di soli 150 °C, il che consente di contenere i consumi energetici di fabbricazione e, soprattutto, di considerare la possibilità di trasferire la tecnologia sviluppata su substrati di tipo polimerico. I dispositivi sviluppati hanno

**Figura 8 - Lampione Stapelia**





dimostrato una buona stabilità all'esposizione alla luce, con un degrado dell'efficienza valutato inferiore al 10%.

I risultati ottenuti sono in linea con quelli ottenuti dai laboratori europei e internazionali impegnati nello stesso campo (su area di 0,25 cm<sup>2</sup> è stata attribuita ai laboratori dell'Università di Neuchatel un'efficienza stabilizzata del 10,9%).

Infine, sono state recentemente avviate attività relative all'ossido rameoso (Cu<sub>2</sub>O) in quanto materiale di basso costo e buona efficienza. Il processo di preparazione dei substrati di Cu<sub>2</sub>O è sufficientemente ben sviluppato da permettere di indagare le problematiche connesse ai dispositivi. Le celle solari di tipo Schottky sono arrivate a un buon livello di efficienza e potranno essere usate come strumenti per studi di base sul materiale e sui dispositivi. Tuttavia non sembra particolarmente utile insistere sul miglioramento della loro efficienza che presenta dei limiti intrinseci apparentemente invalicabili. Le celle solari realizzate con eterogiunzioni sono il vero banco di prova del Cu<sub>2</sub>O. Gli esperimenti finora condotti mostrano efficienze fino al 2% (record assoluto) realizzato depositando ZnO a temperatura ambiente su Cu<sub>2</sub>O.

## Il posizionamento

La disponibilità di energia inesauribile, pulita, sicura e affidabile è uno dei prerequisiti per lo sviluppo di una società sostenibile. Per assicurare la sicurezza e la sostenibilità delle forniture energetiche è necessario diversificare gli approvvigionamenti ricorrendo a risorse di energia rinnovabile. L'Europa, insieme con i grandi paesi industrializzati, ha indicato il fotovoltaico quale tecnologia energetica di punta per il futuro. L'impiego su vasta scala del fotovoltaico è però un processo di lungo termine. Sebbene la tecnologia sia già oggi disponibile, richiede ancora ulteriori sviluppi, soprattutto per quanto riguarda i costi dell'energia prodotta. I benefici economici del settore com-

merciale della tecnologia fotovoltaica sono già stati dimostrati e hanno dato l'avvio ad una significativa competizione globale. Il prossimo decennio è considerato decisivo per la soluzione delle problematiche inerenti il fotovoltaico: partecipare alla competizione è qualificante per il livello tecnologico di un paese. La partecipazione è subordinata alla presenza di industrie a livello nazionale che operino su tecnologie commerciali integrate da attività di ricerca avanzate. Tutto ciò richiede un ambizioso e coerente programma di ricerca e sviluppo, incentivi al mercato, informazione e formazione, normative e regole chiare.

Tutte queste attività fanno parte del bagaglio culturale che l'ENEA ha accumulato negli ultimi venti anni:

- *Capacità di ricerca innovativa nei diversi settori anche complementari alla tecnologia fotovoltaica.* Le attività già avviate e inserite in realtà europee di ricerca sono uno dei punti di forza dell'ENEA che necessitano di un'azione di rinnovamento e slancio perché troppo a lungo trascurate nei piani strategici nazionali. In questa direzione l'Agenda Strategica Europea, messa a punto anche con il contributo italiano, potrà dare un significativo apporto all'individuazione di progetti che ci consentano di recuperare la leadership del settore che detenevamo negli anni 90. La capacità ENEA di integrare competenze diverse in un unico sforzo rappresenta l'elemento chiave di una nuova proposta.
- *Capacità di trasferimento delle competenze sviluppate.* È qui che l'ENEA può dare il contributo più rilevante: aprendo i propri laboratori a nuove imprese di settore per sviluppare insieme nuovi prodotti e processi, formando contemporaneamente tecnici qualificati in grado di sostenere una sfida imprenditoriale. Proprio nel settore industriale è stata aperta oggi in Italia la grande sfida alla competitività che dovrà essere giocata sul campo dell'innovazione e della tecnolo-

gia. Nuove imprese fotovoltaiche possono trovare in ENEA competenze uniche e altamente specialistiche sulle tecnologie del silicio cristallino. La promozione di imprese tecnologicamente avanzate vede in primo piano non solo i Ministeri preposti, come da tradizione, ma anche le Regioni che sembrano pronte a subentrare nelle competenze che derivano loro dalla modifica del titolo quinto della Costituzione. È probabilmente a livello locale una nuova via da percorrere; l'ENEA, grazie alla sua presenza sul territorio, ha da sempre interagito con le realtà locali e ancora di più potrebbe farlo con tecnologie che sul territorio si sviluppano nell'ottica della valorizzazione della generazione distribuita e del consumo locale. È questo il paradigma su cui si basano le rinnovabili in genere, e il PV in particolare, che unisce concetti di localizzazione a esigenze territoriali: energia prodotta laddove viene utilizzata

rispettando criteri di sostenibilità locale e valorizzazione del potenziale endogeno.

- *Capacità di formazione/informazione.* È ormai competenza consolidata che l'ENEA svolge a diversi livelli, sia all'interno dei laboratori, con la formazione scientifica di laureandi, dottorandi e borsisti, sia all'esterno con lezioni universitarie e specialistiche (master universitari) che con corsi di formazione per installatori, progettisti e collaudatori.
- *Capacità di 'lobbying'.* La ventennale esperienza nel ruolo di unico riferimento italiano nel fotovoltaico conferisce all'ENEA l'autorevolezza necessaria a creare rapidamente una "massa critica" con tutti gli attori italiani del settore, con cui da sempre intrattiene rapporti di collaborazione scientifica. Ciò è urgente e importante, per evitare che vengano disperse risorse economiche e umane in "rivoli" e iniziative frammentate o con scarse probabilità di successo.

## Glossario

- a-Si - Silicio amorfo, materiale semiconduttore a struttura amorfa  
 BOS - Balance of System, corrisponde alla parte non fotovoltaica di un impianto (Inverter, strutture, cavi, quadri di controllo)  
 CdTe - Telluriuro di Cadmio, semiconduttore composto  
 CIGS - Diseleniuro di Indio, Rame e Gallio, semiconduttore composto  
 c-Si - Silicio cristallino  
 CIS - Diseleniuro di Indio e Rame, semiconduttore composto  
 CVD - Chemical Vapour Deposition, tecnica di deposizione da fase vapore di materiali  
 LP-MOCVD - Low Pressure MethalOrganic Chemical Vapour Deposition, tecnica di deposizione da fase vapore di materiali  
 m-Si - Silicio monocristallino  
 PECVD- Pressure Enhanced Chemical Vapour Deposition, tecnica di deposizione da fase vapore di materiali solitamente amorfi o microcristallini  
 p-Si - Silicio policristallino  
 PV - Fotovoltaico  
 Ribbon - Silicio in nastri di spessore pari a circa 300 micron  
 SiC - Carburo di Silicio  
 SiN - Nitrato di Silicio  
 TCO - Transaprent Conductive Oxide, ossidi trasparenti conduttori  
 Wp - Watt di picco, unità di misura della potenza nominale di un impianto fotovoltaico misurata in condizioni standard