



REGIONE SICILIANA
ASSESSORATO INDUSTRIA

ENERGIA

per un futuro sostenibile
e **fonti rinnovabili**



SICENEA
pura energia di Sicilia



Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente

Energia per un futuro sostenibile
e fonti rinnovabili

Energia per un futuro sostenibile e fonti rinnovabili

2008 ENEA
Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente
Lungotevere Thaon di Revel, 76 - Roma

ISBN 88-8286-160-0



REGIONE SICILIANA
ASSESSORATO INDUSTRIA

Energia per un futuro sostenibile e fonti rinnovabili

di

Francesco Paolo Vivoli

con il contributo di

G. Anselmi, F. Gracceva, P. La Mendola, C. Mocci
M. Citterio, N. Fratini, D. Marano, G. Mizzoni
V. Sabatelli, S. Castello, G. Graditi, R. Schioppo
A. Scognamiglio, B. Serrecchia, L. Zingarelli, L. Pirazzi
G. Braccio, E. Scoditti, A. Moreno, M. Ronchetti, S. Fontana

editing

A. Sinopoli, A. Medoro, M. Renzopaoli
F. Narracci

Presentazione

Il volume viene pubblicato nell'ambito del programma SICENEA, finanziato dall'Assessorato Industria della Regione Siciliana per promuovere una maggiore consapevolezza riguardo i problemi energetici e ambientali e sensibilizzare all'impiego delle fonti rinnovabili e all'uso razionale dell'energia nei vari settori produttivi e civili.

Uno degli obiettivi del programma è il raggiungimento, da parte di Enti locali, Imprese, progettisti, installatori, energy manager e cittadini, di un adeguato livello di consapevolezza riguardo le relazioni tra consumi di energia, inquinamento e cambiamenti climatici e sulle scelte necessarie a perseguire un modello di sviluppo sostenibile, che assicuri condizioni favorevoli allo sviluppo e disponibilità di energia nel rispetto dei limiti biofisici del pianeta.

Questo volume, dopo una visione d'insieme sulle problematiche che riguardano le interazioni tra i sistemi energetici e l'ambiente, offre una panoramica aggiornata sullo sviluppo, sullo stato di utilizzo e sulle prospettive delle nuove fonti rinnovabili. Rivolto a tecnici, professionisti e a quanti operano, svolgono azione di orientamento e prendono decisioni in ambito energetico, esso consente di acquisire gli strumenti necessari all'individuazione delle opportunità di utilizzo delle risorse energetiche rinnovabili sul territorio di interesse, nonché alla messa in opera di strategie di sviluppo di "virtuosi" sistemi energetici locali.

Indice

Premessa	13
----------------	----

ENERGIA PER LO SVILUPPO

Capitolo Uno

Sviluppo sostenibile e energia	16
1.1 Cos'è lo "sviluppo sostenibile"?	17
L'approccio umanistico	18
Formulare una strategia di sviluppo sostenibile	19
Energia e sostenibilità	20
1.2 Energia: caratteristiche e specificità	21
Il calore	21
L'energia meccanica	21
Aspetti collaterali all'utilizzo dell'energia	23
1.3 Sviluppo e variabilità del clima terrestre, "effetto serra"	23

Capitolo Due

L'energia e le interazioni con l'ambiente	26
2.1 Accordi Internazionali	28
2.2 La conversione energetica	28
Il "valore" delle fonti di energia	28
Ritornare all'atmosfera "naturale"	28
La conversione energetica, solo se necessario	29
2.3 Elettricità e idrogeno	29
2.4 Generazione centralizzata e reti di distribuzione o generazione diffusa?	30

Capitolo Tre

L'energia nel mondo: scenari	32
3.1 I due scenari energetici dell'IEA	33
Lo scenario di riferimento	33
Lo scenario alternativo	34
3.2 Il quadro energetico mondiale: gli scenari di evoluzione dei mercati ..	35
3.3 Le rinnovabili nel quadro energetico complessivo	36
3.4 Previsioni e scenari per le fonti di energia rinnovabili	38
Scenari globali	38
Le politiche europee per lo sviluppo delle fonti rinnovabili	39

	I recenti orientamenti dell'Unione Europea	41
	Il ruolo delle FER in alcuni scenari di riferimento	41
3.5	Un obiettivo per il sistema energetico globale: la "stabilizzazione del clima"	41
3.6	Efficacia delle forme di incentivazione e ostacoli allo sviluppo delle FER	44

Capitolo Quarto

	Evoluzione delle politiche energetiche per lo sviluppo sostenibile	46
4.1	La conferenza di Rio 1992	47
4.2	La conferenza di Kyoto 1997	48
	I meccanismi del Protocollo di Kyoto	49
	Il Mercato Europeo delle Emissioni	50
4.3	La cooperazione della UE con i paesi in via di sviluppo	52
	Investimenti Diretti Esteri	52
	La distorsione tariffaria	52
	Un quadro di riferimento per la cooperazione energetica	53
4.4	Sostegno e incentivazione delle rinnovabili in Italia	54

Capitolo Cinque

	Le fonti di energia	62
5.1	Le fonti non rinnovabili	64
	Il carbone	65
	Gli idrocarburi	66
	L'energia nucleare	68
5.2	Le fonti rinnovabili di energia	70
	Energia eolica	71
	Energia fotovoltaica	71
	Energia da biomasse	72
	Energia solare termica	73
	Energia geotermica	73
	Energia idraulica	73
	Energia dal mare	74
	Idrogeno e fuel cell	74

Capitolo Sei

	Esternalità delle fonti energetiche	76
6.1	Esternalità: concetto teorico e quadro d'insieme	77
6.2	La problematica della valutazione economica delle esternalità	79
	Concetti di valore dell'ambiente: il "valore d'uso" e il "valore di esistenza"	79
	Calcolo delle esternalità: la metodologia ExternE	82

LE FONTI RINNOVABILI DI ENERGIA**Capitolo Sette**

Perché le fonti rinnovabili	86
7.1 Energia e attività antropiche	87
Lo sfruttamento delle risorse naturali	88
Conseguenze delle attività antropiche	88
7.2 Le fonti energetiche rinnovabili	89
7.3 Sostenibilità dello sviluppo e fonti rinnovabili	90
7.4 Quali opzioni per il futuro?	91

Capitolo Otto

Energia solare termica	94
8.1 La tecnologia	95
Il sistema solare termico	95
Impianti ad alta e a bassa temperatura	95
8.2 Collettori solari: caratteristiche e principi di funzionamento	97
8.3 Le aree di applicazione	99
Acqua calda sanitaria	99
Piscine e agricoltura	100
Riscaldamento ambientale: pannelli e pavimenti radianti	100
8.4 Costi e benefici	101
8.5 Il mercato	103
8.6 Le attese della tecnologia	103

Capitolo Nove

Energia solare termodinamica	106
9.1 Il sistema solare termodinamico	107
9.2 Le tecnologie attualmente disponibili	108
I collettori parabolici lineari: Parabolic Trough	108
Il sistema a torre centrale: Solar Tower	110
I dischi parabolici: Parabolic Dish	111
9.3 Costi e benefici	112
9.4 Lo stato attuale delle tecnologie	113
Il ruolo dell'ENEA	114
L'impianto dimostrativo dell'ENEA	114

Capitolo Dieci

Energia fotovoltaica	116
10.1 La conversione fotovoltaica	117
La radiazione solare	117
L'effetto fotovoltaico	118

	La cella fotovoltaica: efficienza di conversione	119
	La tecnologia del silicio	120
	Le nuove tecnologie, i film sottili, la terza generazione	120
	Moduli fotovoltaici e stringhe	121
10.2	Il sistema fotovoltaico	123
	Il campo o generatore fotovoltaico	124
	Le strutture di sostegno moduli	125
	Il sistema di conversione e controllo della potenza: inverter	125
10.3	Tipologie impiantistiche e applicazioni	128
	Gli impianti isolati (stand-alone)	129
	Gli impianti collegati alla rete (grid-connected)	130
10.4	Vantaggi del fotovoltaico	131
	Il risparmio di combustibile	132
	Tempo di ritorno dell'investimento energetico	132
	L'impatto sul territorio	133
10.5	Costi	134
10.6	Mercato e prospettive	136

Capitolo Undici

	Energia eolica	140
11.1	La risorsa eolica	141
	Il vento	141
	Dove installare un impianto eolico	142
11.2	Impianti eolici, sottosistemi e tipologie	142
	Rotore	143
	Generatore	143
	Elettronica di controllo	143
	Tipologie di impianti	144
11.3	La progettazione	145
11.4	Le applicazioni	147
	Le applicazioni on shore	147
	Le applicazioni off shore	148
11.5	Costi e benefici	148
11.6	Il mercato	150

Capitolo Dodici

	Energie dalle biomasse	152
12.1	Le biomasse e la loro conversione energetica	153
12.2	Le tecnologie di conversione termochimica	154
	Combustione	156
	Gassificazione	158
	Pirolisi	159
	La termovalorizzazione dei rifiuti	161

12.3	Le tecnologie di conversione biochimica	161
	Digestione anaerobica	162
	Digestione aerobica	163
12.4	Produzione di combustibili liquidi	163
	Produzione di biodiesel	163
	Fermentazione alcolica e bioetanolo	164
12.5	Le principali aree di applicazione	164
	Energia per uso domestico	165
	Energia termica per usi industriali	165
	Biocombustibili per i veicoli a motore	165
12.6	Costi e benefici	167
	Potenziale energetico	167
	Biomasse e territorio	168
12.7	Mercato e sviluppi futuri	168

Capitolo Tredici

	Idrogeno e celle a combustibile: energia per il futuro	170
13.1	Il futuro energetico: fonti rinnovabili e idrogeno	171
13.2	L'idrogeno come "vettore energetico"	172
	Proprietà	172
	Il vettore idrogeno e la resa energetica	172
13.3	Le tecnologie di produzione dell'idrogeno	173
	Produzione di idrogeno da combustibili fossili	174
	Produzione di idrogeno da fonti rinnovabili	176
13.4	Le tecnologie per l'accumulo e il trasporto dell'idrogeno	178
	Tecnologie di accumulo	178
	Il trasporto dell'idrogeno	180
13.5	Le applicazioni	181
13.6	Celle a combustibile	182
	Caratteristiche	182
	Gli Impianti	184
	Aree di applicazione	185
	Costi	187

Allegati

	Un mondo di energia più sostenibile	190
	Motivazione e situazioni di mercato che influenzano e determinano gli scenari energetici futuri	196
	Unità di misura dell'energia	201

	Bibliografia	203
--	---------------------------	-----

Premessa

L'obiettivo del volume è quello di offrire una *panoramica sullo stato di utilizzo e sulle prospettive offerte dalle fonti rinnovabili*, a partire dall'illustrazione delle *problematiche energetico-ambientali nell'ottica dello sviluppo sostenibile*.

Si comincerà, nella prima sezione del volume, con l'approfondimento del concetto di sviluppo sostenibile, le sue interrelazioni con l'Energia, e verrà infine delineato il quadro energetico attuale e le previsioni per il futuro, in particolare per quanto riguarda le fonti rinnovabili.

Queste verranno poi, nella seconda parte del volume, trattate attraverso l'analisi sintetica dei seguenti aspetti:

- definizione della tecnologia e sviluppi previsti,
- settori e campi di applicazione,
- indicazioni sui costi,
- mercato e prospettive.

Quale naturale complemento alla trattazione delle fonti che hanno origine dal sole, si delineeranno anche le informazioni di base utili all'approccio alla tecnologia che sfrutta il vettore energetico idrogeno. Se questo fosse ricavato da fonti rinnovabili infatti, il suo utilizzo come vettore energetico porterebbe, nelle speranze di tanti ricercatori, in un futuro più o meno prossimo, a un sistema energetico che renda compatibile l'aspettativa di sviluppo con *le capacità del pianeta di sostenere tutte le diverse forme di vita, rispettando i limiti delle sue risorse naturali e garantendo un elevato livello di protezione e miglioramento della qualità dell'ambiente*.

Verranno illustrati, per ciascuna fonte rinnovabile, gli aspetti utili alla progettazione di strategie, azioni programmatiche e politiche finalizzate alla valorizzazione della risorsa, anche al fine di sollecitare la domanda di innovazione da parte delle imprese per rispondere alla richiesta di uno sviluppo regionale socialmente e ambientalmente consapevole.

Questo volume vuole permettere al lettore di appropriarsi degli strumenti necessari per una scelta energetica adeguata alle proprie esigenze relativamente:

- alla messa in opera di strategie di sviluppo del sistema energetico locale in un'ottica di sviluppo sostenibile,
- all'individuazione delle opportunità di localizzazione delle risorse energetiche rinnovabili disponibili sul territorio di interesse.

Il volume è rivolto sia ai decision makers, opinion makers e energy managers, sia ai tecnici operanti nei diversi settori che afferiscono alle tecnologie e agli impianti che sfruttano le diverse fonti che hanno origine dal sole.

Essendo stato concepito come strumento di sensibilizzazione, le conoscenze e le informazioni qui raccolte potranno essere fruite da tutti coloro che, interessati alle tematiche energetiche e ambientali, vogliono passare dalla conoscenza dei problemi ad un'azione pratica; ivi compresi, almeno per un'azione di primo approccio alla tecnologia, i progettisti degli impianti.

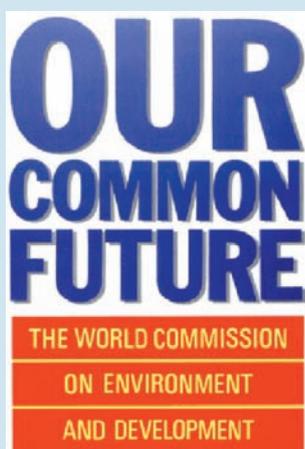


Energia per lo sviluppo



Capitolo **Uno**

Sviluppo sostenibile ed energia



[1.1] Cos'è lo "Sviluppo sostenibile"?

L'espressione *Sviluppo sostenibile*, spesso usata dai mass media e ricorrente in molti dibattiti, proviene sia dal linguaggio politico che dalle scienze sociali e economiche.

Comprendere e tradurre questa espressione nel contesto delle scienze tecniche e naturali non è semplice. A riguardo si possono considerare diversi autorevoli punti di vista.

La definizione più nota di sviluppo sostenibile è quella riportata nel rapporto della commissione Brundtland, *Our Common Future*, dove viene presentato come *sostenibile lo sviluppo che soddisfa le esigenze del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare le proprie*.

La pubblicazione del rapporto nel 1987 e il lavoro della Commissione Internazionale per l'Ambiente e lo Sviluppo (WCED, World Commission for Environment and Development), costituirono la base per il summit del 1992 di Rio, l'approvazione di Agenda 21 e l'istituzione della Commissione delle Nazioni Unite per lo sviluppo sostenibile. Il Principio 1 della dichiarazione di Rio sull'ambiente e sullo sviluppo recita:

«Gli esseri umani sono al centro delle preoccupazioni relative allo sviluppo sostenibile. Essi hanno diritto ad una vita sana e produttiva in armonia con la natura».

I tre pilastri dello sviluppo sostenibile sono: crescita economica, equità sociale, protezione dell'ambiente. La realizzazione di uno sviluppo sostenibile non può essere raggiunta agendo solo sull'aspetto ambientale del problema, ma è necessaria anche l'integrazione con le politiche economiche e sociali, e può essere attuato intraprendendo attività, pratiche e azioni di breve, lungo e medio periodo.

La *componente economica* prevede la massimizzazione del benessere, e di conseguenza l'eliminazione della povertà, ma con un utilizzo efficiente delle risorse naturali. Le "esigenze" cui fa riferimento la definizione del rapporto sono soprattutto quelle di base dei poveri, cui occorre dare la priorità.

La *componente sociale* vuol promuovere un maggior benessere diffuso, migliorando l'accesso all'istruzione e ai servizi medici di base, garantendo il rispetto per i diritti umani, valorizzando le diverse culture, il pluralismo, la partecipazione dei cittadini nei processi decisionali. L'equità, intesa come distribuzione di benefici e accesso alle risorse, è una componente

essenziale delle dimensioni economica e sociale dello sviluppo sostenibile.

La *componente ambientale* è connessa alla conservazione e al miglioramento delle risorse fisiche e biologiche dell'ecosistema.

L'approccio umanistico

L'uso della parola "sviluppo", secondo una prospettiva umanistica, si riferisce ad un miglioramento complessivo degli standard di vita della popolazione di un Paese. Secondo quest'interpretazione, al fine di testare gli sviluppi correnti, è necessario fare le seguenti comparazioni:

- la condizione corrente di un Paese, rispetto a quella precedente,
- la condizione della popolazione di un Paese, rispetto a quella di un'altra popolazione vivente in una zona geografica simile.

La *valutazione del grado di sviluppo di un Paese* si basa su dei fattori, a ciascuno dei quali deve essere assegnato un valore, un'importanza, in altri termini un "peso", in rapporto agli altri. Questa valutazione può non essere univoca, poiché dipende da elementi che sono spesso arbitrari; ad ogni modo, tutti gli studiosi sono d'accordo su alcuni fattori economici e sociali che caratterizzano lo "sviluppo" fra questi:

- la disponibilità per tutti gli abitanti di un Paese di cibo sufficiente;
- l'accesso all'acqua potabile, nonché all'acqua per usi igienici, per l'agricoltura e per altri usi, in quantità sufficiente per tutti e di buona qualità;
- la disponibilità di case, allo scopo di garantire il dovuto comfort alla vita umana, anche quando le condizioni ambientali esterne sono rigide;
- l'opportunità per i giovani di conseguire la conoscenza necessaria a compren-

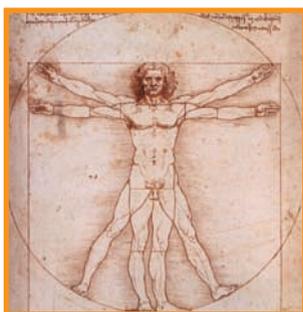
dere il contesto naturale e sociale entro il quale essi vivono;

- a capacità di prevenire o trattare malattie, attraverso l'igiene, la diffusione di conoscenza, le competenze terapeutiche;
- la capacità di trasportare persone e beni in tutta sicurezza, in modo conveniente e nei tempi che le tecnologie disponibili rendono possibili;
- la disponibilità di energia di buona qualità e in quantità sufficiente; è proprio l'energia, per inciso, che permette di conseguire gli obiettivi appena menzionati.

Tutti questi fattori possono essere "pesati" analizzando i dati risultanti da analisi statistiche. Ad esempio, possono essere misurati:

- cibo, calorie e alimenti usati al giorno per popolazione;
- accesso alle risorse idriche e metri cubi d'acqua disponibili per persona;
- metri quadrati di abitazione fruibili pro capite;
- calorie e kWh elettrici da usare all'anno per esigenze connesse alla qualità di vita;
- longevità media della popolazione, diffusione di patologie connesse alla mancanza di igiene e alle condizioni di vita, statistiche sulla mortalità infantile e alla nascita, ecc.

I differenti fattori sopra elencati sono senza dubbio soggetti a influenza reciproca, e il loro "peso" è determinato dalla cultura di chi esprime la valutazione. Inoltre, essi presumono una forte presenza di "collettività" nello sviluppo. È impossibile organizzare la fornitura d'acqua, le reti fognarie, le scuole e gli ospedali, senza una capacità di collaborazione collettiva e senza un'efficiente distribuzione dei compiti.



Altri fattori che caratterizzano lo sviluppo sono quelli riguardanti le relazioni e la cultura. Ad esempio:

- disponibilità di tempo libero,
- attività artistiche, culturali e ricreative,
- attività fisiche e sportive,
- libera partecipazione nell'amministrazione e nell'organizzazione collettiva,
- uguaglianza di diritti e doveri,
- informazione e diffusione di idee e di cultura, ecc.

Di certo, qualsiasi idea di sviluppo deve comprendere questi fattori.

Formulare una strategia di sviluppo sostenibile

L'implementazione di un'efficace strategia di sviluppo sostenibile nazionale, necessariamente legata a fattori politici, storici, ecologici locali, dovrebbe prevedere la definizione di processi di consultazione, negoziazione, mediazione e di costruzione di consenso sulle diverse priorità. Tale approccio dà ai "decision-makers" la possibilità di adottare un approccio sistematico.

Tra i vantaggi di quest'approccio è possibile individuare:

- una semplificazione nell'attività di pianificazione, insieme ad un miglioramento dell'efficacia delle politiche pubbliche;
- una migliore allocazione delle risorse, in base alle priorità individuate nel processo di partecipazione, che permetta una divisione dei benefici dello sviluppo su basi più eque;
- un miglioramento delle capacità del singolo nella risoluzione di problemi complessi, che comporterà lo sviluppo di capacità multidisciplinari a livello centrale e locale.

Molte nazioni sviluppate hanno formulato strategie di crescita economica, di sviluppo sociale, e strategie ambientali, inte-

grandole alle politiche già esistenti. Si tratta di un processo oneroso che prevede cambiamenti legislativi, il coinvolgimento della società civile e lo sviluppo di nuove capacità, ma l'assenza di coordinamento fra le diverse politiche finisce per penalizzare il processo virtuoso di creazione di un sistema energetico sostenibile.

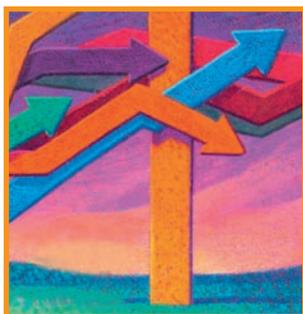
Spesso, nello sviluppo di strategie di sviluppo sostenibile, si parte da una piattaforma base iniziale che contiene la spiegazione della strategia che si vuol perseguire, di come essa si integri con le politiche esistenti, dei suoi benefici e di ciò che comporta la sua attuazione. Per attuare concretamente una politica di questo tipo è tuttavia necessario chiarire i ruoli e le responsabilità delle istituzioni, e individuare i meccanismi con cui rendere partecipe la società civile.

Il secondo passo consiste nell'analisi della corrente situazione economica, sociale e ambientale ad opera di agenzie, università, istituzioni politiche e di ricerca, al fine di identificare i problemi più importanti, compresi quelli avvertiti dall'opinione pubblica, e di stabilire le priorità.

A questo punto si può iniziare ad implementare la strategia, stabilendo i ruoli e le responsabilità degli enti coinvolti, preparando dettagliati piani d'azione (in genere di durata annuale), aggiornando la legislazione, preparando programmi e priorità di allocazione delle risorse economiche disponibili.

L'esperienza maturata nei Paesi che hanno attuato politiche di sviluppo sostenibile ha mostrato l'importanza della fase di monitoraggio e valutazione delle azioni intraprese, per verificarne l'efficacia attraverso l'uso di indicatori qualitativi e quantitativi che evidenzino i progressi compiuti e i punti in cui migliorare il piano d'azione.

Si tratta quindi di un processo continuo



di pianificazione, azione e verifica dell'efficacia di quanto intrapreso.

Energia e sostenibilità

Il concetto di "sviluppo", secondo una prospettiva umanistica che tenga conto principalmente delle esigenze della comunità umana, considera in qualche modo accettabili tutti i cambiamenti che l'ambiente e il territorio subiscono a causa del comportamento umano, se finalizzati a migliorare gli standard di vita delle persone.

Il punto di vista "ambientalista"

Un approccio ideologico opposto è quello che considera negativamente quei comportamenti umani che modificano l'ambiente naturale entro il quale la comunità vive. Secondo quest'approccio l'ambiente naturale è la conseguenza dei molteplici cambiamenti prodotti dal comportamento dell'uomo nel corso della sua vita. Benché, anche in assenza dell'uomo, l'ambiente abbia subito continui e profondi cambiamenti per cause biologiche, geologiche e astronomiche, determinanti l'estinzione e il completo rinnovo delle specie, i processi tecnologici creati dall'uomo hanno modificato l'ambiente in modo molto incisivo, comportando una

variazione dei materiali e delle risorse che la Terra ci offre.

Quali attività umane sono "sostenibili"?

Sono "sostenibili" tutte quelle azioni che non comportano un danneggiamento o una perdita di risorse naturali e che quindi si svolgono nel pieno rispetto dell'ambiente. La sostenibilità, o "eco-compatibilità", delle attività umane è sempre oggetto di valutazioni soggettive; alcuni requisiti delle attività sostenibili sono:

- la prevenzione dei comportamenti che hanno un impatto negativo sull'ambiente,
- la reversibilità dei cambiamenti ambientali,
- la possibilità di reintrodurre nell'ambiente i materiali usati nei processi tecnologici, alla fine dei processi stessi,
- la riutilizzazione dei materiali e dei differenti tipi d'energia impiegati nei processi, allo scopo di limitare la misura delle trasformazioni ambientali.

A riguardo, ci sono specifiche impostazioni tecniche che, nei paesi industrializzati, sono spesso incluse in leggi e regolamenti. In realtà, non esistono variazioni ambientali totalmente reversibili, o materiali estratti dall'ambiente che possano esservi reintrodotti come se nulla fosse accaduto. In campo energetico vengono considerati sostenibili quei modi di produrre e utilizzare le diverse forme di energia che non inquinano l'atmosfera, il suolo, le acque. Attualmente il 20% della popolazione mondiale utilizza oltre l'80% delle risorse del pianeta in modo non sostenibile, consumando fonti energetiche fossili, non rinnovabili, ad una velocità abbondantemente superiore quella della loro formazione. In questa maniera si immette in atmosfera un'elevata quantità di gas ad effetto serra, con conseguenti alterazione dei cicli



L'Energia è Libertà

“L'energia è libertà”, è questo un concetto che l'uomo ha maturato da epoche remote. Giove, ci dice la mitologia greca, guardando alla terra dall'alto dell'Olimpo, la vide abitata da uomini e animali che vivevano miseramente, nascosti nelle loro tane, dalle quali si avventuravano raramente per cercare cibo di cui riuscivano a nutrirsi con molti stenti.

Il padre degli dei decise di donare agli esseri che popolavano la terra strumenti per procurarsi il cibo senza stenti, gli animali ebbero allora zampe, artigli, ali, fiuto, astuzia, forza. L'uomo, che impaurito era rimasto nascosto nella sua caverna, non visto, non ricevette alcun dono. Prometeo, un semidio, che come tale partecipava della natura umana, mosso a compassione rubò una scintilla di quella sostanza sacra di cui era costituito il cielo empyreo e gli astri, *il fuoco*, e lo donò agli uomini perché lo usassero per farsi padroni della terra.

Quindi già nell'immaginario umano dei tempi più remoti il fuoco, la prima forma di energia, viene visto quale *strumento di libertà dalla condizione umana di essere debole e esposto ai pericoli dell'ambiente circostante*. L'energia del fuoco permette all'uomo di scaldarsi e sopravvivere, di cuocere la carne per meglio nutrirsi, di fondere i metalli con cui procurarsi strumenti per coltivare la terra e armi per difendersi, etc.



naturali e produzione di polveri fini nelle città. Per questi motivi è opportuno adottare, oltre le fonti rinnovabili, comportamenti che comportino un minor consumo di combustibili fossili e usi più efficienti dell'energia.

[1.2]

Energia: caratteristiche e specificità

Il calore

Il calore, nell'era “pre-industriale”, era prodotto tramite combustione per vari scopi, quali:

- estrazione, raffinamento e lavorazione di metalli,

- cottura di mattoni, piastrelle e ceramiche,
- produzione di calce,
- manifattura del vetro.

A queste attività di tipo industriale/commerciale vanno aggiunti altri usi energetici, quali:

- l'illuminazione di strutture pubbliche e private,
- il riscaldamento di strutture e la cottura dei cibi,
- il riscaldamento di acque termali.

Nel corso delle epoche che hanno preceduto quella attuale abbiamo bruciato carburanti non fossili ma contenenti un alto potenziale energetico-chimico, come:

- il legno e il carbone,
- l'olio vegetale derivante da coltivazione o da raccolta,
- la cera d'api,
- il grasso proveniente dalla caccia o dall'allevamento di animali (maiali, bovini, pecore, balene).

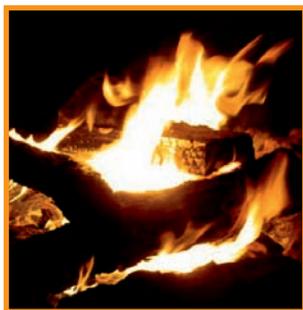
L'uso energetico di questi materiali ha comportato il sorgere di alcuni problemi di “non sostenibilità” come:

- l'esaurimento di materiali non rinnovabili,
- la desertificazione di alcune ampie regioni e, come risultato, la repentina alterazione del clima locale,
- l'estinzione, o la diminuzione della popolazione, di specie animali e vegetali.

L'energia meccanica

Lo sfruttamento del lavoro degli animali ha comportato in molti paesi un ampio utilizzo di campi coltivabili per il foraggio e problemi igienici, divenuti insolubili dal XVII secolo in poi, riguardanti lo smaltimento delle deiezioni animali e il trattamento delle carcasse di animali morti.

Usare esseri viventi alla stregua di dispo-





sitivi di conversione dell'energia termica del cibo in lavoro meccanico è, dal punto di vista termodinamico, un processo con rendimenti estremamente bassi.

A parte quello muscolare degli animali (e in taluni casi anche di quello di schiavi umani) che è stato prevalente, il lavoro meccanico disponibile per le attività umane proveniva da energia meccanica prelevata da fenomeni naturali senza necessità di conversioni, e quindi con rendimenti tecnici relativamente alti.

L'energia eolica e quella idrodinamica in acqua fluenti o con piccoli dislivelli, sono state la base energetica della navigazione e di tutte le manifatture preindustriali.

Poiché nel passato la tecnologia disponibile non era in grado di effettuare conversioni da una forma di energia all'altra, le fonti di calore a bassa temperatura, come quelle solari e geotermiche, erano usate

Tutti i tipi di energia sono uguali?

I fisici hanno una chiara idea circa la nozione di "qualità dell'energia" e spesso danno per scontato che questo concetto sia conosciuto da tutti. In realtà, è necessario chiarire questo concetto perché su di esso si basano molte questioni tecniche e economiche, e con più consapevolezza di questo concetto potrebbero evitarsi molti errori e irrazionalità. Come, ad esempio, nel caso dell'energia potenziale gravitazionale.

Ciascuno può comprendere che secondo la meccanica fisica la stessa quantità di energia è correlabile a: 1.000 m³ di acqua a 1.000 metri di altezza sul livello medio del mare, oppure 1 milione di m³ di acqua ad 1 metro di altezza sul livello del mare. Ma la trasformazione del potere meccanico è differente nei casi sopra menzionati a causa delle modalità proprie della produzione di energia da liquidi dinamici. La qualità dell'energia, per alcuni aspetti, può essere banalmente comparata alla moneta convertibile, il cui cambio può avvenire in un senso pagando una commissione bassa, mentre nel senso opposto potrebbe risultare impossibile o richiedere una commissione molto alta.

Il significato di "Energia" come contenuto termico può essere associato alla temperatura come indice della sua "qualità". L'energia meccanica, in tutte le forme, può sempre trasformarsi completamente in calore, così come l'energia chimica potenziale e quella elettrochimica, per le quali la temperatura limite ottenibile dipende dalla tecnologia utilizzata per la trasformazione. Dovremmo considerare il collegamento costante fra i prodotti delle attività umane e l'energia



convertita in ogni fase di lavoro, anche quelle accessorie, per ottenere i prodotti finiti. Ciascun bene fabbricato richiede conversioni di energia, e altra energia viene convertita per i trasporti e per consentire il lavoro delle persone che hanno concorso alla lavorazione.

In molti casi il consumo d'energia è regolato dalle variazioni di entropia. Per esempio, se dell'acqua potabile fosse imprudentemente mischiata con un flusso d'acqua di scarto alla stessa temperatura, sembrerebbe non esserci nessuna conversione di energia, ma c'è una forte variazione entropica ed è necessario un ammontare considerevole di energia di alta qualità da convertire per ripristinare le cose come erano all'inizio.

al posto della combustione in processi a bassa temperatura:

- terme,
- industrie tessili,
- essiccatoi per la conservazione dei cibi, e così via...

Aspetti collaterali all'utilizzo dell'energia

I cambiamenti ambientali occorsi durante l'era pre-industriale sono stati spesso considerati trascurabili.

In realtà in passato la domanda di combustibile è stata molto alta perché venivano adottati processi spesso finalizzati solo all'ottenimento di alte temperature con ridotto recupero di calore. L'estrazione di combustibile dall'ambiente naturale era determinata da vicende naturali o dal commercio, senza considerare il ciclo di rigenerazione.

L'uso del legno per la costruzione di edifici, per la combustione o per la produzione di carbone ha comportato l'estinzione di grandi ecosistemi forestali (deforestazione) e l'alterazione di equilibri idrogeologici e biologici. Per queste ragioni, il crescente uso di combustibili fossili (primo tra tutti il carbone) era accolto dagli scienziati dell'epoca dell'Illuminismo come ele-

mento di salvaguardia dell'ambiente naturale, non più saccheggiato indiscriminatamente dal prelievo di combustibile.

L'uso del carbone divenne allora il simbolo dello sviluppo economico, veniva impiegato per uso termico civile (riscaldamento delle abitazioni) e termico industriale: nei processi di siderurgia e per fornire l'energia necessaria alle attività industriali e al settore dei trasporti.

La stessa agricoltura si trasformò drasticamente: l'attività agricola, una volta coinvolgente in larga misura il lavoro umano, divenne oggetto di meccanizzazione e coinvolse un numero sempre più limitato di lavoratori.

La trasformazione dell'agricoltura ha effetti non previsti e molto pericolosi per l'equilibrio ecologico globale. Basti pensare che l'uso di trattori potenti per l'aratura, che arrivano ad arare spessori molto profondi, comporta la formazione della cosiddetta "soletta di lavorazione" che innesca i movimenti franosi, in quanto, in corrispondenza di tale superficie, si forma un accumulo di acqua che contribuisce, insieme ad altri fattori geologici, allo scorrimento del suolo sovrastante, provocando movimenti franosi grandi e piccoli con pericolo di catastrofi idrogeologiche (alluvioni, grandi frane).



[1.3] Sviluppo e variabilità del clima terrestre, "effetto serra"

Nell'ultima decade l'attenzione sul tema della *sostenibilità* dello sviluppo dei comportamenti standard della vita umana è stata progressivamente focalizzata sugli effetti che i modelli energetici, adottati incautamente e basati sull'abuso incontrollato della combustione, possono avere



sull'evoluzione della distribuzione delle zone climatiche nel nostro pianeta. L'illusione riguardante la regolarità e l'immutabilità del clima è dovuta alla brevità della vita dell'essere umano, in confronto al periodo nel corso del quale i fenomeni climatici evolvono.

Chiunque sia interessato alla geologia o all'archeologia non si sorprende nello scoprire, nel sottosuolo terrestre, livelli alternati di sabbia desertica testimoniando secoli di clima arido e, contemporaneamente, detriti mostranti secoli di clima piovoso. Non ci si sorprende se si scoprono nella stessa area geografica fossili di animali e piante tipici della Savana e animali da clima polare. Nell'attuale distribuzione climatica, il nome dato alla Groenlandia dal marinaio Viking può sembrare beffardo, ma certamente quando essa fu scoperta il nome "green land" era giustificato.

Le osservazioni sulle attività solari hanno dimostrato che l'energia solare che arriva sulla terra è soggetta a rilevanti variazioni di intensità dipendenti da fenomeni esplosivi di enormi proporzioni che avvengono all'interno della massa solare.



Le paure che oggi sono espresse da una parte del mondo scientifico, e soprattutto dai mass media, non riguardano la conoscenza e le dinamiche universalmente accettate del sistema energetico terrestre. La preoccupazione deriva dal rischio di introdurre, attraverso l'attività umana, una perturbazione nell'equilibrio del sistema. In accordo con le ipotesi più pessimistiche, queste perturbazioni potrebbero influire sui sistemi energetici della terra in modo imprevedibile, precipitandoli in una condizione di progressiva instabilità. Ciò potrebbe causare effetti di differenti proporzioni, comunque non proporzionali alle cause che li hanno prodotti, o anche effetti a catena che potrebbero agire in direzioni imprevedibili.

Gli autori dell'espressione "effetto serra", oggi universalmente usata e accettata senza alcuna analisi semantica, certamente non contemplavano la connotazione tecnica del termine, ma davano piuttosto enfasi all'impatto emozionale che quest'espressione, intesa come minaccia, può determinare nei "non addetti".

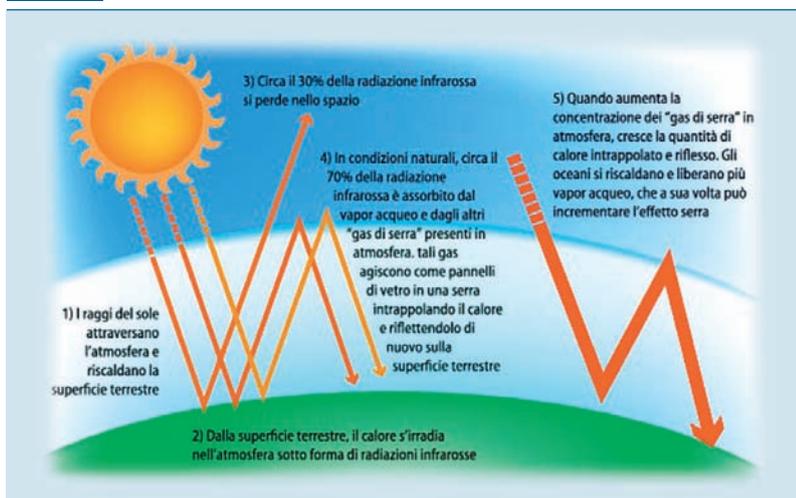
In una serra i raggi solari vengono assorbiti dalle piante e dalla copertura della serra, che li imprigiona facendo innalzare la temperatura.

In atmosfera accade un fenomeno naturale analogo: il vapore acqueo e i "gas serra" riescono a trattenere, sotto forma di calore, parte dell'energia che proviene dal Sole, intrappolando la radiazione termica che viene emessa dalla superficie terrestre riscaldata dal Sole (fig. 1.1).

Grazie a questo fenomeno la temperatura media del pianeta si mantiene sui 15 °C, contro i -19 °C che si avrebbero in assenza di gas serra. In realtà la "temperatura media" è un valore che non fornisce una valutazione dell'energia immagazzinata nella biosfera terrestre, in cui è presente come:

Fig. 1.1

Effetto serra



- energia latente della fusione e dell'evaporazione,
- pressione atmosferica,
- energia cinetica dell'aria e delle onde marine,
- moti della marea e delle onde,
- instabilità salina.

Il problema del continuo aumento della temperatura globale dipende dalla crescente concentrazione di "gas serra" in atmosfera, dovuta sia ad aumenti delle

emissioni di origine antropica, sia, nel caso dell'anidride carbonica, alla distruzione delle foreste: gli alberi, infatti, sono degli accumulatori di carbonio, e con la loro combustione cresce la quantità di anidride carbonica liberata in aria, e di conseguenza l'effetto serra.

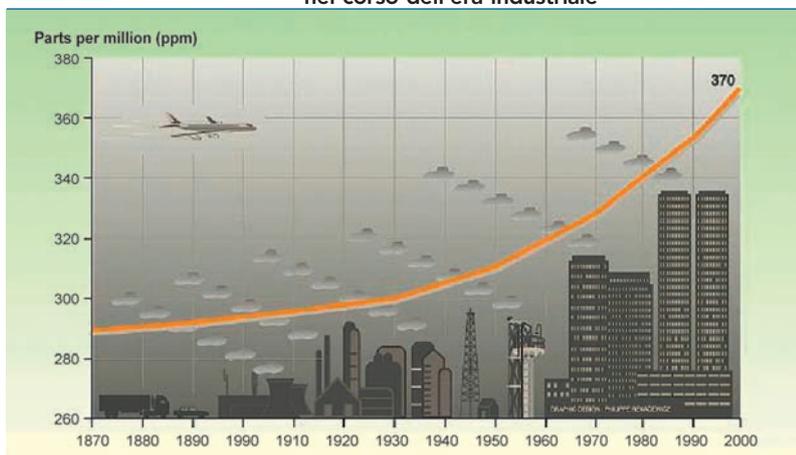
Dai dati disponibili si osserva (fig. 1.2) che la concentrazione di questo gas nell'atmosfera ha iniziato ad aumentare a partire dalla prima rivoluzione industriale, alla fine del Settecento. A quell'epoca la concentrazione era di circa 260 ppm, mentre oggi, poco più di duecento anni dopo, è di circa 370 ppm.

A questo punto possono cominciare le divergenze nell'interpretazione dei dati. Si può sostenere che in realtà l'aumento di concentrazione di CO₂ non è dovuto alle attività dell'uomo ma è un fatto naturale. In effetti, analizzando soprattutto i campioni di atmosfera imprigionati nei ghiacci dell'Antartide, si è potuto concludere che nelle ere geologiche passate ci sono stati grandi cambiamenti nella composizione dell'atmosfera dovuti evidentemente a cause naturali. Tuttavia, attualmente sappiamo calcolare molto bene la quantità di CO₂ che immettiamo annualmente nell'atmosfera, bruciando combustibili fossili. Questo, unito alla grande rapidità dell'aumento di concentrazione, senza precedenti nella variazioni naturali che sono avvenute in decine di migliaia di anni, porta ragionevolmente ad accettare un'origine umana per l'aumento attuale della CO₂.

È utile anche ricordare che:

- la velocità di crescita delle piante aumenta con la maggior concentrazione di CO₂ in atmosfera,
- ogni ettaro di terreno trasformato in deserto immette nell'atmosfera migliaia di tonnellate di CO₂.

Fig. 1.2

Variazione della concentrazione di CO₂ nell'atmosfera nel corso dell'era industriale

A scenic landscape featuring a large, dark-trunked pine tree in the foreground. The ground is covered in lush green grass and wildflowers. In the background, a stone house with a red roof is visible, surrounded by more trees and a hazy, mountainous horizon. A semi-transparent grey banner is overlaid at the top, containing the text 'Capitolo Due'. A thin white curved line is also present on the right side of the image.

Capitolo **Due**

L'energia e le interazioni con l'ambiente

La strategia (o spesso l'assenza di strategia) nel settore dell'energia, che ha improntato la politica economica delle Grandi Potenze del XIX e XX secolo, si basava sulle principali convinzioni del passato:

- scenario di crescita economica illimitata,
- continua scoperta di nuove risorse naturali,
- infinita capacità dell'ambiente di ricevere i rifiuti umani,
- possibilità di imporre il prezzo dei materiali grezzi.

Queste convinzioni, che talvolta hanno indotto a comportamenti irrazionali, si sono dimostrate infondate dopo la Seconda Guerra Mondiale a causa della situazione politica che si era stabilita. Gli

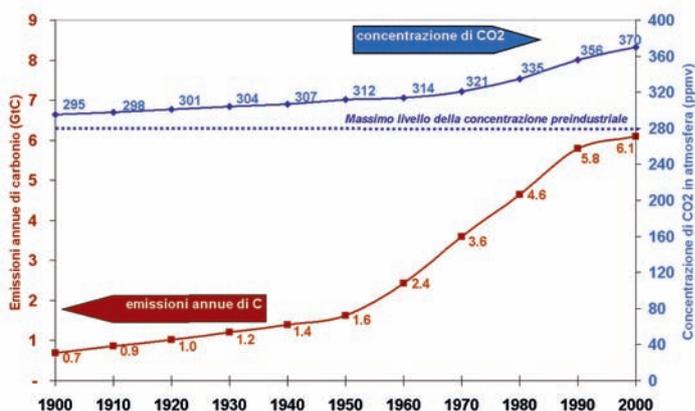
economisti e gli scienziati avrebbero a quel punto dovuto iniziare a comunicare correttamente tra di loro e a provare a lavorare attraverso nuove strade.

L'opinione pubblica di tutte le nazioni ha oggi una maggiore sensibilità all'ambiente rispetto al passato e pertanto può influire sulle scelte politiche dei governi, in modo da indurli alla formulazione di politiche finalizzate ad un modello di sviluppo compatibile con le risorse e l'equilibrio fisico-chimico del pianeta.

Nonostante gli studi effettuati, esiste ancora un certo margine di incertezza circa la validità e l'entità dei nessi causali che vanno dai consumi energetici alla concentrazione di anidride carbonica in atmosfera, e da questa al fenomeno del riscaldamento globale. L'enorme aumento dei consumi, tutto basato sulle fonti fossili, ha infatti comportato emissioni in continua crescita e, quindi, un aumento significativo della concentrazione di CO₂ nell'atmosfera.

Come evidenziato dalla figura 2.1, l'evoluzione delle emissioni di carbonio mostra un perfetto parallelismo con l'evoluzione del consumo totale. La concentrazione di CO₂ in atmosfera che ne è derivata risulta oggi superiore del 25% rispetto al 1900 e, secondo l'IPCC (Intergovernmental Panel On Climate Change), l'attuale livello della concentrazione non è mai stato superato negli ultimi 420.000 anni (e pro-

Fig. 2.1 Emissioni annue di carbonio e concentrazione di CO₂ in atmosfera



Per un approfondimento su:

• **Sfide globali. L'esigenza di un mondo di energia più sostenibile,** vedi l'allegato: "Un mondo di energia più sostenibile".

probabilmente nemmeno negli ultimi 20 milioni di anni).

La conseguenza, sempre secondo l'IPCC, è stata un aumento della temperatura globale media della superficie terrestre pari a circa 0.6 °C, con un incremento che è stato probabilmente il maggiore degli ultimi 1.000 anni.

[2.1] Accordi internazionali

La ratifica di accordi internazionali sulla riduzione della combustione di carburante fossile è resa difficoltosa dalle obiezioni di chi:

- è scettico riguardo l'efficacia di tale riduzione e non vuole mettere in crisi il sistema economico,
- trarrebbe vantaggio da una possibile accelerazione dei cambiamenti climatici.

Gli argomenti addotti da questi ultimi sono molto spesso opportunistici. È sufficiente menzionare il caso della recente messa al bando dei Cloro Fluoro Carburi (CFC), accusati di aver provocato il buco dell'ozono, appunto in coincidenza con l'avvento di nuovi brevetti relativi a com-

posti analoghi, probabilmente anche meno sicuri.

[2.2] La conversione energetica

Il "valore" delle fonti di energia

Fino a qualche decina di anni fa i prezzi dei materiali energetici seguivano l'andamento economico di tutte le materie prime. Il loro prezzo era determinato da relazioni commerciali, e il basso livello tecnologico riduceva la possibilità di cambiare la tipologia e differenziare le fonti di approvvigionamento.

I prezzi dell'energia, risultante da conversione termica o di origine idroelettrica, erano in buona misura determinati da tasse e imposte, e variavano a seconda dei paesi.

La capacità di impiegare materie prime differenti ha fatto sorgere, in seguito, un mercato dell'energia nel quale i prezzi sono e saranno sempre più determinati principalmente dal valore termodinamico e ambientale dell'energia scambiata, e meno da relazioni commerciali. In futuro, l'elevato impatto ambientale della combustione, e dei prezzi da pagare per attenuarlo, inciderà su questo valore.

Ritornare all'atmosfera "naturale"

Molti movimenti di opinione internazionali chiedono ai governi di adottare politiche per l'ambiente che annullino le modifiche prodotte dall'uomo all'ambiente naturale, in modo da restaurare le precedenti condizioni ambientali.

Ma se osservassimo attentamente la storia dei territori potremmo notare che questi hanno subito molti cambiamenti prima ancora dell'evoluzione dell'uomo.

Ciò che noi consideriamo ambiente natu-



rale, riferendoci a quell'ambiente in cui l'uomo non disponeva di efficaci tecnologie di conversione energetica, spesso era già stato parzialmente modificato dalla presenza umana e in più larga misura dai fenomeni naturali.

Un approccio corretto per il conseguimento dello scopo sta nel proporsi obiettivi di modifiche progettate del territorio, in modo che si possano prevedere le conseguenze a lungo termine dei cambiamenti e che si lasci la possibilità di correggere gli errori.

La conversione energetica, solo se necessario

L'energia, nella sua definizione più semplice, è *la capacità di un corpo o di una sostanza di compiere lavoro*. Essa può manifestarsi in modi differenti:

- energia meccanica, connessa, ad esempio, al movimento di una turbina,
- energia elettrica, prodotta dall'alternatore azionato dalla turbina,
- energia termica, che deriva dal processo di combustione, cioè dalla reazione chimica tra una sostanza combustibile e l'ossigeno presente nell'aria,
- energia chimica, liberata da alcune sostanze mediante reazioni chimiche,
- energia nucleare, associata a reazioni di fissione nucleare,
- energia eolica, associata alle masse d'aria in movimento sulla superficie del pianeta,
- energia solare, captata direttamente dalla radiazione solare e trasformata in energia termica oppure elettrica.

Non è possibile convertire energia senza degradare una parte di essa a temperatura così bassa da non poter essere più utilizzabile.

Il comportamento più prudente nei processi di conversione, consiste nel favorire

la forma di energia più adeguata allo scopo e nel ricorrere alle conversioni solo quando non è possibile far diversamente. Per esempio, l'uso di energia come l'elettricità è ragionevole per:

- motori,
- sistemi di illuminazione,
- comunicazioni,
- informatica.

Convertire alta temperatura in elettricità, perdendone circa il 60%, per poi fare una seconda conversione ad una bassa temperatura, come accade nell'utilizzo di stufe e caldaie elettriche è, al contrario, irrazionale.

Diverso è il bilancio che si può fare quando l'energia in forma di elettricità è riconvertita per realizzare cicli termodinamici che permettono di utilizzare riserve di calore già disponibili innalzandone la temperatura, per esempio gli impianti di riscaldamento a pompa di calore, oppure i forni elettrici ermetici confrontati a quelli riscaldati a combustibile senza recupero termico come quelli delle cucine a gas. In casi come questi può essere giustificata la conversione dell'elettricità in calore perché fa parte di un ciclo complessivamente vantaggioso.

[2.3] Elettricità e idrogeno

Usare l'energia in un posto diverso da dove viene realizzata la trasformazione primaria, permette agli utenti di stare lontani dal pericolo e dall'inquinamento collegati alla produzione di quantità elevate di calore.

Il nostro livello tecnologico ci permette di trasportare energia sotto forma di elettricità con piccole perdite e pericoli ridotti, rispetto ad altri sistemi di trasporto, pur richiedendo notevoli investimenti in



infrastrutture, sia in termini economici che in termini di energia convertita per costruirli.

Nella rete elettrica:

- non c'è trasporto di materia,
- non ci sono vuoti che tornano indietro,
- ci sono pochi macchinari in movimento,
- gli episodi di interruzione del trasporto sono frequenti soltanto se la rete è eccessivamente complessa.

La conversione in elettricità consente metodi di immagazzinamento di quantità ridotte di energia con capienza ridotta, alto costo e basso rendimento, perciò sono riservati soltanto ai sistemi di emergenza. Diversa è la situazione, prevista per il prossimo futuro, della produzione di idrogeno per uso energetico.

L'idrogeno è diffuso sulla terra, ma entra nella composizione di materie, come l'acqua, con energia di legame chimico molto forte. Per rompere questo legame e ricavarne idrogeno da utilizzare a fini energetici è necessario convertire energia preziosa (quella elettrica) e il rendimento di questo processo non è molto alto.

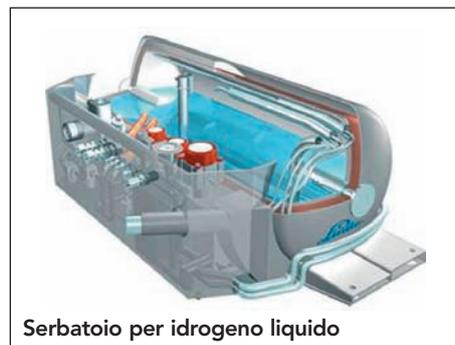
Altri svantaggi del sistema energetico basato sull'idrogeno sono:

- bassa densità dell'idrogeno allo stato

gassoso, e di conseguenza pesanti serbatoi ad alta pressione o grandi gasometri,

- perdite molto frequenti dai serbatoi e dalle condutture,
- rischio di esplosione,
- alta velocità di risalita nella stratosfera e grande affinità chimica con l'ozono,
- richiesta di molta potenza per il pompaggio nei tubi,
- temperatura di liquefazione molto bassa: $< 20 \text{ }^\circ\text{K}$.

L'idrogeno è quindi un combustibile "artificiale" difficile da trasportare e da accumulare, non dà emissioni di CO_2 se è ottenuto dall'acqua, ma il suo uso per la produzione di calore a bassa temperatura è irragionevole. Offrirebbe prospettive interessanti per la possibilità di elettrolisi inversa, sempre che si risolvano i problemi tecnologici connessi alla sua manipolazione.



Serbatoio per idrogeno liquido

[2.4] **Generazione centralizzata e reti di distribuzione o generazione diffusa?**

La conversione dell'energia in elettricità ha avuto, nell'ultimo secolo, un'espansione più grande di quella che era tecnica-

mente giustificabile, per via del basso prezzo del combustibile, per la possibilità di usare il calore prodotto tramite i reattori nucleari e per la semplicità di trasporto. Ma l'energia elettrica prodotta nelle centrali termoelettriche a partire dai combustibili fossili, vede:

- *perdite* nella conversione dall'energia chimica del combustibile fossile a quella elettrica,
- *perdite* nella trasmissione e distribuzione puntuale,
- *problemi* di inquinamento ambientale e elettromagnetico.

L'energia elettrica potrebbe essere prodotta, in alternativa ai combustibili fossili, da tecnologie che attingono direttamente all'energia solare, le fonti rinnovabili, cui non sono associati gli inconvenienti di cui sopra.

Sino ad ora è prevalsa la logica dei macroimpianti per la produzione di energia: centrali sempre più potenti sono state costruite negli stessi posti, per sfruttare il rendimento migliore dovuto al fattore di scala, per le difficoltà nell'individuazione di nuovi siti adatti alla costruzione, specie per le centrali nucleari, e infine per le minori spese di personale per la gestione.

Anche gli impianti idroelettrici sono costruiti in posizioni obbligate da condizioni idrogeologiche, e in caso di grandi impianti il territorio è stato fortemente modificato. L'energia elettrica prodotta da questi impianti in modo centralizzato è generalmente distribuita in località lontane.

Adesso le tecnologie rinnovabili, in particolare quella solare, hanno reso disponibili impianti di piccole dimensioni, a costi competitivi e con emissioni quasi nulle.

I vantaggi del decentramento produttivo, attraverso una "generazione energetica diffusa" con una rete di piccoli dispositi-

vi, sono numerosi e evidenti:

- minore stress per la rete distributiva,
- minori rischi di blackout,
- maggiore versatilità d'impiego e modularità,
- maggiore velocità di messa in opera,
- maggiore elasticità del sistema,
- minori emissioni ambientali di particolato, ossidi di azoto, di zolfo e di biossido di carbonio.

Per quanto riguarda, invece, le trasformazioni di energia del vento o solare, oggi si applicano criteri opposti rispetto la logica per la produzione energetica applicata in passato; infatti la radiazione solare ha una densità relativamente bassa ed è molto discontinua, mentre l'energia del vento ha una densità più elevata, ma è caratterizzata da una irregolarità ancora più elevata. Quale che sia la tecnologia applicata a queste due risorse naturali, attualmente esse possono comunque essere convenienti se:

- la conversione primaria avviene vicino al posto dell'uso finale,
- esiste la possibilità di scambio dell'energia prodotta con la rete di distribuzione in bassa tensione,
- è possibile l'integrazione con energia di altra provenienza.

I sistemi a bassa potenza, solari e eolici, distribuiti nel territorio offrono anche il vantaggio di essere più economici di quelli centralizzati, perché possono essere prodotti in serie e in modo standardizzato. Inoltre possono essere installati e controllati da personale con competenze tecniche modeste.

Allo stato attuale della tecnologia, difficilmente diventerà conveniente convertire l'energia eolica e solare in modo centralizzato, per distribuire nel territorio energie che sono naturalmente disponibili in modo distribuito.

An aerial photograph of an offshore oil rig in the middle of the ocean. The rig is a complex of steel structures, including a tall derrick, various cranes, and platforms. A large, semi-transparent blue pipe is overlaid on the image, curving from the top right towards the bottom left. The text 'Capitolo Tre' is positioned in the upper right area of the image, partially overlapping the blue pipe.

Capitolo Tre

L'energia nel mondo: scenari

In questo capitolo si tratterà delle problematiche che governano il mercato globale dell'energia, determinandone i costi, e di quelle relative all'approvvigionamento. Per comprendere come i prezzi dell'energia e la sicurezza del suo approvvigionamento influenzino lo sviluppo economico, e quindi sociale, delle nazioni, è necessario esaminare la struttura e gli sviluppi attesi del mercato attraverso un esame del mercato attuale e di quello atteso nel prossimo futuro, con particolare riferimento a quello delle fonti rinnovabili di energia.

[3.1] I due scenari energetici dell'IEA

L'IEA – International Energy Agency – con-

duce periodicamente un'analisi relativa alle previsioni di evoluzione dei mercati dell'energia relative alle successive tre decadi. Per far questo, vengono presi in considerazione due scenari energetici: quello di riferimento e quello alternativo.

Lo scenario di riferimento

Questo scenario di evoluzione dei dati e dei mercati energetici è basato sull'ipotesi che i governi si limitino a mettere in atto solo quei programmi e quelle politiche energetiche che essi hanno già consolidato (business as usual). Su questa base viene elaborata una serie di proiezioni a lungo termine (fig. 3.1) per la domanda di ciascuna fonte di energia e per la potenza elettrica addizionale da mettere in opera.

La domanda globale di energia aumenterà del 52% fino al 2030, ad un tasso annuale dell'1,6%. Si stima che il 70% circa dipenderà dalle richieste dei paesi in via di sviluppo, con la sola Cina che rappresenterà il 70% della loro domanda.

Il sistema energetico mondiale continuerà ad essere dominato dai combustibili fossili, che copriranno a quella data l'83% della domanda di energia. Il petrolio continuerà ad essere il combustibile principale: la domanda nel 2005, ad esempio, è stata di 84 milioni di barili al giorno, e si stima che sarà di 99 mb/d (milioni di barili per giorno) nel 2015 e di 166 mb/d nel 2030 (fig. 3.2).

Fig. 3.1 Domanda mondiale di energia primaria (Millions of tons of oil equivalent) nello scenario di riferimento, IEA 2006

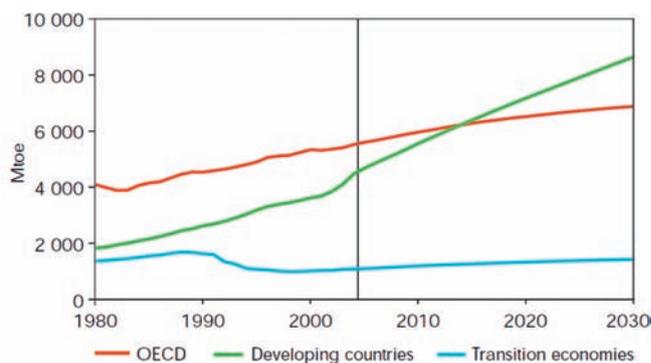
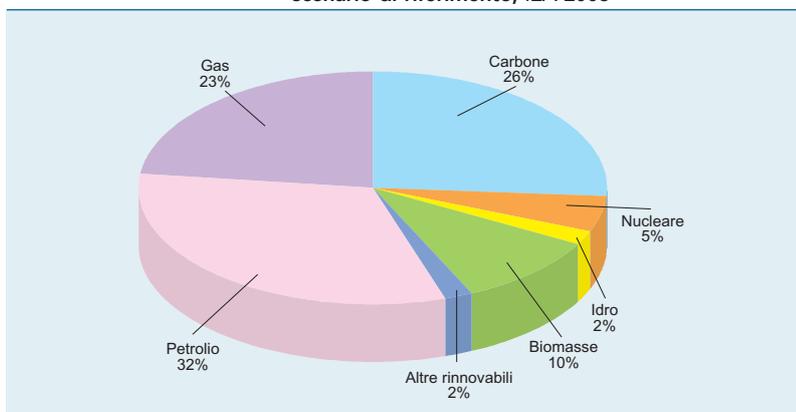


Fig. 3.2 Domanda di energia nel mondo nell'anno 2030, scenario di riferimento, IEA 2006

Il carbone, utilizzato per la generazione di energia, dovrebbe rimanere il secondo combustibile più utilizzato, pur essendo quello per il quale si stima una crescita della domanda maggiore in termini assoluti.

In aumento anche il contributo del gas naturale e dell'idroelettrico, mentre dovrebbe ridursi la percentuale di energia prodotta dal nucleare. In termini percentuali diminuirà leggermente anche la

quota di energia prodotta dalle biomasse, mentre ci sarà un leggero aumento per tutte le altre fonti energetiche rinnovabili (eolico, solare, geotermico).

Da notare che l'impatto della crescita economica e demografica (rispettivamente 3,4% e 1% l'anno in media) sarà attenuato da una riduzione dell'intensità energetica dell'1,2%, in ragione dell'effetto combinato dei cambiamenti strutturali in campo economico, del progresso tecnologico e dell'aumento dei prezzi energetici.

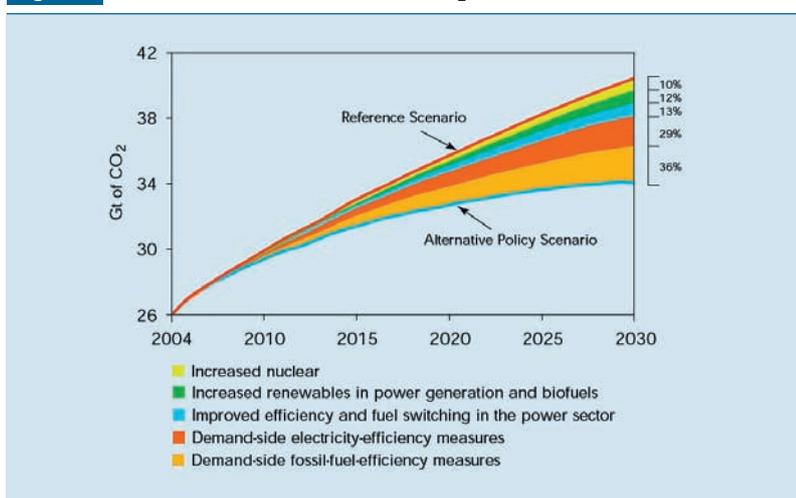
Nei paesi industrializzati si registrerà un rallentamento della crescita della domanda di energia, che nella UE non supererà lo 0,4% annuo, mentre i consumi dei paesi in via di sviluppo (attualmente al 40%) aumenteranno rapidamente tanto da arrivare a costituire, nel 2030, la metà della domanda complessiva.

Lo scenario alternativo

Lo scenario "alternativo" tiene conto degli impatti, sul mercato dell'energia, sul consumo di combustibili fossili e sulla riduzione di emissioni, delle politiche e delle misure già adottate, i cui effetti di faranno sentire anche nei prossimi anni, e di quelle in via di approvazione od elaborazione da parte dei paesi aderenti all'OCSE (Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico¹).

In assenza di nuove politiche di governo, i bisogni di energia del mondo aumenteranno inesorabilmente, e con essi la domanda di combustibili fossili e le conseguenti emissioni in atmosfera di CO₂ (fig. 3.3).

La domanda mondiale di energia primaria, nel 2030, potrebbe attestarsi sui 16.900 Mtep, il 10% in meno rispetto allo scena-

Fig. 3.3 Differenza di emissioni di CO₂ tra i due scenari, IEA 2006

1. Definita in sede internazionale come OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development)

rio di riferimento; si tratta di una misura di poco inferiore al consumo attuale della Cina.

Il consumo di petrolio dovrebbe crescere ad un tasso medio annuo dello 0,9%, passando dagli attuali 3.940 Mtep a quasi 5.000 Mtep (circa l'11% in meno rispetto allo scenario di riferimento). Il carbone, a parità di tasso annuo di crescita, dovrebbe avere una domanda di 3.512 Mtep, quasi il 21% in meno rispetto i consumi previsti dallo scenario di riferimento.

Il gas naturale raggiungerà invece i 2.877 Mtep nel 2015 e i 3.370 Mtep nel 2030, ad un tasso medio annuo dell'1,5% (il 2% fino al 2015): al termine del periodo preso in considerazione se ne consumerà quindi il 13% in meno rispetto allo scenario di riferimento, poiché per la produzione di energia si inizieranno ad utilizzare combustibili a basso contenuto di carbonio.

Crescerà la domanda delle altre fonti energetiche: nel 2030 per il nucleare dovrebbe essere del 24% in più rispetto lo scenario di riferimento raggiungendo i 1.070 Mtep, per l'idroelettrico appena il 3% (422 Mtep) mentre per le biomasse la domanda crescerà di solo 58 Mtep (fig. 3.4).

Il consumo delle altre fonti rinnovabili (eolico, geotermico e solare) nel 2030 sarà

più alto del 26% rispetto lo scenario di riferimento, arrivando ai 77 Mtep, e la sua domanda verrà soddisfatta per 2/3 dal settore della generazione di energia.

[3.2] Il quadro energetico mondiale: gli scenari di evoluzione dei mercati

Il fabbisogno globale di energia è probabile che continui a crescere costantemente per almeno per altre due decadi e mezzo. Se i governi aderissero alle politiche correnti, la domanda di energia nel mondo aumenterebbe del 50% nel 2030 rispetto ad oggi, e più del 75% di tale aumento riguarderebbe i 3 principali combustibili fossili. In questo contesto, il ruolo dell'area MENA (Middle East and North Africa) nel prodotto globale del gas e del petrolio è destinato a svilupparsi sostanzialmente, sempre che i paesi del MENA continuino ad investire abbastanza in produzione di energia e infrastrutture per il trasporto.

Queste tendenze globali suscitano alcune serie inquietudini. In questo scenario infatti le emissioni di biossido di carbonio, destabilizzanti per il clima, continuerebbero ad aumentare, mettendo in dubbio la sostenibilità a lungo termine del sistema energetico globale. La dipendenza dei paesi consumatori dalle importazioni provenienti da un esiguo numero di Paesi MENA si acuirebbe ulteriormente, comportando preoccupazioni per la sicurezza della disponibilità di energia (fig. 3.5).

Le politiche di governo dei paesi consumatori potrebbero, e senza dubbio vorranno, modificare in qualche modo questa tendenza globale e aprire scenari diversi in tema di energia. I leader del G8 e di molti grandi paesi in via di sviluppo,

Fig. 3.4 Domanda di energia nel mondo nell'anno 2030 secondo lo scenario alternativo, IEA 2006

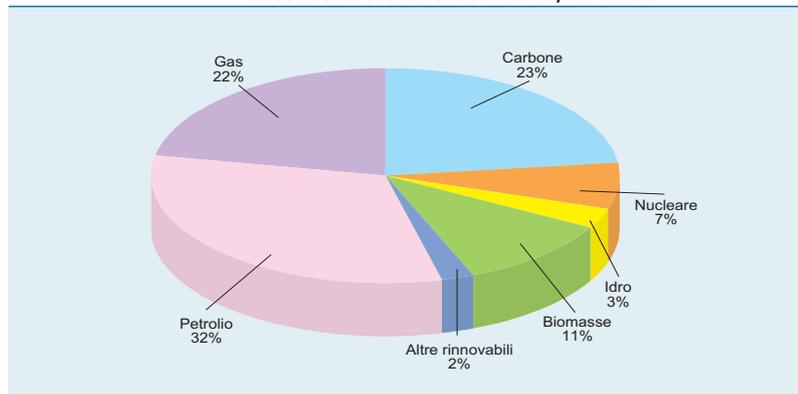
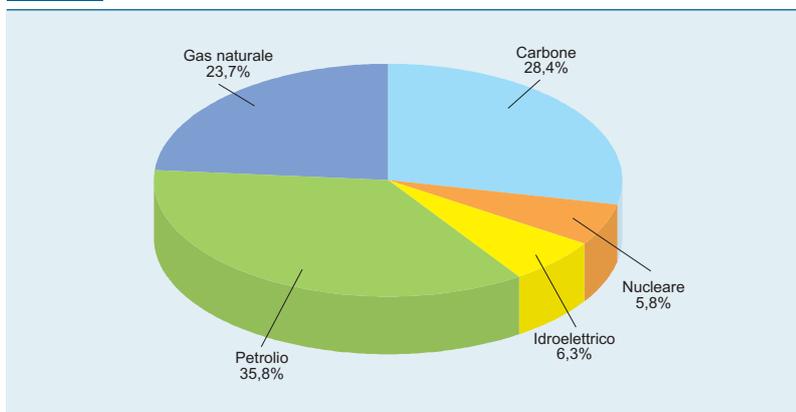


Fig. 3.5 Consumo percentuale di fonti primarie previsto nel 2007

BP Statistical Review of World Energy

incontrandosi a Gleneagles nel luglio 2005, hanno manifestato l'esigenza di un'azione più incisiva per contrastare il consumo crescente di combustibili fossili e hanno discusso il problema delle emissioni di gas-serra.

La maggior parte dei governi dell'OCSE ha dichiarato la propria disponibilità ad impegnarsi di più per la sostenibilità del consumo energetico e anche altri paesi del mondo mostrano di voler aderire alla causa. Politiche di governo impegnate in tal senso sono molto più probabili se i prezzi dell'energia rimangono elevati. In tal caso le politiche dei paesi consumatori potrebbero decidere di ridurre la domanda mondiale di petrolio e di gas provenienti dall'area MENA.

Secondo lo Scenario Alternativo del Rapporto dell'IEA: World Energy Outlook 2005, se i governi dei paesi ad alto consumo mettessero effettivamente in pratica nuove politiche, puntate sulla tutela dell'ambientale e su questioni di sicurezza dell'energia, la richiesta di combustibili fossili e le emissioni dell'anidride carbonica nel mondo potrebbero ridursi significativamente. Ma anche in questo caso, la richiesta di energia globale nel

2030 sarebbe comunque superiore del 37% a quella di oggi e il volume delle esportazioni di idrocarburi dall'area MENA si svilupperebbe significativamente. Per invertire queste tendenze sono necessarie azioni politiche molto più radicali di quelle prese in considerazione oggi dai paesi consumatori.

[3.3]**Le rinnovabili nel quadro energetico complessivo**

Nel 2006 le fonti energetiche rinnovabili coprivano a livello mondiale circa il 18% dei consumi finali (fig. 3.6). Sul totale dell'energia prodotta da fonti rinnovabili le biomasse solide costituiscono la parte preponderante, con l'80% della produzione, grazie al diffuso utilizzo di biomasse non commerciali (soprattutto paglia, legno e rifiuti animali) nei Paesi in via di sviluppo. Tra le altre fonti l'idroelettrico rappresenta il 16% del totale della produzione da rinnovabili, la geotermia il 3,2%, mentre solare e eolico costituiscono complessivamente lo 0,8% della produzione. Complessivamente, dai primi anni settanta ad oggi, la produzione di energia da fonti rinnovabili è cresciuta ad un tasso annuo medio del 2,3%, leggermente superiore al tasso di crescita annuo dell'offerta di energia primaria.

Dal 1990 la crescita più significativa, in valori percentuali, 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 pari a circa il 25%, dovuta essenzialmente alle nuove installazioni nei Paesi sviluppati 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 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, in particolare in Paesi asiatici come Cina e Vietnam, e dell'America Latina come Brasile, Argentina e Paraguay. Tale tendenza dovrebbe confermarsi nel futuro tenuto conto che i grandi impianti che sono stati realizzati nei Paesi più industrializzati nel secolo scorso, hanno fortemente ridotto il poten-

ziale residuo ancora utilizzabile in modo compatibile con l'ambiente.

Quasi il 90% della biomassa solida è prodotta e consumata, prevalentemente per il riscaldamento e la cottura dei cibi, nei Paesi non-OECD, in particolare nei Paesi in via di sviluppo del sud dell'Asia e dell'Africa sub-sahariana, mentre nei Paesi più industrializzati si verifica un ricorso sempre più limitato a tale fonte per lasciare spazio a nuove forme di energia.

In ragione dell'elevato ricorso alla biomassa solida per usi energetici, i Paesi non-OECD sono i maggiori utilizzatori delle fonti rinnovabili con una percentuale dell'ordine del 75% della domanda totale di energia. I Paesi OECD forniscono poco più del 20% delle rinnovabili a livello mondiale, mentre consumano il 50% dell'offerta mondiale di energia.

Le rinnovabili rappresentano nei Paesi OECD circa il 6% della fornitura totale di energia, questa percentuale supera il 20% nei Paesi non-OECD e arriva al 50% nel continente africano, dove è massimo l'apporto di legna da ardere.

Mentre nei Paesi OECD oltre la metà dell'energia fornita da fonti rinnovabili è destinata alla generazione elettrica, a livello mondiale il grosso della produzione da rinnovabili è destinato ai settori residenziale e terziario, e l'utilizzo per la generazione elettrica è limitato a poco più del 20%. Nonostante ciò le rinnovabili costituiscono la terza grande fonte di produzione di energia a livello mondiale, con una quota di quasi il 18% (fig. 3.7).

Nel settore della generazione elettrica, l'idroelettrico, con circa il 16% della quota della produzione totale, copre poco meno del 90% dell'energia elettrica complessivamente fornita dalle rinnovabili. A fronte di un tasso di crescita della generazione elettrica mondiale che, nell'ultimo decennio, è stato del 2,7%, quello della

Fig. 3.6

Contributo delle fonti energetiche ai consumi finali di energia, 2006

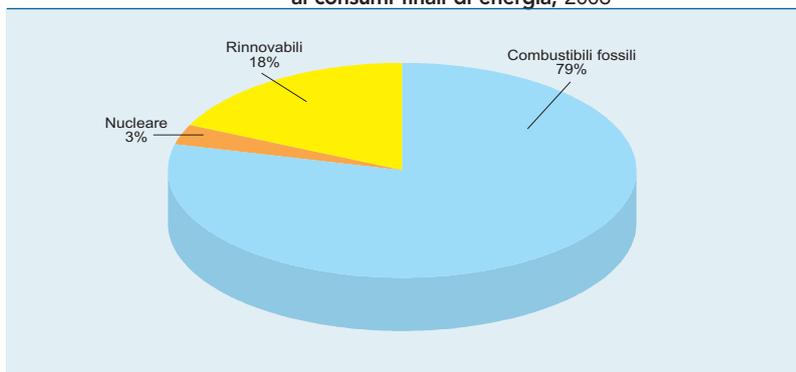


Fig. 3.7

Contributo percentuale delle fonti rinnovabili alla produzione di energia, 2006

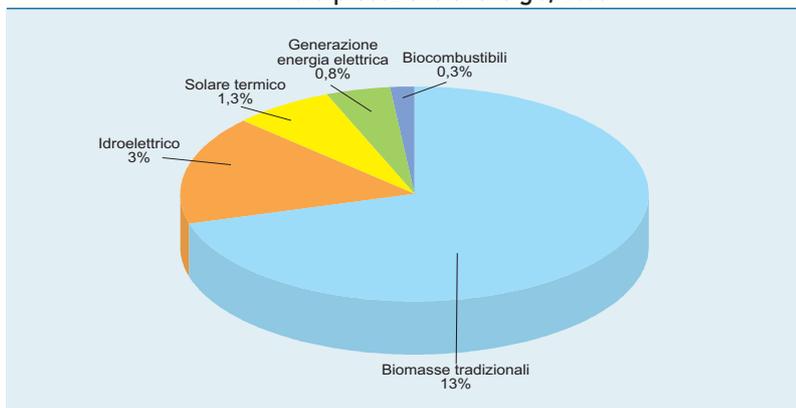
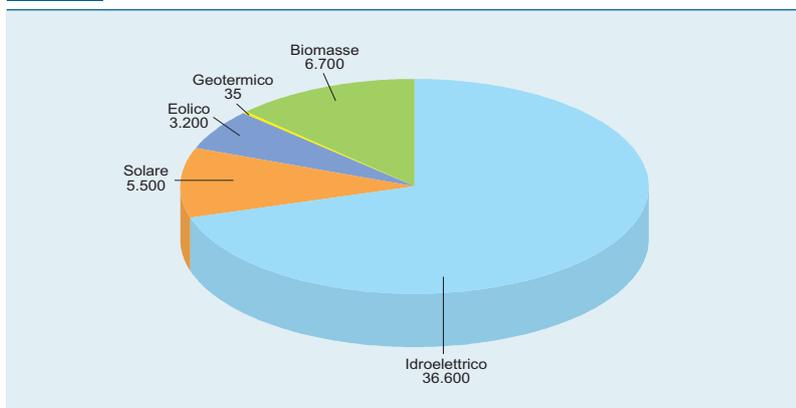
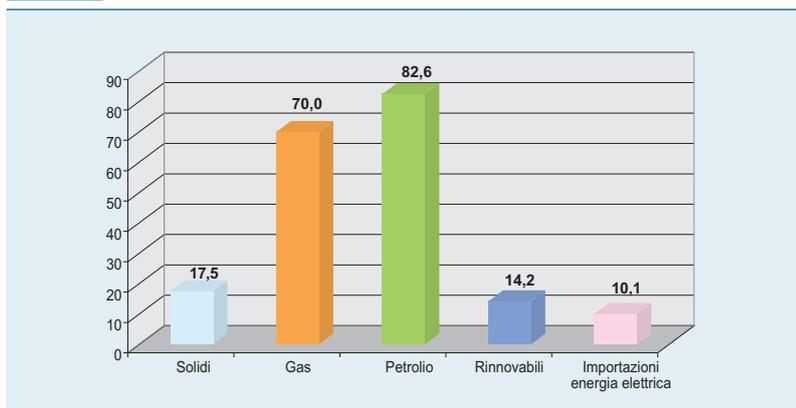
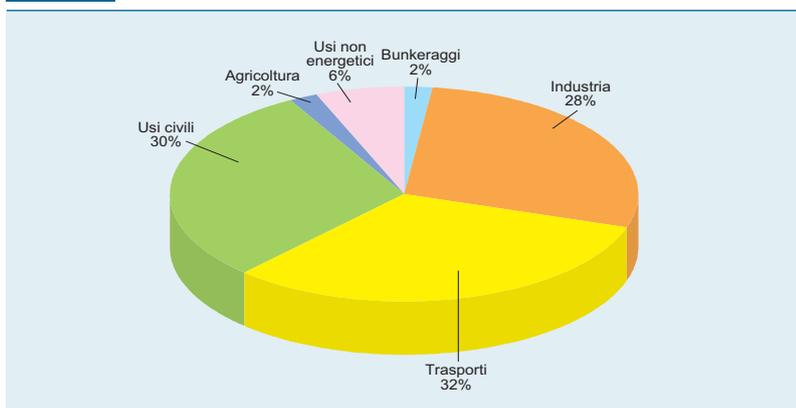


Fig. 3.8 Produzione elettrica da fonti rinnovabili (GWh) in Italia, 2006**Fig. 3.9** Consumi interni lordi d'energia in Italia (Mtep), 2007**Fig. 3.10** Impieghi dell'energia per settore in Italia, 2007

produzione di energia elettrica da rinnovabili (diverse dall'idroelettrico), si è attestato sul 2,1%. Ciò ha comportato una riduzione della quota da rinnovabili dal 19,5% del 1990 al 18% del 2006.

Dati riguardanti l'Italia sono riportati nelle figure da 3.8 a 3.10.

[3.4] Previsioni e scenari per le fonti di energia rinnovabili

In questa parte del volume ci si propone, in primo luogo, di delineare un quadro di riferimento dell'evoluzione del ruolo delle fonti energetiche rinnovabili (FER) nel breve, nel medio e nel lungo periodo, differenziando l'analisi tra le diverse fonti, allo scopo di definire il prevedibile potenziale di sfruttamento delle diverse fonti rinnovabili.

In secondo luogo, dopo aver individuato per ogni livello territoriale un obiettivo circa il ruolo delle FER nel sistema energetico di riferimento, che possa essere visto come il potenziale realistico di sfruttamento delle FER, viene valutata la distanza che separa l'evoluzione di riferimento da quella auspicata e la plausibilità delle attese di sfruttamento.

Scenari globali

Una delle ragioni fondamentali alla base della costruzione di scenari energetici sta nella capacità di un insieme di diversi scenari di rappresentare complessivamente le possibili evoluzioni del sistema energetico. La maggior utilità dell'uso della scenaristica si dimostra soprattutto nel lungo periodo, quando lo scenario si differenzia sempre più dalla previsione, e una molteplicità di scenari diversi permette di ricavare un quadro delle evoluzioni possibili del sistema oggetto di studio, fornendo ai *policy maker* informazioni per le loro

Per un approfondimento su:

- Sviluppo Economico della Cina
- Sviluppo Economico dell'India
- Politiche energetiche negli Stati Uniti
- Il progresso tecnologico indotto dai prezzi dell'energia

vedi l'allegato:
"Motivazione e situazioni di mercato che influenzano e determinano gli scenari energetici futuri"

decisioni. In particolare, gli scenari di lungo periodo sono quelli in grado di fornire indicazioni riguardo a problematiche la cui risoluzione richiede tempi lunghi, come la stabilizzazione del clima globale, evidenziandone le conseguenze in diverse possibili scelte di policy.

Dato il legame molto stretto tra questione climatica e tecnologie che non emettano gas serra come le fonti rinnovabili, sembra utile indagare l'evoluzione del consumo mondiale di tali fonti in diversi scenari di lungo periodo.

Particolarmente utile appare un esame sia degli scenari di riferimento sia di quelli di stabilizzazione del clima (fig. 3.11), attraverso un'analisi delle caratteristiche fondamentali di questi ultimi e della correzione che essi implicano rispetto agli scenari rappresentativi delle tendenze attuali.

Gli scenari considerati sono i sei scenari IIASA-WEC del 1998 e i sette scenari "principali" contenuti nel lavoro dell'IPCC del 2000.

Le politiche europee per lo sviluppo delle fonti rinnovabili

L'Unione Europea mira ad aumentare l'uso delle risorse rinnovabili per limitare la dipendenza dalle fonti fossili convenzionali ed allo stesso tempo far fronte ai pres-

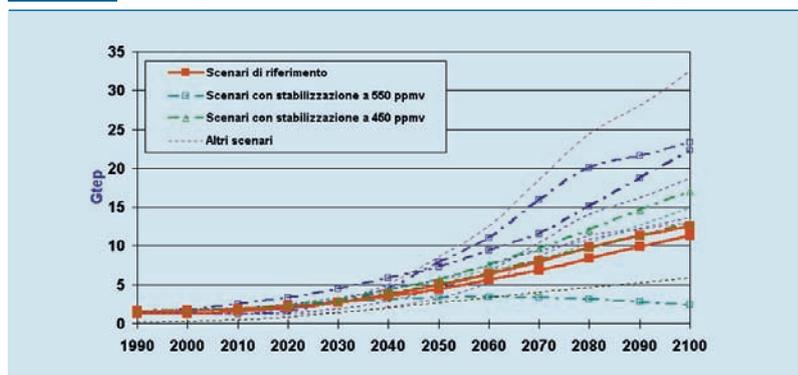
santi problemi di carattere ambientale che sono generati dal loro utilizzo.

A conferma di ciò già nella Direttiva 2001/77/CE "Promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili", (recepita con varie modalità dagli stati membri) veniva posto come traguardo il soddisfacimento, entro il 2010, di una quota pari al 12% del consumo interno lordo di energia ed al 22% di quello dell'energia elettrica, attraverso l'utilizzo di fonti rinnovabili. Per ottenere questi risultati nella direttiva sono indicati degli obiettivi differenziati per ogni singolo Stato membro, e l'Italia si è posta l'obiettivo di raggiungere, entro il 2010, una quota pari al 22% della produzione elettrica nazionale.

Per il raggiungimento degli obiettivi sono stati individuati diversi strumenti, riconducibili a due modelli fondamentali. Da un lato, vi sono i sistemi basati sulle quantità, tra cui i meccanismi di asta competitiva e il più recente sistema dei certificati verdi, che negli ultimi anni ha avuto un successo crescente non solo in Europa (dove è in corso di realizzazione o in fase di preparazione in Olanda, Gran Bretagna, Italia, Svezia e Belgio, mentre è stato rinviato in Danimarca). Quest'ultimo, nel quale la remunerazione degli impianti rinnovabili è composta dalla cessione dell'energia elettrica e dalla vendita del certificato verde (il cui valore è determinato da un mercato sorretto da una domanda obbligatoria), ha tra gli altri il pregio di permettere il controllo delle quantità prodotte e quindi di essere in linea con obiettivi rigidi come quelli suddetti fissati dalla Commissione Europea.

Da un altro lato, vi sono i più tradizionali sistemi basati sul prezzo, tuttora maggioritari nei paesi dell'Unione Europea (pur con sistemi di erogazione fortemente differenti), nei quali all'energia elettrica pro-

Fig. 3.11 Energia da fonti rinnovabili in tredici scenari di lungo periodo



dotta da fonti rinnovabili viene garantito un prezzo minimo che è spesso differenziato per tecnologia, caratteristica questa di notevole importanza per l'incentivazione di tecnologie che hanno raggiunto gradi diversi di maturità.

A proposito dei diversi meccanismi di incentivazione delle FER utilizzati negli Stati membri dell'Unione Europea, la direttiva del settembre 2001 ne raccomanda l'armonizzazione.

L'analisi delle prospettive delle fonti rinnovabili a livello europeo si deve dunque porre un duplice obiettivo. Da un lato, quello più immediato di valutare la compatibilità del trend in atto con le attese e gli auspici condivisi a livello comunitario. Dall'altro, quello di valutare l'efficacia dei diversi meccanismi di incentivazione. L'esame di due scenari energetici europei permetterà di valutare le tendenze in atto, ma fornirà solo indicazioni circa l'efficacia dei diversi sistemi di incentivazione.

Nella tabella 3.1 è riportato il contributo

delle diverse FER al bilancio energetico comunitario nel recente passato e nel medio e lungo termine secondo lo scenario tendenziale contenuto nel Word Energy Outlook della IEA e secondo l'Energy Outlook elaborato per la Commissione Europea nel 1999. Tali valori sono poi messi a confronto con gli obiettivi individuati dal Libro Bianco del 1997 e con il più generale obiettivo fissato dalla direttiva 2001/77.

Il risultato fondamentale che emerge dal confronto è che il raggiungimento degli obiettivi di sviluppo delle fonti rinnovabili nei paesi dell'Unione Europea sembra presentare notevoli difficoltà. Nonostante gli sforzi intrapresi, infatti, nel 2010 l'insieme delle FER contribuirà a poco più del 7 per cento del fabbisogno primario totale, a fronte dell'obiettivo del 12 per cento fissato dalla direttiva 2001/77. La produzione di energia da FER è comunque prevista in crescita. Tale crescita è piuttosto significativa in termini assoluti, continuando la tendenza recente.

Tabella 3.1
Ruolo delle FER nel sistema energetico europeo nel Libro Bianco, nella direttiva 2001/77/CE e in due scenari tendenziali

	Consumi energia primaria (Mtep)	Totale FER (Mtep)	Totale FER (%)	Idrica (Mtep)	Biomassa (Mtep)	Geo-termica (Mtep)	Eolica e solare (Mtep)
1990	1322	60	4,5	22	35	2	0
2000	1460	88	6,0	27	54	3	3
2010 - Libro Bianco	1583	182	11,5	31	135	5	11
2010 - Direttiva			12				
IEA WEO (2002)							
2010	1627	116	7,2	28	76	4	9
2020	1730	150	8,7	30	120		
2030	1811	188	10,4	31	157		
EU EO (1999)							
2010	1556	88	5,7	27	53	3	6
2020	1612	100	6,2	29	57	3	11

Fonti: European Commission, DG Energy (The Shared Analysis Project), European Union energy outlook to 2020, November 1999. Commissione Europea, Comunicazione della Commissione, Energia per il futuro: le fonti energetiche rinnovabili. Libro bianco per una strategia e un piano di azione della Comunità, 1997.

I recenti orientamenti dell'Unione Europea

Gli obiettivi dell'Unione Europea del gennaio 2008 (la relativa direttiva è in corso di esame ed approvazione da parte del Consiglio) in relazione ad un approccio integrato alla politica climatica ed energetica per trasformare l'Europa in un'economia con un'efficienza energetica elevata ed emissioni di gas ad effetto serra ridotte sono riassumibili in:

- impegno a realizzare una riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra di almeno il 20% entro il 2020 rispetto al 1990;
- obiettivo di risparmio dei consumi energetici dell'UE del 20% rispetto alle proiezioni per il 2020;
- obiettivo vincolante che prevede una quota del 20% di energie rinnovabili nel totale dei consumi energetici dell'UE entro il 2020 (oggi è solo dell'8,5%), con percentuali differenti per i vari paesi membri (secondo la proposta di direttiva all'Italia è assegnato l'obiettivo del 17% da rinnovabili; una quota minima del 10% per i biocarburanti nel totale dei consumi di benzina e gasolio per autotrazione dell'UE entro il 2020);
- obiettivo di sviluppare il quadro tecnico, economico e normativo necessario per portare nei mercati, se possibile entro il 2020, la cattura e lo stoccaggio ecosostenibili dell'anidride carbonica.

Dalle analisi della Commissione risulta che il raggiungimento del target complessivo per le rinnovabili consentirà di: evitare da 600 a 900 milioni di tonnellate di CO₂ all'anno; ridurre di 200-300 milioni di tonnellate l'utilizzo dei combustibili fossili all'anno. Tutto questo costerà dai 13 ai 18 miliardi di euro l'anno, ma condurrà ad un abbattimento dei costi delle tecnologie rinnovabili paragonabili a quanto si è verificato nel settore informatico.

Il ruolo delle FER in alcuni scenari di riferimento

La possibilità di uno sviluppo sostenibile (soprattutto riguardo alle emissioni di CO₂ e ai mutamenti climatici) include chiaramente come una delle opzioni strategiche l'uso massiccio e crescente di fonti rinnovabili.

L'immagine complessiva che emerge dall'insieme degli scenari di lungo periodo è in effetti quella di una crescita continua nel tempo, a differenza di quanto previsto per il breve periodo (fig. 3.11): nel 2050 la gran parte degli scenari prevedono un consumo almeno triplo rispetto all'anno base (il 1990, anno nel quale il consumo mondiale di energia da fonti rinnovabili era stimato intorno ai 1500 Mtep), e in nessuno degli scenari il consumo è meno che doppio. Negli scenari di riferimento, l'energia da fonti rinnovabili cresce in modo molto limitato almeno fino al 2030, cosicché la quota di FER sui consumi totali di energia primaria resta praticamente costante, dopodiché comincia a crescere in modo sostenuto sia in valore assoluto sia in termini relativi, arrivando a 5 Gtep nel 2050 (con una quota sui consumi totali di energia primaria superiore al 20%) e superando i 10 Gtep nel lunghissimo periodo, quando le FER arrivano a rappresentare circa 1/3 del consumo totale di energia.

[3.5]

Un obiettivo per il sistema energetico globale: la "stabilizzazione del clima"

La differenziazione degli scenari energetici tra scenari con stabilizzazione del clima e non, richiede in primo luogo la definizione del significato di "stabilizzazione del clima".

Secondo la Convenzione Quadro sui Cambiamenti Climatici, per stabilizzazio-



ne del clima si può intendere la stabilizzazione del livello di concentrazione di CO₂ in atmosfera su livelli che possano essere considerati “non dannosi”. Per tradurre poi tale obiettivo in termini quantitativi, in questa analisi si colloca il livello di concentrazione di CO₂ in atmosfera a 550 ppmv (parti per milione in volume).

Pertanto sono stati definiti “scenari con stabilizzazione” (fig. 3.11) gli scenari caratterizzati dalla stabilizzazione della concentrazione di CO₂ su livelli minori o uguali ai 550 ppmv (entro il 2100), e che non presentino emissioni annue illimitatamente crescenti (e dunque concentrazione illimitatamente crescente).

Affinché dagli scenari sia possibile ricavare delle indicazioni sul tema della stabilizzazione del clima è necessario chiarire alcune questioni fondamentali.

1. Riguardo al rapporto tra attività umana, concentrazione di CO₂ in atmosfera e cambiamenti climatici, una recente e autorevole ricerca, condotta dall'Accademia delle Scienze degli Stati Uniti, concorda in sostanza con le valutazioni dell'IPCC (Intergovernmental Panel On Climate Change), e conclude che:

- l'accumulazione dei gas serra nell'atmosfera terrestre deriva probabilmente in gran parte dall'attività

umana, sebbene vi sia anche una componente significativa di variabilità naturale;

- la temperatura terrestre sta effettivamente salendo, e gran parte del riscaldamento globale è dovuto all'aumento della concentrazione di CO₂;

l'Accademia rimanda poi all'IPCC per la misura del prevedibile aumento della temperatura nei prossimi cento anni, mentre lascia aperta la questione relativa al livello di concentrazione che può essere considerato “non dannoso” per il clima.

2. Riguardo al significato di “stabilizzazione del clima”, si può ricorrere all'art. 2 dell'UNFCCC:

Obiettivo ultimo della United Nations Framework Convention on Climate Change e di ogni strumento legislativo collegato che la Conferenza delle Parti possa adottare è quello di pervenire, in conformità con le previsioni della Convenzione, alla stabilizzazione della concentrazione in atmosfera dei gas ad effetto serra ad un livello tale da prevenire pericolose interferenze con il sistema climatico. Questo livello dovrebbe essere raggiunto in un arco di tempo tale da permettere agli ecosistemi di adattarsi naturalmente al cambiamento climatico, per assicurare che non sia minacciata la produzione di cibo e per consentire che lo sviluppo economico proceda in modo sostenibile.

- mentre nella comunità scientifica non c'è ancora convergenza su cosa si intenda per “livello tale da prevenire pericolose interferenze con il sistema climatico”, è invece consolidata l'opinione che la variabile più importante per determinare il livello cui si stabilizzerà la concentrazione di carbonio in atmosfera è la quantità di emissioni cumulate nel tempo, più significativa delle emissioni annue. Data infatti la lunga permanenza in

atmosfera dei principali gas ad effetto serra (compresa per la CO₂ tra i 50 e i 200 anni), la concentrazione degli stessi in atmosfera risponde solo molto lentamente a variazioni delle emissioni annue;

- per quello che riguarda il rapporto che esiste tra le emissioni cumulate nel corso del ventunesimo secolo e la concentrazione di carbonio in atmosfera, il Second Assessment Report dell'IPCC identifica tre livelli di concentrazione, cui corrispondono, approssimativamente, tre livelli di emissioni cumulate al 2100: 650 miliardi di tonnellate (Gt) C => 450 ppmv CO₂; 1000 Gt C => 550 ppmv CO₂; 1200 Gt C => 650 ppmv CO₂;
- la relazione esistente tra concentrazione di carbonio e temperatura (climate sensitivity) è misurata in genere dalla risposta della temperatura di equilibrio al raddoppio della concentrazione di anidride carbonica in atmosfera. Considerando il campo di variazione comunemente accettato, un raddoppio della concentrazione produce un incremento della temperatura media compreso tra 1,5 °C e 4,5 °C;
- riguardo infine al massimo livello di concentrazione che può essere considerato "ammissibile", non esiste una misura univoca del livello di concentrazione superato il quale diventano molto probabili le "pericolose interferenze con il sistema climatico" citate nell'art. 2. Se però si considerano le indicazioni che provengono dalla letteratura più recente, secondo cui anche una concentrazione di 450 ppmv può avere conseguenze significative sul clima, sembra che un livello di 550 ppmv sia già un livello limite, perché:
 - il raggiungimento della nuova temperatura di equilibrio, dopo l'aumento in atto, potrebbe richiedere molti secoli, ed è compreso, per la stabilizzazione a 450 ppmv, tra 1,5 °C e 3,9 °C sopra il livello del 1990;
 - il campo di variazione previsto per l'innalzamento del livello del mare dovuto all'espansione termica è compreso, in condizioni di equilibrio, tra 0,5 e 2 metri per un raddoppio della concentrazione di CO₂ (dal livello pre-industriale di 280 ppmv a 560 ppmv), mentre l'innalzamento riscontrato nel corso del XX secolo è compreso tra 0,1 e 0,2 metri;
 - sono stati proposti anche altri obiettivi di "sostenibilità ambientale", come un incremento della temperatura globale di 2 °C rispetto al livello pre-industriale, oppure di 0,1 °C per decennio, e entrambi portano a fissare un obiettivo di concentrazione compreso tra i 450 e 500 ppmv;
 - infine, dato "l'ampio margine di incertezza circa l'ammontare del riscaldamento che può derivare da ciascun livello di stabilizzazione della concentrazione dei gas ad effetto serra, e l'inerzia e l'incertezza dei sistemi climatici, ecologici e socio-economici", devono essere considerati dei margini di sicurezza quando si fissano strategie, obiettivi e tempi di attuazione volti ad evitare pericolose interferenze con il sistema climatico".

Dall'analisi dell'andamento delle fonti rinnovabili nei vari scenari di lungo periodo emergono due importanti considerazioni. Per le fonti rinnovabili questi scenari proiettano una crescita più o meno continua e significativa, ma ciò non implica in nes-

sun modo che il sistema tenda ad uno sviluppo sostenibile. Inoltre, l'evoluzione del sistema è molto diversa a seconda che esso tenda a stabilizzare la concentrazione a 450 ppmv oppure a 550 ppmv:

- perché si arrivi alla stabilizzazione della concentrazione, l'aumento del consumo di energia da fonti rinnovabili è una condizione necessaria, ma non sufficiente, perché è ancora più importante che le fonti rinnovabili divengano per il sistema la fonte primaria principale; il peso relativo delle fonti rinnovabili per il sistema energetico è dunque una delle caratteristiche fondamentali che distingue gli scenari con stabilizzazione dagli altri scenari;
- negli scenari con stabilizzazione a 450 ppmv, nonostante un aumento del consumo di gas naturale nel medio periodo, nel lungo periodo si ha un progressivo superamento di tutte le fonti fossili; negli scenari con stabilizzazione a 550 ppmv, invece, anche nel lungo periodo le fonti fossili restano importanti (anche se meno delle rinnovabili), grazie allo spostamento verso fonti fossili a minor contenuto di carbonio; il superamento o meno delle fonti fossili è dunque una delle caratteristiche fondamentali che distinguono gli scenari con stabilizzazione a 450 ppmv da quelli con stabilizzazione a 550 ppmv.

[3.6]

Efficacia delle forme di incentivazione e ostacoli allo sviluppo delle FER

Per valutare l'efficacia della normativa di incentivazione adottata dagli Stati membri è utile esaminare la tendenza in atto. In linea generale, gli incentivi sembrano contribuire ad un significativo incremento della generazione da fonti rinnovabili.

Quest'ultima è infatti aumentata di circa il 50% negli ultimi dieci anni, e sembra in accelerazione negli anni più recenti, in particolar modo in alcuni paesi e per alcune fonti.

Escludendo l'energia idroelettrica, che costituisce oltre l'80% della generazione rinnovabile dell'Unione Europea ed è già ampiamente sfruttata, la fonte rinnovabile in maggior crescita è quella eolica, la più vicina alla competitività, tanto che la capacità installata ha superato i 20.000 MW alla fine del 2002 (secondo la European Wind Energy Association), la gran parte dei quali in Danimarca, Germania e Spagna. Sebbene questi successi nello sviluppo dell'energia eolica stiano inducendo i diversi paesi a ridurre la dimensione degli incentivi e/o a passare al modello dei certificati verdi, il tratto comune di questi significativi risultati sta nell'utilizzo di sistemi di incentivazione basati sul prezzo, mentre lo sviluppo delle FER è risultato molto minore nei paesi che hanno seguito la strada dell'incentivazione basata sulle quantità, come Gran Bretagna e Francia, dove i meccanismi di asta competitiva hanno prodotto aumenti molto modesti della capacità installata. Un primo aspetto critico per lo sviluppo delle nuove tecnologie rinnovabili è costituito dal fatto che comportano investimenti non compresi tra le attività caratteristiche degli operatori tradizionali del settore energetico, con taglie di impianti piccole, con impianti distribuiti sul territorio e fortemente integrati nel tessuto socio-economico locale.

Per essere remunerativi questi impianti richiedono competenze assolutamente diverse da quelle che sono state sviluppate dalle imprese energetiche in passato. La ricerca e lo sviluppo su talune tecnologie innovative sono, inoltre, ostacolate da un mercato ormai consolidato su bassi

costi dell'energia elettrica nei paesi industrializzati e un potere di acquisto troppo basso nei paesi in via di sviluppo.

Le imprese che producono energia elettrica, infatti, traggono maggior beneficio dalle fonti rinnovabili in termini di immagine. È il caso di Electricité de France che, grazie al parco idroelettrico sviluppato ormai oltre mezzo secolo fa, tiene a farsi conoscere come il più grande produttore di energia rinnovabile del mondo.

Un secondo fattore che ostacola la crescita delle fonti rinnovabili è la difficoltà di valutare correttamente le esternalità (cui è dedicato il capitolo 6) connesse con la produzione di energia, che fanno apparire costose queste opzioni tecnologiche quando ci si limiti ad una prospettiva di costi privati e non si considerino come tali i costi sociali. Una corretta valutazione dei costi ambientali, infatti, ridimensiona decisamente il divario di costo con le fonti fossili, fino ad annullarlo in molti casi, soprattutto con gli attuali costi dei combustibili.

Un terzo aspetto critico è legato agli alti costi di investimento richiesti, che comportano buone redditività solo quando si accettino tempi di ritorno del capitale investito piuttosto lunghi (in generale al di sopra dei 15 anni), difficilmente compatibili con il mercato liberalizzato di oggi. A fatica il mercato riesce a valutare correttamente le tecnologie a più alto costo di investimento (le fonti rinnovabili, come anche il nucleare!), preferendo concentrare gli investimenti su soluzioni tecnologiche con minori costi di investimento, e quindi minor rischio sul capitale investito, anche se queste rivelano un costo complessivo superiore.

Inoltre la maggior parte delle fonti rinnovabili è utilizzabile con tecnologie relativamente nuove, con tutti i problemi che comporta la diffusione su larga scala di tecnologie giovani (dall'integrazione su larga scala della generazione distribuita, all'utilizzo del solare termico nell'edilizia, alla scelta dei materiali per il fotovoltaico, solo per fare alcuni esempi).

Si comprende, quindi, come sia auspicabile l'intervento pubblico per indirizzare le politiche energetiche su scala locale, nazionale e internazionale verso le scelte di ottimizzazione della produzione di energia sul piano sociale, al fine di rendere concrete nuove opportunità, prima ancora che fare i conti con la necessità di dare una prospettiva sostenibile al sistema energetico. Questo intervento ha certamente un costo, sicuramente non proibitivo.

Un incremento dell'uso delle fonti rinnovabili non può non rientrare in una politica intelligente di diversificazione delle fonti, insieme a molte altre azioni sul lato dell'offerta e della domanda, che sono necessarie su scala internazionale e in Italia per affrontare coerentemente l'incerto mercato dell'energia dei prossimi decenni.

È bene non nascondere che l'attuale trend di crescita della produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili non consentirà di raggiungere gli obiettivi che molti Paesi hanno preso in sede internazionale per il 2010. Probabilmente non sarà possibile neppure raggiungere il 22% della domanda elettrica richiesto dalla direttiva 2001/77/CE, ma una politica mirata può ancora portare a risultati significativi, quali quelli raggiunti in Paesi come la Germania o la Spagna.

Capitolo **Quattro**



Evoluzione delle politiche energetiche per lo sviluppo sostenibile

[4.1] La conferenza di Rio 1992

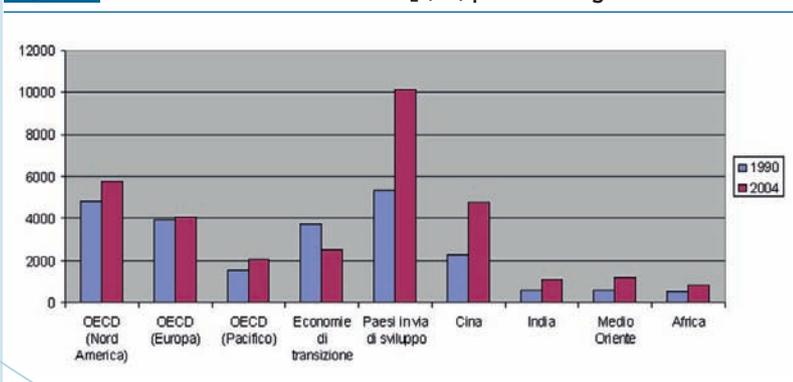
La presa di coscienza, da parte delle popolazioni e dei Governi, dell'emergenza ambientale causata dalla sempre più consistente interferenza delle attività umane con i naturali cicli ecologici del pianeta, ha portato alla Conferenza delle Nazioni Unite sull'Ambiente e lo Sviluppo che si è svolta a Rio de Janeiro nel Giugno 1992. La Conferenza, che invita i governi ad adottare politiche nazionali di sviluppo sostenibile che integrino gli aspetti economici, sociali, ambientali, ha sancito i seguenti principi fondamentali:

- il diritto allo sviluppo deve essere realizzato in modo da soddisfare anche le esigenze delle generazioni future;

- la tutela dell'ambiente deve costituire parte integrante delle politiche economiche: i costi ambientali dovranno essere "internalizzati" tra i costi di gestione di impresa, con l'applicazione del principio del "chi inquina paga";
- gli Stati dovranno favorire le pratiche a minor impatto ambientale attraverso strumenti economici adeguati (incentivi);
- le responsabilità riguardanti il degrado ambientale del pianeta sono ascrivibili in maggior misura ai paesi del Nord sviluppato, che dovrà maggiormente impegnarsi nel processo di risanamento;
- per affrontare efficacemente i problemi ambientali è necessario assicurare la partecipazione dei cittadini ai diversi livelli;
- in caso di rischio grave o irreversibile, l'assenza di certezza scientifica assoluta non deve essere il pretesto per rinviare l'adozione di misure adeguate dirette a prevenire il degrado ambientale (principio precauzionale).

Oltre a sancire questi principi fondamentali la Conferenza di Rio ha anche approvato due importanti Convenzioni internazionali, una sui cambiamenti climatici, l'altra sulla conservazione della biodiversità. È stata anche adottata l'Agenda per il XXI secolo (Agenda 21), che definisce le azio-

Fig. 4.1 Emissioni di CO₂ (Mt) per macroregioni



ni da intraprendere per riconvertire lo sviluppo ai principi della sostenibilità ambientale.

Il suo obiettivo è quello di supportare un Paese nella realizzazione delle proprie politiche di sviluppo sostenibile.

Dopo la conferenza di Rio, l'ONU ha costituito una Commissione per lo Sviluppo sostenibile che ha il compito di monitorare e promuovere l'attuazione dell'Agenda 21 in tutti i paesi. Il passo successivo è rappresentato dalla Prima Convenzione Quadro sui cambiamenti climatici, sottoscritta da 166 paesi e entrata in vigore come atto di diritto internazionale il 21 Marzo 1994. Essa obbligava i paesi industrializzati a riportare nel 2000 le emissioni climalteranti al livello del 1990.

Nel 1997 venne tenuta una sessione speciale dell'Assemblea delle Nazioni Unite per valutare i progressi dei primi cinque anni dall'approvazione dell'Agenda 21 (Rio+5), dove venne riaffermata l'esigenza di integrazione delle politiche di sviluppo sostenibile con le politiche sociali, economiche e ambientali, e vennero invitati i membri a completare entro il 2002 strategie di sviluppo sostenibile che riflettesse i contributi e gli interessi delle parti.

[4.2]

La conferenza di Kyoto 1997

La Conferenza delle Parti di Kyoto del 10 Dicembre 1997 ha portato alla Seconda Convenzione Quadro sui Cambiamenti Climatici, che contiene l'accordo dei paesi partecipanti a ridurre, in maniera differenziata, le emissioni complessive di gas serra del 5,2% rispetto ai livelli del 1990 entro il 2012.

Sulla base degli accordi il Protocollo

sarebbe entrato in vigore il 90° giorno dopo la ratifica del 55° paese tra i 166 sottoscrittori originari se questi, complessivamente, avessero coperto almeno il 55% delle emissioni globali di gas serra.

Il Protocollo di Kyoto individua le prime misure per l'attuazione della Convenzione Quadro, ratificata dall'Italia nel 1994, e stabilisce la riduzione delle emissioni di sei gas ad effetto serra: il biossido di carbonio (CO₂), prodotto dall'impiego dei combustibili fossili, il metano (CH₄), emesso dalle discariche e dalla zootecnia, l'ossido di azoto (N₂O) derivante dalle attività agricole e dalle produzioni chimiche, gli idrocarburi fluorati HFC, gli idrocarburi perfluorati PFC e l'esfluoruro di zolfo SF₆, questi ultimi impiegati nell'industria.

Dopo il rifiuto di ratificare il protocollo da parte del cosiddetto "Umbrella Group" – formato da: USA, Canada, Giappone, Australia e Nuova Zelanda – nel marzo 2001, per evitare il fallimento completo delle trattative, nella sessione negoziale di Bonn del luglio 2001, sono stati introdotti dei meccanismi flessibili per l'applicazione delle misure previste.

Già prima del luglio 2001 le regole e le procedure dei meccanismi flessibili erano state oggetto di diverse discussioni, relative alla:

- "supplementarietà", cioè quanti e quali impegni attuare in ambito nazionale e nell'ambito internazionale (la UE aveva posto come vincolo il 50% in termini di azioni domestiche da attuare in ambito nazionale),
- regolamentazione e definizione della tipologia di progetti da realizzare attraverso il clean development mechanism: l'Unione Europea chiedeva che fosse data priorità a progetti riguardanti le



energie rinnovabili e l'uso efficiente dell'energia, e che fossero invece esclusi progetti riguardanti il nucleare e l'idroelettrico, oltre naturalmente ad escludere dai conti i carbon sinks, o pozzi di assorbimento di anidride carbonica, e quindi i progetti di forestazione/riforestazione per assorbire il biossido di carbonio dell'atmosfera,

- regolamentazione dell'emission trading (commercio delle emissioni fra paesi sviluppati): l'Unione Europea chiedeva che venissero esclusi dal commercio delle emissioni le quote di *hot air*, cioè le quote di riduzione non riferibili ad azione concrete di riduzione delle emissioni, ma determinate da altri fattori come per esempio la recessione economica che attualmente colpisce i paesi dell'Est europeo.

Su questi punti, invece, i paesi dell'*umbrella group* chiedevano solo indicazioni generali e comunque regole semplici per non compromettere l'uso complessivo di questi meccanismi (senza vincoli di supplementarietà, di *hot air*, e estesi in ogni caso anche al nucleare e ai *sink*).

Dopo la riunione di Bonn, del Luglio 2001 sono caduti i vincoli precedenti richiesti dalla UE che sono stati sostituiti da raccomandazioni o esortazioni, di cui le principali sono:

- i meccanismi flessibili devono essere supplementari alle azioni domestiche le quali devono costituire un "significativo" contributo per ridurre le emissioni;
- l'energia nucleare viene esclusa come possibilità di generare crediti per la riduzione delle emissioni nella attuazione dei meccanismi flessibili, ma può essere utilizzata come azione domestica;

- il 2% dei crediti derivanti dai progetti attuati attraverso il clean development mechanism viene destinato ad alimentare uno speciale fondo, il Kyoto Adaptation Fund, per aiutare i paesi poveri più vulnerabili ai cambiamenti climatici.

L'accordo è entrato in vigore il 16 febbraio 2005, con l'adesione della Russia; dopo che avevano già aderito al protocollo 125 paesi che rappresentavano il 44,2% delle emissioni climalteranti. Risultavano quindi decisive l'adesione della Russia, responsabile del 17,4% delle emissioni, o degli Stati Uniti, la cui quota era del 36,1%.

I Meccanismi del Protocollo di Kyoto

La riduzione delle emissioni prevista dal Protocollo di Kyoto potrà avvenire attraverso azioni domestiche, accordi internazionali o meccanismi flessibili.

Con le prime si intendono politiche nazionali che promuovano: l'aumento dell'efficienza energetica, forme sostenibili di agricoltura, la ricerca e promozione dell'uso di nuove, e rinnovabili, forme di energia e di tecnologie per la cattura del biossido di carbonio.

Gli accordi internazionali sono invece forme di cooperazione internazionale volta a migliorare l'efficacia delle politiche e delle misure adottate, da realizzare attraverso la condivisione delle rispettive esperienze, lo scambio di informazioni relative alle misure implementate, o, infine attraverso l'utilizzo dei tre meccanismi flessibili contemplati dal protocollo:

- Joint Implementation (JI), ovvero la "realizzazione congiunta", con la quale i paesi industrializzati, ovvero quelli compresi nell'Annesso I del Protocollo, possono realizzare in maniera congiun-

ta progetti di riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra. Attraverso la realizzazione di tali progetti, il Paese investitore otterrà un trasferimento, da parte del Paese ospitante, di crediti di emissione (Emission Reduction Units - ERU) aggiuntivi rispetto alle quote di emissione possedute e equivalenti alla differenza fra la stima delle emissioni prodotte in assenza del progetto e quelle effettivamente ottenute attraverso l'implementazione del progetto stesso. I crediti di emissione acquisiti possono essere accumulati o possono essere venduti sul mercato delle emissioni.

- **Clean Development Mechanism (CDM)**, il “meccanismo per lo sviluppo pulito” con il quale i paesi industrializzati possono acquisire crediti di emissione mediante la realizzazione, nei paesi in via di sviluppo, di progetti per la riduzione delle emissioni di gas serra. Con la realizzazione di tali progetti il Paese investitore otterrà dei crediti di emissione (Certified Emission Reductions - CER) equivalenti alla differenza tra le emissioni che si stima sarebbero state prodotte senza l'implementazione del progetto e quelle effettivamente ottenute attraverso la realizzazione del progetto stesso. I CER così ottenuti possono essere rivenduti sul mercato delle emissioni o possono essere accumulati per assolvere all'obbligo nazionale di riduzione assegnato.
- **Emission Trading (ET)** o “mercato delle quote di emissione”, vale a dire un meccanismo, già avviato dall'Unione Europea, finalizzato allo scambio dei crediti al fine di contenere i costi di riduzione delle emissioni. Con questo mec-

canismo ciascun Paese dell'Annesso I ha la possibilità di comprare quote o permessi di emissione messi in vendita da un altro Paese dell'Annesso I che è riuscito a ridurre le emissioni in misura maggiore rispetto al proprio obiettivo di abbattimento. Possono essere comprati e venduti a prezzo di mercato non solo le quote di emissione disponibili a livello nazionale (Assigned Amount Units - AAU), ma anche i crediti di emissioni (ERU e CER) ottenuti rispettivamente attraverso l'implementazione di progetti JI e CDM.

Il Mercato Europeo delle Emissioni

L'Europa ha adottato il Protocollo di Kyoto con la decisione 2002/358/CE. L'impegno assunto dai 15 Paesi che allora costituivano l'Unione Europea consisteva in una riduzione delle emissioni di gas serra di almeno l'8% (il 6,5% per l'Italia) rispetto ai livelli del 1990 entro il periodo 2008-2012. Per 10 dei 12 Stati che hanno aderito, dal 1° maggio 2004 e dal 1° gennaio 2007, all'Unione Europea, sono stati fissati obiettivi individuali di riduzione (6% o 8%), mentre per Cipro e Malta, che non rientrano fra le parti dell'Annesso I, non esiste nessun obiettivo da raggiungere. Per adempiere a tali impegni, l'Unione Europea ha istituito, con la Direttiva 2003/87/CE, un sistema per lo scambio di quote di emissioni di gas serra all'interno del suo territorio: si tratta di un precursore del sistema analogo, a livello internazionale, previsto dal Protocollo.

Lo “*European Emission Trading Scheme*” (EU ETS), ha come obiettivo il miglioramento dell'efficienza energetica, la riduzione delle emissioni secondo criteri di



efficienza economica e la promozione di tecnologie compatibili con l'ambiente.

Questa "Borsa della CO₂" ha iniziato ufficialmente a funzionare dal 1° gennaio 2005; per parteciparvi gli Stati Membri devono presentare il proprio Piano Nazionale di assegnazione delle quote (la quota consiste nel diritto ad emettere una tonnellata di biossido di carbonio equivalente per un periodo determinato), in cui sono fissate le quote da assegnare a ciascun settore e a ciascuna impresa.

Nel maggio 2007 la Commissione Europea ha accolto il Piano Nazionale dell'Italia per l'assegnazione delle quote relative al periodo 2008-2012.

Il funzionamento prevede che gli Stati Membri fissino limiti sulle emissioni di CO₂ prodotte da imprese ad alto consumo energetico – circa 12.000 fra stabilimenti siderurgici, centrali elettriche, raffinerie di petrolio, cartiere, vetrerie e cementifici – e stabiliscano la quantità di biossido di carbonio che queste possono generare.

Gli impianti hanno due tipi di obblighi:

- per operare devono possedere un permesso di emissione di gas in atmosfera (in Italia rilasciate con Decreti congiunti del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Ministero delle Attività Produttive),
- alla fine dell'anno devono rendere un numero di quote di emissione pari alle emissioni rilasciate durante l'anno.

Se un'azienda produce una quantità minore di anidride carbonica rispetto quella assegnata, ad esempio utilizzando una tecnologia più "pulita", potrà rivenderla sul mercato ad un'impresa che non riesce a rispettare i limiti imposti, o per la quale è meno costoso acquistare quote altrui che cambiare i propri impianti pro-

duuttivi; viceversa, un'impresa meno "virtuosa" è obbligata ad aumentare il tetto delle emissioni a lei assegnato acquistando ulteriori quote.

A dar credibilità al sistema concorre il profilo sanzionatorio: è prevista infatti una sanzione pecuniaria pari a 40 € nel periodo 2005-2007, e a 100 € per i periodi successivi, per ogni tonnellata di biossido di carbonio equivalente in eccesso. Il pagamento dell'ammenda non esonera in ogni caso il gestore dell'impianto dalla restituzione delle quote corrispondenti alle emissioni in eccesso.

Questo sistema induce le imprese ad abbattere le emissioni dove la riduzione risulta più economica, e garantisce in tal modo il contenimento dei costi, oltre che incentivare l'innovazione.

Da notare che l'UE si è resa disponibile a collegare il sistema comunitario ai sistemi di scambio di altri paesi che hanno ratificato il protocollo di Kyoto.

La direttiva 2004/101/CE (Direttiva "Linking") approfondisce il collegamento fra il sistema di scambio di quote di emissioni dell'Unione e del Protocollo di Kyoto, in quanto riconosce la validità dei crediti derivanti dai progetti di attuazione congiunta (JI) e di meccanismo per uno sviluppo pulito (CDM) allo stesso titolo delle quote di emissione, ad eccezione di quelli derivanti dall'utilizzo del territorio, dalla variazione della destinazione d'uso del territorio e dalla silvicoltura.

Anche nel mercato europeo i crediti derivanti da progetti di attuazione congiunta sono denominati "unità di riduzione delle emissioni" (ERU), mentre i crediti derivanti da progetti nell'ambito del meccanismo per uno sviluppo pulito sono denominati "riduzioni certificate delle emissioni" (CER).

[4.3] La cooperazione della UE con i paesi in via di sviluppo



L'UE e i paesi in via di sviluppo hanno un crescente e comune interesse alla stabilità del mercato di petrolio e gas e i paesi in via di sviluppo avranno sempre più un interesse diretto alle politiche a favore dell'efficienza energetica e delle fonti energetiche alternative.

L'attuale dialogo tra produttore e consumatore vedrà gradualmente i paesi in via di sviluppo nella veste di importanti consumatori.

L'insicurezza dell'approvvigionamento energetico, espressa ad esempio da forniture di elettricità inaffidabili, è di ordinaria amministrazione nei paesi in via di sviluppo ed è socialmente e economicamente nociva in quanto scoraggia l'investimento minacciando la produzione e aumentando i costi per la capacità di riserva necessaria. Il costo di produzione di elettricità stand-by per i piccoli investitori è particolarmente alto.

Le necessità di investimento nel settore dell'energia nei paesi in via di sviluppo sono ingenti. Secondo diversi scenari, il fabbisogno di capitale del settore dell'energia nei paesi in via di sviluppo nei futuri vent'anni, si situa a 150-200 miliardi di USD all'anno.

Gli investimenti annuali nel settore della produzione di elettricità sono stimati soltanto a 70-85 miliardi di USD all'anno.

Un finanziamento di questa entità non può essere fornito principalmente dall'aiuto allo sviluppo o dai bilanci pubblici. Nei paesi in via di sviluppo gli investimenti energetici stanno orientandosi verso finanziamenti privati, tuttavia scarsi, particolarmente quelli diretti ai paesi

più poveri come quelli nell'Africa subsahariana, per varie ragioni, soprattutto a causa del rischio per gli investitori. Pochissimi investimenti diretti esteri raggiungono i paesi meno sviluppati e l'aiuto ufficiale allo sviluppo rimane limitato. La maggior parte dei paesi emergenti deve finanziare il proprio sviluppo energetico essenzialmente con i risparmi nazionali e l'aiuto allo sviluppo.

Investimenti Diretti Esteri

Per attirare Investimenti Diretti Esteri (IDE) nel settore dell'energia, in particolare nei settori dell'efficienza energetica e delle fonti energetiche rinnovabili, occorre uno sforzo concordato e di grande portata. Si devono assumere opportuni impegni a livello, a seconda dei casi, multilaterale o bilaterale, onde garantire la certezza del diritto necessaria per gli operatori esteri che investono e operano in un paese.

L'esistenza di un quadro legislativo, regolamentare e finanziario adeguato è una condizione necessaria per attirare i flussi di investimento privato che sviluppino le infrastrutture e i servizi energetici di base. Tale quadro è di solito assente nei paesi in via di sviluppo.

È opportuno, inoltre, tendere al rafforzamento degli intermediari finanziari, e allo sviluppo di partnership tra settore pubblico e privato (PPP), fondamentali per mobilitare il capitale interno e straniero nel quadro di assunzioni di partecipazione. Si deve inoltre garantire la gestione trasparente e equa delle entrate derivanti dalle partnership pubblico-privato.

La distorsione tariffaria

Nella maggioranza dei paesi in via di sviluppo, il prezzo delle fonti energetiche

convenzionali è artificialmente ridotto da sovvenzioni pubbliche. Questa politica di distorsione tariffaria costituisce un ostacolo agli investimenti di efficienza energetica. Il ricorso alle sovvenzioni dovrebbe essere trasparente, limitato nel tempo e con finalità sociali specifiche, come il regime di sovvenzioni incrociate tra le zone urbane ricche e le zone rurali svantaggiate.

L'inadeguata tassazione delle apparecchiature energetiche importate costituisce, inoltre, un messaggio negativo per il mercato.

Un quadro di riferimento per la cooperazione energetica

La cooperazione energetica dell'Unione Europea con i paesi in via di sviluppo non ha finora seguito un approccio sistematico e anche il volume degli aiuti è rimasto molto limitato; affinché si estendano le cooperazioni tra UE, investitori privati, Paesi euro e emergenti, gli accordi richiesti vertono:

- sulla realizzazione dell'*ownership*,
- sulla qualità del dialogo con i paesi partner che deve garantire la coerenza tra le politiche adottate dal paese e gli interventi del sostegno comunitario.

Alcuni aspetti, di seguito elencati, sono ritenuti prioritari.

A. Aspetti orizzontali

- la riforma del settore energetico e il trasferimento di tecnologie sono due aspetti fondamentali della cooperazione, che riguardano sia la domanda che l'offerta energetica,
- l'apertura al settore privato nei settori della produzione e distribuzione,
- la tariffazione,
- il trasferimento di tecnologie avanzate.

B. Cooperazione a livello della domanda

La penetrazione della tecnologia energetica efficiente nei paesi in via di sviluppo presuppone fondamentalmente tre elementi:

- l'accesso alla tecnologia per l'uso nell'industria produttiva dei paesi in via di sviluppo,
- l'accesso al capitale per il necessario (spesso elevato) investimento nell'efficienza energetica,
- la creazione di una struttura legale e finanziaria, di strumenti e/o incentivi economici per garantire l'applicazione della tecnologia.

C. Cooperazione a livello dell'offerta – Promozione della diversificazione energetica

L'obiettivo di diversificazione energetica, che vale tanto per i paesi consumatori che per i paesi produttori, spesso monoexportatori e quindi vulnerabili a volatilità dei prezzi o a riserve limitate, è relativo a:

■ Carbone

Vanno introdotte su vasta scala le tecnologie pulite del carbone, con un'attenzione specifica alla cooperazione per accelerare la penetrazione su vasta scala di queste tecnologie, sviluppate nell'UE negli ultimi venti anni. Con gli elevati valori di efficienza di impianto dei cicli energetici recentemente messi a punto si possono ridurre significativamente le emissioni di CO₂ della maggior parte degli impianti esistenti. L'uso del calore di scarto per il riscaldamento domestico, il raffreddamento o altre applicazioni a bassa temperatura permette rendimenti globalmente più elevati.

■ Petrolio e gas

Entrambi dovrebbero aumentare

notevolmente nel mix energetico nei paesi in via di sviluppo, il petrolio per un maggiore uso nel settore dei trasporti, dove attualmente le alternative sono limitate, il gas naturale perché il suo maggiore uso può migliorare le condizioni urbane, in particolare l'inquinamento urbano. Il gas naturale è un combustibile interessante sotto il profilo del cambiamento climatico poiché può essere usato con rendimenti elevati ed ha un tenore di carbonio minore di altri combustibili fossili.

A medio termine si prevede che le forniture sia di petrolio che di gas siano limitate: il loro uso deve essere pertanto il più razionale possibile.

■ *Energia rinnovabile*

La domanda dell'energia totale nei paesi in via di sviluppo aumenterà e l'uso di legna da ardere dovrebbe essere sostituito con più fonti di energia sostenibili; la quota della biomassa tradizionale in questi paesi (e a livello mondiale) dovrebbe registrare una diminuzione sul medio-lungo termine, a favore di fonti energetiche rinnovabili moderne, ma occorrerà uno sforzo significativo per introdurre tali fonti.

■ *Opzione nucleare*

Vari paesi in via di sviluppo (p. es. Cina, India, Corea del Sud, Taiwan, Sudafrica) perseguono l'energia nucleare come parte del loro mix globale dell'energia. Il dibattito europeo sull'energia nucleare ha chiaramente dimostrato la necessità di elevate norme di sicurezza e di trattamento e deposito ecologicamente sicuro delle scorie nucleari. L'UE può: fornire assistenza tecnica per istituire e

attuare il necessario quadro di regolamentazione e la capacità istituzionale di gestire in modo sicuro l'energia nucleare, compresi il controllo delle materie nucleari (controlli di sicurezza), la gestione dei residui e le tecnologie più sicure.

D. Cooperazione a livello di sostegno

La fase di realizzazione della cooperazione non può prescindere dal sostenere i paesi in via di sviluppo mediante:

- assistenza per promuovere la necessaria capacità tecnica,
- sostegno alla creazione del necessario quadro di regolamentazione e della capacità istituzionale per promuovere l'uso delle fonti energetiche rinnovabili disponibili in loco,
- un accesso migliorato alle tecnologie di energia rinnovabile e di efficienza energetica sviluppate dall'industria UE,
- opportuni meccanismi finanziari per promuovere le fonti rinnovabili,
- facilitare lo sviluppo delle reti, in particolare le interconnessioni.

Lo sviluppo di una infrastruttura regionale dell'energia può offrire i vantaggi di economie di scala, particolarmente nel caso dei piccoli paesi, dove è possibile ridurre i costi di transazione e aumentare la competitività attraverso la condivisione dello sviluppo, della gestione e del funzionamento di impianti dell'infrastruttura dell'energia.

[4.4]

Sostegno e incentivazione delle rinnovabili in Italia

Gli aspetti più salienti delle politiche e strategie nazionali in materia di fonti rin-

novabili sono richiamate qui di seguito. Il Decreto Legislativo del 29 dicembre 2003 n. 387, recepisce la Direttiva 2001/77/CE ed introduce una serie di misure volte a superare i problemi connessi allo sviluppo del mercato delle fonti di Energia Rinnovabile. Con l'espressione fonti di energia rinnovabili si intendono, ai sensi dell'articolo 2, comma 1 del Decreto legislativo n. 387 del 29 dicembre 2003:

«... le fonti energetiche rinnovabili non fossili (eolica, solare, geotermica, del moto ondoso, maremotrice, idraulica, biomasse, gas di discarica, gas residuati dai processi di depurazione e biogas). In particolare, per biomasse si intende la parte biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali) e dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani»

Nell'ambito della Direttiva Europea 2001/77/CE sulla promozione delle fonti rinnovabili, l'Italia ha indicato, quale obiet-

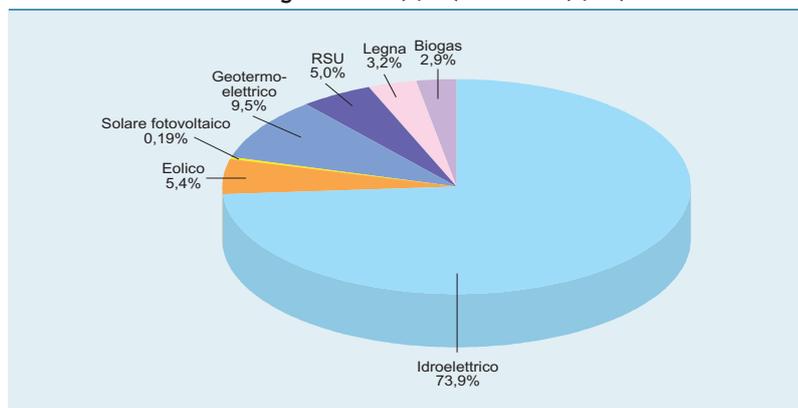
tivo realistico al 2010, una produzione interna lorda di elettricità da fonti rinnovabili pari a 76.000 GWh ed una percentuale di produzione da fonti rinnovabili del 22% (rapporto della produzione rinnovabile nazionale, sommata alle importazioni di energia rinnovabile con certificazione riconosciuta, sul consumo interno lordo di elettricità), a fronte di una percentuale attuale che supera di poco il 16%.

Lo sviluppo dell'energia rinnovabile in Italia, inizialmente incentivato con il provvedimento noto come CIP6, è stato profondamente riformato con il decreto legislativo 79/99, che ha introdotto l'obbligo per le imprese che producono o importano elettricità da fonti fossili a immettere in rete una quota prodotta da impianti nuovi o ripotenziati alimentati da fonti di energia rinnovabili. Tale quota era stata fissata inizialmente al 2% dell'energia eccedente i 100 GWh. Successivamente, con il decreto n. 387 si è stabilito di incrementarla annualmente dello 0,35%.

Tutti gli operatori soggetti all'obbligo possono provvedere autonomamente alla produzione della quota di energia rinnovabile che devono immettere in rete, o comperare tale quota da terzi attraverso un meccanismo di mercato che prevede la cessione dei cosiddetti "Certificati Verdi" (CV). Si tratta di titoli attribuibili annualmente dal GRTN (Gestore Rete Trasmissione Nazionale) all'energia prodotta da fonti rinnovabili. Tali titoli hanno una taglia di 100 MWh e possono essere vantaggiosamente negoziati, tramite contratti bilaterali tra detentori di CV e gli operatori soggetti all'obbligo o nella piattaforma di negoziazione nel GME (Gestore Mercato Elettrico).

Il GSE gestisce in Italia il sistema di promozione dell'energia rinnovabile basato

Fig. 4.2 Nel 2007, in Italia, il settore idroelettrico è quello che ha contribuito maggiormente alla produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili (73,9%), seguito da biomasse e rifiuti (11,1%), geotermico (9,5%) ed eolico (5,4%)



Un caso significativo: l'incentivazione del fotovoltaico con il "Conto Energia"

Nell'agosto 2005 è stato emanato il decreto interministeriale (Ministero Attività Produttive e Ministero Ambiente e Tutela del Territorio) 28 luglio 2005, in attuazione del D. Lgs 387/03, che con i criteri introdotti ha rivoluzionato il precedente sistema di incentivazione pubblica alla realizzazione di impianti di produzione di energia elettrica per via fotovoltaica.

Il decreto ha previsto la corresponsione di una Tariffa incentivante in "Conto Energia" fissa per un determinato periodo di tempo (20 anni) e l'obbligo di acquisto dell'energia per i distributori. Successive delibere dell'AEEG hanno stabilito le modalità di presentazione delle richieste di incentivazione e le condizioni tecnico-economiche del servizio di scambio sul posto dell'energia prodotta. Nei primi 10 giorni successivi all'avvio del meccanismo (nel settembre 2005) pervennero al GRN quasi 4.000 domande.

Il più recente "Conto Energia"

La legislazione in materia di fotovoltaico è stata poi aggiornata e semplificata con un ulteriore decreto riguardante il conto energia, emesso nel febbraio dell'anno 2007. Il meccanismo di incentivazione Conto Energia consiste nella erogazione di un corrispettivo commisurato all'elettricità prodotta dagli impianti, sulla base di tariffe incentivanti che variano a seconda della taglia. Le risorse per l'erogazione delle tariffe incentivanti trovano copertura nel gettito della componente tariffaria A3 della nostra bolletta elettrica. In particolare, il conto energia si applica agli impianti fotovoltaici collegati alla rete elettrica, della potenza da 1 kW sino a 1.000 kW (dal 2007 non è più fis-



sato un limite superiore), entrati in esercizio dopo il 30/09/2005. Possono beneficiare di tale incentivazione persone fisiche, persone giuridiche, soggetti pubblici, condomini di unità abitative e/o di edifici.

L'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas, con la delibera 188/2005, ha individuato nel Gestore del Sistema Elettrico - GSE Spa (ex GRN) il "Soggetto Attuatore" per l'incentivazione del fotovoltaico, ai sensi e in attuazione dell'articolo 7 del decreto ministeriale 28 luglio 2005.

Il GSE verifica le domande di ammissione all'incentivazione, comunica gli esiti delle valutazioni, eroga gli incentivi ventennali e effettua verifiche sugli impianti in costruzione e in esercizio.

Gli impianti fotovoltaici che possono beneficiare delle tariffe del Conto Energia sono riconducibili (secondo il decreto 2007) a tre tipologie:

- impianti fotovoltaici "non integrati";
- impianti fotovoltaici "parzialmente integrati";
- impianti fotovoltaici "con integrazione architettonica".

Negli impianti fotovoltaici "non integrati" i moduli sono installati a terra, in modo non complanare alle superfici su cui sono fissati, sia che si tratti di elementi di arredo urbano e viario (includere barriere acustiche, pensiline, pergole, tettoie), che di tetti (solo nel caso di tetti a falda) o facciate di edifici. Inoltre, sono comprese in questa tipologia anche le coperture dei parcheggi, i lampioni (sempre in connessione a rete, quindi senza batterie) e i sistemi a inseguimento installati a terra.

Gli impianti fotovoltaici sono "parzialmente integrati" quando i moduli, non sostituendo i materiali che costituiscono le superfici di appoggio, sono installati su tetti piani e terrazze di edifici e fabbricati, in modo complanare alle superfici degli edifici su cui sono fissati (tetti a falda, coperture, facciate, balaustre, parapetti) e agli elementi di arredo urbano e viario.

Gli impianti fotovoltaici "con integrazione architettonica" sono quelli in cui i moduli sostituiscono materiali di rivestimento di tetti, coperture, facciate di edifici e fabbricati, con la stessa inclinazione e funzionalità architettonica, oppure sostituiscono la parte trasparente o semi trasparente di facciate o lucernari, garantendo l'illuminamento naturale degli ambienti interni all'edificio, e così via.

sul meccanismo di mercato dei Certificati Verdi. Per ottenere i certificati verdi gli impianti di produzione devono essere preventivamente qualificati come Alimentati da Fonti Rinnovabili (Qualifica IAFR). Il GSE rilascia inoltre altre forme di certificazione dell'energia da fonti rinnovabili basate sulla Garanzia di Origine (GO) e sui certificati RECS.

La nuova normativa per l'efficienza energetica negli edifici

Il Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192 e il Decreto Legislativo 29 dicembre 2006, n. 311 fissano criteri e normative per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici, in accordo con quanto stabilito dal Protocollo di Kyoto, relativamente alla limitazione dei gas serra, definendo tra l'altro, ambiti di intervento, funzioni e compiti degli enti locali e delle regioni. La legislazione per gli edifici di nuova costruzione, particolarmente interessati da questo decreto, detta le norme che i proprietari dovranno rispettare in ordine al fabbisogno energetico.

Lo stimolo al perseguimento di obiettivi di efficienza energetica negli edifici si è tradotto in una serie di misure contenute nella legge finanziaria 2007 (legge 27 dicembre 2006 n. 296, "Disposizioni per la formazione del bilancio annuale e pluriennale dello Stato") che ha stabilito criteri in base ai quali è possibile ottenere detrazioni fiscali del 55% su determinate spese effettuate per la ristrutturazione delle proprie abitazioni. In particolare per quegli edifici che si doteranno di sistemi di riduzione delle dispersioni termiche e di impianti come i pannelli solari e le caldaie a condensazione finalizzati ad un più oculato sfruttamento dei combustibili fossili e all'utilizzo della fonte solare.

La finanziaria 2008 per le rinnovabili

La legge Finanziaria del 2008 (Legge n. 244 del 24 dicembre 2007: "Disposizioni per la formazione del bilancio annuale e pluriennale dello Stato") ha aggiornato il sistema vigente di incentivazione alla produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili. L'obiettivo è di promuovere la produzione di energia "alternativa" e di migliorare le politiche dei prezzi e le tariffe a carico dei consumatori. Oltre al nuovo sistema di incentivazione alle rinnovabili, la Finanziaria 2008 tratta:

- la semplificazione delle procedure di autorizzazione degli impianti alimentati da fonti rinnovabili;
- la facilitazione nelle fasi di connessione degli impianti, di acquisto e trasmissione dell'elettricità da fonti rinnovabili;
- l'armonizzazione delle funzioni di Stato e Regioni in materia di FER.

La legge modifica in senso restrittivo la normativa di incentivazione alla produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, in modo da ridurre il rischio di eventuali forme di abuso nell'accesso alle facilitazioni.

In particolare, il nuovo sistema di incentivazione mette ordine nella annosa questione degli incentivi CIP6, contributi statali spesso destinati anche alle "false rinnovabili", tra cui i rifiuti.

La Legge Finanziaria 2008 stabilisce quindi quali sono le tipologie di fonti energetiche rinnovabili che potranno usufruire della nuova forma di incentivazione:

- energia eolica (on shore ed off shore);
- energia solare;
- energia geotermica;
- energia del moto ondoso e maremotrice;
- energia da biomasse;

- energia da rifiuti biodegradabili, biogas.

Impianti in esercizio al 31/12/2007

Gli impianti per la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili che sono già in funzione alla data del 31/12/2007, continuano ad usufruire degli incentivi del CIP6, il sistema di remunerazione adottato con delibera del Comitato Interministeriale Prezzi (delibera n. 6 del 1992). Il CIP6 fissava incentivi economici per la cessione di elettricità ottenuta da impianti alimentati da fonti rinnovabili e assimilate. Sono considerati impianti alimentati da fonti assimilate:

- quelli in cogenerazione;
- quelli che utilizzano calore di risulta, fumi di scarico e altre forme di energia recuperabile in processi e impianti;
- quelli che usano gli scarti di lavorazione e/o di processi
- quelli che utilizzano fonti fossili prodotte solo da giacimenti minori isolati.

Impianti in esercizio dal 01/01/2008

Gli impianti per la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili che siano stati già autorizzati ma in fase di costruzione o non ancora costruiti devono ottenere il riconoscimento del diritto agli incentivi da parte del Ministro dello sviluppo economico.

Tali impianti beneficeranno dunque del nuovo sistema di incentivazione, che individua due categorie:

- impianti con potenza nominale superiore ad 1 MW,
- impianti con potenza nominale inferiore ad 1 MW.

Impianti con potenza nominale superiore ad 1 MW

Gli impianti per la produzione di energia

elettrica da fonti rinnovabili di potenza nominale superiore ad 1 MW, usufruiscono di incentivazione tramite Certificati Verdi (legge 244 – art. 2 – comma 144). In particolare, il Gestore dei Servizi Elettrici (GSE) rilascia ai produttori di energia elettrica da rinnovabili un numero di Certificati Verdi pari al prodotto tra la produzione netta annua di energia elettrica da fonti rinnovabili, e un coefficiente diverso da fonte a fonte, che è riportato in **tabella 4.1**. La durata degli incentivi è di 15 anni.

Impianti con potenza inferiore ad 1 MW

Gli impianti per la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili di potenza nominale inferiore ad 1 MW hanno diritto a due diverse forme di incentivazione; il produttore di energia può scegliere di quale forma di incentivo usufruire:

- incentivazione tramite Certificati Verdi (analogamente agli impianti di potenza superiore ad 1 MW),
- contributo in Conto Energia specifico per fonte, tramite una tariffa fissa onnicomprensiva per ogni kWh di energia elettrica prodotto.

L'entità della tariffa fissa onnicomprensiva, per ciascuna fonte, è indicata in **tabella 4.2**. La durata degli incentivi è anche in questo caso di 15 anni.

Mercato e Valore dei Certificati Verdi

I Certificati Verdi, emessi dal GSE, a partire dal 2008 hanno un valore unitario pari a 1 MWh e sono collocati sul mercato a un prezzo pari alla differenza tra il valore di riferimento, fissato in sede di prima applicazione in 180 euro per MWh, e il valore medio annuo del prezzo di cessione dell'energia elettrica definito dall'Autorità per

Tabella 4.1

Riferimento	Fonte	Coefficiente
1	Eolica per impianti di taglia superiore a 200 kW	1,00
1-bis	Eolica offshore	1,1
2	Solare	**
3	Geotermica	0,9
4	Moto ondoso e maremotrice	1,8
5	Idraulica	1,00
6	Rifiuti biodegradabili, biomasse diverse da quelle di cui al punto successivo	1,00
7	Biomasse e biogas prodotti da attività agricola, allevamento e forestale da filiera corta	*
7-bis	Biomasse e biogas di cui al punto 7, alimentanti impianti di cogenerazione ad alto rendimento, con riutilizzo dell'energia termica in ambito agricolo	*
8	Gas di scarica e gas residuati dai processi di depurazione e biogas diversi da quelli del punto precedente	0,8

* È fatto salvo quanto disposto a legislazione vigente in materia di produzione di energia elettrica mediante impianti alimentati da biomasse e biogas derivanti da prodotti agricoli, di allevamento e forestali, ivi inclusi i sottoprodotti, ottenuti nell'ambito di intese di filiera o contratti quadro ai sensi degli articoli 9 e 10 del decreto legislativo n. 102 del 2005 oppure di filiere corte.

** Per gli impianti da fonte solare si applicano i provvedimenti attuativi dell'articolo 7 del decreto legislativo 29 dicembre 2003, n. 387, v. anche box sul "Conto Energia".

Tabella 4.2

Riferimento	Fonte	Coefficiente
1	Eolica per impianti di taglia < 200 kW	30
2	Solare	**
3	Geotermica	20
4	Moto ondoso e maremotrice	34
5	Idraulica	22
6	Rifiuti biodegradabili, biomasse diverse da quelle di cui al punto successivo	22
7	Biomasse e biogas prodotti da attività agricola, allevamento e forestale da filiera corta	*
8	Gas di scarica e gas residuati dai processi di depurazione e biogas diversi da quelli del punto precedente	18

* È fatto salvo quanto disposto a legislazione vigente in materia di produzione di energia elettrica mediante impianti alimentati da biomasse e biogas derivanti da prodotti agricoli, di allevamento e forestali, ivi inclusi i sottoprodotti, ottenuti nell'ambito di intese di filiera o contratti quadro ai sensi degli articoli 9 e 10 del decreto legislativo n. 102 del 2005 oppure di filiere corte.

** Per gli impianti da fonte solare si applicano i provvedimenti attuativi dell'articolo 7 del decreto legislativo 29 dicembre 2003, n. 387, v. anche box sul "Conto Energia".

l'energia elettrica e il gas, registrato nell'anno precedente e comunicato dalla stessa Autorità entro il 31 gennaio di ogni anno a decorrere dal 2008. Tale prezzo è oggi di circa 90 euro al MWh, quindi il valore attuale di un Certificato Verde è di circa 90 euro al MWh elettrico prodotto.

La Finanziaria 2008 ha aumentato la quota di energia elettrica prodotta da impianti ad energie rinnovabili che devono immettere sul mercato tutti gli importatori e produttori di energia elettrica da fonti non rinnovabili che immettono in rete più di 100 GWh/anno di energia elettrica.

La quota attuale è del 3,05%, e la Finanziaria 2008 ne prevede l'incremento dello 0,75% dal 2007 al 2011, quando si arriverà quindi ad una quota obbligatoria del 7,55%.

Tale quota rappresenta un valore difficilmente raggiungibile dai produttori da fonte tradizionale, costretti quindi ad acquisire CV dai produttori di energia pulita, e darà luogo ad un vigoroso mercato di scambio fra i proprietari degli impianti e gli operatori presenti sul mercato.

A partire dal 2008 e fino al raggiungimento dell'obiettivo minimo della copertura del 25 per cento del consumo interno di energia elettrica con fonti rinnovabili e dei successivi aggiornamenti derivanti dalla normativa dell'Unione europea, il GSE, su richiesta del produttore, ritira i Certificati

Verdi, in scadenza nell'anno, ulteriori rispetto a quelli necessari per assolvere all'obbligo della quota minima dell'anno precedente, a un prezzo pari al prezzo medio riconosciuto ai Certificati Verdi registrato nell'anno precedente dal Gestore del mercato elettrico (GME) e trasmesso al GSE entro il 31 gennaio di ogni anno.

Altre disposizioni

A partire dal 2009 non sarà possibile usufruire degli incentivi previsti dalla Finanziaria 2008 per impianti che hanno ottenuto ulteriori incentivi pubblici di natura nazionale, regionale, locale o comunitaria in conto energia, in conto capitale o in conto interessi.

Il valore di riferimento, i coefficienti moltiplicativi per ogni fonte rinnovabile, e l'entità della tariffa onnicomprensiva (riportati nella precedenti Tabelle), possono essere aggiornati, ogni tre anni, con decreto del Ministro dello Sviluppo Economico, assicurando la congruità della remunerazione ai fini dell'incentivazione dello sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili.

Semplificazioni nella realizzazione di impianti a fonti rinnovabili

Al decreto legislativo n. 387 del 2003 (Articolo 12, che tratta di "Razionalizzazione e semplificazione delle procedure autorizzative" e precisamente dispone

Tabella 4.3

Fonte	Soglie
Eolica	60 kW
Solare fotovoltaica	20 kW
Idraulica	100 kW
Biomasse	200 kW
Gas di discarica, gas residuati dai processi di depurazione e biogas	250 kW

che la costruzione e l'esercizio degli impianti di produzione di energia elettrica alimentati da fonti rinnovabili sono soggetti ad una autorizzazione unica, rilasciata dalla regione o altro soggetto istituzionale delegato dalla regione) è ora allegata una tabella (tab. 4.3) che per ciascuna fonte fissa la soglia per la fruizione della normativa semplificata di autorizzazione.

Con successivi decreti ministeriali, si prevede che saranno definite le modalità per assicurare la transizione dal precedente meccanismo di incentivazione ai nuovi meccanismi della finanziaria 2008, nonché le modalità per l'estensione dello scambio sul posto a tutti gli impianti alimentati con fonti rinnovabili di potenza nominale media annua non superiore a 200 kW, fatti salvi i diritti di officina elettrica.



The image shows an industrial facility with a complex network of pipes and large storage tanks. The pipes are painted in shades of blue and yellow. In the foreground, several large, curved pipes are visible, with one prominent yellow pipe. The background features several large, spherical storage tanks and more piping. The sky is a clear, bright blue. The text "Capitolo Cinque" is overlaid on the right side of the image.

Capitolo **Cinque**

Le fonti di energia

Questo capitolo intende offrire una panoramica dell'energia, attraverso la sua definizione e una rassegna sintetica delle varie forme di energia tradizionale, per proseguire con una definizione delle fonti rinnovabili quali opzione sostenibile alle fonti di cui prima. Considerati gli obiettivi del volume, le fonti rinnovabili saranno nella seconda parte oggetto di una attenta e dettagliata analisi.

L'energia, nelle sue varie forme, è disponibile in natura racchiusa nelle fonti energetiche, classificate in primarie e secondarie. Le *fonti primarie* sono quelle esistenti in natura tal quali: carbone, petrolio, gas naturale, etc. Le *fonti energetiche secondarie* non esistono in natura, ma derivano dalla trasformazione di altre fonti primarie o secondarie: benzina o gasolio, derivati dal petrolio, energia elettrica generata nelle centrali termoelettriche a partire da altre fonti, e così via.

Le sostanze combustibili contenenti il carbonio da ossidare sono: la legna, utilizzata nei paesi più poveri, e i combustibili fossili già ricordati. Le altre principali forme di energia sono quella idraulica e quella nucleare, attraverso la loro trasformazione in energia elettrica.

Apporti, purtroppo ancora modesti, all'approvvigionamento energetico vengono, infine, dall'energia geotermica e dalle nuove forme rinnovabili di energia, quali la solare, termica e fotovoltaica, eolica, da biomasse, etc.

Le fonti di energia rinnovabili rappresentano comunque un'alternativa sempre più concreta alle fonti tradizionali, come garanzia di sicurezza dell'approvvigionamento energetico e come risposta alla continua richiesta di energia a costi ambientalmente sostenibili. In futuro esse forniranno una buona percentuale dell'enorme quantità di energia necessaria



Bus a idrogeno, Torino

Per un approfondimento su:

• **Unità di misura dell'energia,** vedi l'allegato: "Unità di misura dell'energia".

ad una popolazione di miliardi di esseri umani, senza cambiamenti del modello attuale di produzione, trasporto e distribuzione dell'elettricità.

L'utilizzo delle energie rinnovabili rappresenta un'esigenza sia per i paesi industrializzati, sia per quelli in via di sviluppo. I primi hanno interesse, nel breve periodo, verso usi più sostenibili delle risorse, riduzioni delle emissioni di gas serra e dell'inquinamento atmosferico, diversificazione del mercato energetico e sicurezza di approvvigionamento energetico. Per i paesi in via di sviluppo, le energie rinnovabili rappresentano una concreta opportunità di sviluppo sostenibile e di accesso all'energia in aree remote.

L'Unione Europea mira ad aumentare l'uso delle risorse rinnovabili per limitare la dipendenza dalle fonti fossili convenzionali e allo stesso tempo far fronte ai pressanti problemi di carattere ambientale che sono generati dal loro utilizzo.

A conferma di ciò nella Direttiva 2001/77/CE "Promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili", viene posto come traguardo il soddisfacimento, entro il 2010, di una quota pari al 12% del consumo interno lordo di energia e al 22% di quello dell'energia elettrica, attraverso l'utilizzo di fonti rinnovabili. Per ottenere questi risultati nella direttiva sono indicati degli obiettivi differenziati per ogni singolo Stato membro, e l'Italia si è posta l'obiettivo di raggiungere, entro il 2010, una quota pari al 22% della produzione elettrica nazionale.

La direttiva pone, inoltre, i seguenti traguardi per il futuro:

- entro il 2020: coprire il 20% di energia prodotta con fonti rinnovabili, mediante un considerevole aumento di quelle più vicine al mercato (compresi i parchi eolici *off shore* e i biocarburanti di

seconda generazione);

- entro il 2030: produrre energia elettrica e calore con ridotte emissioni di carbonio anche attraverso il ricorso a sistemi di cattura e stoccaggio della CO₂; adattare gradualmente i sistemi di trasporto ai biocarburanti di seconda generazione e alle celle a combustibile ad idrogeno;
- dal 2050 e oltre: completare il passaggio ad un sistema energetico europeo "carbon free" attraverso l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili e l'utilizzo sostenibile del carbone, del gas e dell'idrogeno e, in prospettiva, della fissione nucleare di quarta generazione.

[5.1]

Le fonti non rinnovabili

I combustibili fossili, sostanze costituite prevalentemente da carbonio, si sono formati a seguito delle trasformazioni subite da residui animali e vegetali nel corso delle varie ere geologiche.

Ad oggi, nelle forme di petrolio, carbone e gas naturale, sono la principale fonte energetica dell'umanità, a causa delle caratteristiche che li contraddistinguono: sono "compatti", ovvero hanno un alto rapporto energia/volume, sono facilmente trasportabili e stoccabili, fino a pochi anni fa costavano poco.

Il loro consumo comporta però notevoli svantaggi: sono inquinanti, determinano l'incremento di CO₂ in atmosfera con conseguenze sul riscaldamento terrestre, e non sono rinnovabili, dato che il processo di fossilizzazione della sostanza organica è estremamente lungo.

Poiché il tasso al quale vengono utilizzati è molto maggiore del tasso (trascurabile) della loro rigenerazione, i giacimenti vanno

esaurendosi, mentre aumenta il loro prezzo, anche a causa della crescente domanda di energia a livello mondiale.

Per tali motivi si ritiene che i fabbisogni energetici mondiali dovrebbero includere quote più ampie di fonti energetiche alternative nel paniere energetico.

Il carbone

Il carbone è un combustibile tra i più antichi adoperati dall'uomo e al cui apporto energetico si deve la rivoluzione industriale e l'inizio della cosiddetta era della tecnologia. Esso è costituito da sostanze di origine organica, i cui atomi costitutivi sono: carbonio, idrogeno, azoto, ossigeno, zolfo, e da minerali, quali argilla, calcite, pirite e altri materiali inerti, oltre ad una percentuale variabile di umidità.

L'ipotesi più accreditata relativa al processo di formazione del carbone in lontane ere geologiche è la seguente. In un arco di tempo compreso tra circa 500 e 2 milioni di anni fa, in un pianeta ricco di vegetazione, grandi masse di sostanze vegetali in decomposizione, accumulate in zone paludose, vennero ricoperte da notevoli masse di detriti alluvionali, con un alternarsi di materia organica e mate-

riali minerali. Le forti pressioni e temperature determinate dall'accumularsi degli strati nel corso delle ere, diede luogo ad un processo di fossilizzazione del materiale organico il cui risultato è il carbone, composto grosso modo da: 60% di carbonio, 15% di ceneri, 10% di umidità, 1% di zolfo.

Sulla base delle loro caratteristiche fisiche, si possono individuare due tipi di carbone: quello fossile vero e proprio "hard coal", che raggruppa antracite, e carboni bituminosi, e quello "brown coal" con litantrace recente, lignite, sub-bituminosi; i primi hanno potere calorifico superiore alle 6.450 kcal/kg, gli altri inferiore. I carboni più antichi, più energetici, più duri, sono, ovviamente, le antraciti che risalgono al Paleozoico e cioè ad un periodo che va dai 200 ai 500 milioni di anni fa, le litantraciti si sono formate in un periodo che varia dai 50 ai 200 milioni di anni fa, le ligniti hanno solo da 2 a 50 milioni di anni, la carbonizzazione è quasi completa, ma la fossilizzazione è appena agli inizi. Di scarso valore energetico sono, infine, le torbe che datano solo 1 o 2 milioni di anni; la decomposizione dei vegetali ad opera dei batteri è completa ma la fossilizzazione che, per un processo geochimico da elevate pressione e temperatura la muterà dapprima in lignite e poi in litantrace e antracite, non è ancora incominciata.

Il carbone, che all'inizio degli anni sessanta ancora copriva il 44% della domanda energetica mondiale (nel 1925 ben l'80% dell'energia consumata veniva dal carbone), va oggi a soddisfare circa un quarto del fabbisogno energetico, largamente superato dal petrolio (34%) e seguito dal gas naturale (21%).

Il censimento delle riserve mondiali di carbone indica la disponibilità di notevoli



riserve di questo combustibile, concentrate in alcune nazioni, quali: Stati Uniti, Russia, Cina, Sud Africa (complessivamente il 75% del totale mondiale). Le riserve accertate ammontano a valori tali da poter alimentare i consumi, all'attuale livello di richiesta, per i prossimi duecento anni. Attualmente l'impiego del carbone é indirizzato in parte ad usi termoelettrici e, soprattutto, ad usi siderurgici (la produzione di una tonnellata di ghisa richiede circa 500 kg di coke): nelle cokerie il carbone viene trasformato in carbon coke metallurgico (che ha potere calorifico inferiore, p.c.i., pari a 7.200 kcal/kg e oltre) ad elevata resistenza meccanica e quindi adattato a sostenere la carica degli altoforni. Il carbone viene oggi, per motivazioni legate ai costi, utilizzato in prevalenza dagli stessi paesi produttori. Infatti il valore minerario di questo combustibile costituisce solo del 30% del costo finale, essendo la maggior parte del valore al consumo imputabile alla sua movimentazione (ferrovie, chiatte, camion).

Gli idrocarburi

Gli idrocarburi sono composti del carbonio con alta presenza di atomi di idrogeno e, in parte, di ossigeno, azoto e zolfo.



Ne esistono di vari tipi e si ritrovano in natura nelle rocce sedimentarie.

Come vedremo, hanno contribuito a formare gli idrocarburi, oltre alle sostanze organiche di origine vegetale, anche residui di sostanze animali.

Essenzialmente si tratta di composti chimici binari costituiti da carbonio e idrogeno. Ad eccezione della molecola CH_4 dell'idrocarburo più semplice, il metano, le molecole degli idrocarburi contengono due o più atomi di carbonio legati direttamente tra loro da legami semplici, doppi o tripli disposti in modo da formare una catena aperta, diritta o ramificata, oppure un anello o un sistema di anelli: le valenze di ciascun atomo di carbonio che non sono impegnate da altri atomi di carbonio sono saturate da altrettanti atomi di idrogeno.

Secondo la natura dei legami tra gli atomi di carbonio e la loro disposizione in catena aperta o ad anello si hanno così numerose serie di idrocarburi, dagli alcani, come ad es. il metano e il propano, agli alcheni, come l'etilene e il propene, ai dieni, agli aromatici monociclici, come il benzene, a quelli aromatici, come il naftene, il benzene, il metilbenzene, etc.

Tutti gli idrocarburi sono combustibili e bruciano all'aria con fiamma più o meno fuliginosa secondo il loro contenuto in idrogeno più o meno elevato; gli idrocarburi gassosi e i vapori di quelli liquidi possono formare con l'aria, entro certi limiti di composizione, delle miscele esplosive. Sono i composti fondamentali della chimica organica, dai quali derivano formalmente quelli delle diverse serie, p. es. della serie degli alcoli, delle ammine, ecc., per sostituzione di uno o più dei loro atomi di idrogeno con altrettanti gruppi funzionali.

L'importanza degli idrocarburi è enorme e

di vario tipo. Le miscele di idrocarburi estratte dal petrolio e opportunamente elaborate costituiscono oggi la fonte di energia più importante, cui si affiancano gli idrocarburi gassosi naturali.

Singoli idrocarburi allo stato puro, dal metano all'etilene, al propilene e al butadiene, sono, poi, i prodotti di partenza per la produzione industriale di moltissime sostanze organiche e di prodotti chimici svariati, delle materie plastiche e delle gomme sintetiche.

Gli idrocarburi aromatici sono invece le materie prime per la produzione di coloranti, farmaci, esplosivi, insetticidi, e così via.

In natura gli idrocarburi possono presentarsi, in condizioni normali di temperatura e di pressione, allo stato gassoso (gas naturale), liquido (petrolio) e solido (asfalto, bitume).

La fonte di idrocarburi di gran lunga più importante è oggi il petrolio, dal quale si ottengono singoli idrocarburi attraverso processi di frazionamento ovvero attraverso adatte trasformazioni chimiche, subito seguito dal gas naturale.

Il petrolio

La denominazione "petrolio" deriva dal latino medievale *petroleum*, "olio di pietra". Il petrolio è costituito da una complessa miscela di idrocarburi naturali solidi, liquidi e gassosi (gas naturali), contenente, in quantità generalmente piccole, composti ossigenati, solforati e azotati, che si presenta a temperatura ambiente come un liquido più o meno denso, oleoso, infiammabile, di colore variabile dal giallastro al nero.

Viene estratto dal sottosuolo tramite pozzi ottenuti con trivellazioni che si spingono fin oltre gli 8.000 m profondità. Il prodotto estratto dai pozzi e non ancora raffina-

to è indicato come petrolio greggio o semplicemente greggio.

Il greggio viene sottoposto a lavorazione nelle raffinerie per ottenere una vasta gamma di prodotti destinati a svariati impieghi. Dalla prima fondamentale separazione dei prodotti petroliferi, effettuata con la distillazione primaria (*topping*), si ottengono in genere cinque frazioni con punto di ebollizione (p.e.) e densità (d) man mano più elevati: benzina (p.e. inferiore a 150 °C, d ~ 0,70-0,75 kg/dm³), acqua ragia minerale o benzina pesante (p.e. ~ 145-200 °C, d ~ 0,77-0,78 kg/dm³), cherosene (p.e. ~ 175-280 °C, d ~ 0,79-0,81 kg/dm³), detto anche semplicemente petrolio, da cui si ricavano oli per illuminazione e per riscaldamento e combustibili per motori a turbina e a reazione, gasolio (p.e. ~ 280-350 °C, d ~ 0,82-0,84 kg/dm³) e residuo di distillazione (distilla solo sotto vuoto, d superiore a 0,84 kg/dm³), da cui si ottengono lubrificanti, olio combustibile, bitume.

Il gas naturale

I gas naturali sono costituiti da idrocarburi a basso peso molecolare, aventi molecole formate al massimo da quattro atomi di carbonio con tracce di idrocarburi con cinque atomi di carbonio. In questa miscela prevale il metano, un composto chimico di formula CH₄, l'idrocarburo di struttura più semplice.

A volte il metano costituisce la quasi totalità della frazione gassosa stratificatasi nella parte più alta dei giacimenti di petrolio, con cui si trova in questo caso associato; in molti casi, invece, il giacimento è costituito soltanto da gas naturale con piccole percentuali di azoto, biossido di carbonio e tracce di solfuro di idrogeno. Il gas naturale rappresenta in fase di utilizzo finale una forma di energia meno

Composizione dei gas naturali

Composto	Percento in volume
Metano	89,4
Etano	5,4
Propano	1,9
2-metilpropano	0,4
Butano	0,1
Azoto	1,9
Biossido di carbonio	0,7
Altri	0,2

inquinante e più flessibile perché non necessita di stoccaggio e la rete di distribuzione garantisce continuità di fornitura. Infatti, sulla spinta di una sempre crescente consapevolezza dei rischi ambientali legati ad un indiscriminato e non consapevole utilizzo delle risorse energetiche, incurante delle ripercussioni delle attività antropiche sull'ecosfera, il metano ha, in alcuni paesi, trovato applicazione sempre più crescente nell'industria e soprattutto nella generazione dell'energia elettrica. Ciò mediante l'utilizzo di impianti a ciclo combinato che bruciano gas per la generazione di energia elettrica con una turbina a gas, e utilizzano i residui ad alta temperatura della combustione per la produzione di vapore e altra energia elettrica, raggiungendo così rendimenti di conversione dell'energia termica in elettrica decisamente più elevati di quelli ottenuti nei classici cicli che utilizzano quale fonte primaria il carbone o i derivati del petrolio.

I suoi usi sono quindi praticamente identici a quelli del petrolio: come combustibile negli impianti industriali e nelle centrali termoelettriche, per i fornelli da cucina, gli scaldi-acqua, gli impianti di riscaldamento e in piccola misura nell'autotrazione.

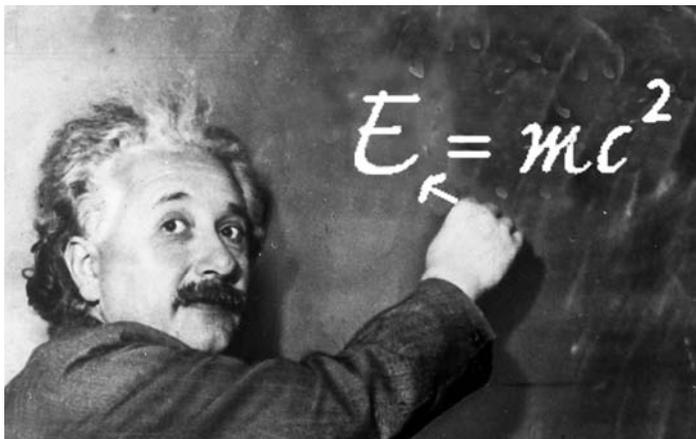
L'energia nucleare**Il nucleare da fissione**

Questa fonte di energia ha rappresentato, negli anni dal 1960 al 1980, nell'immaginario collettivo, la speranza di una fonte quasi illimitata e a basso costo di energia per l'umanità intera.

La produzione di energia elettrica in una centrale nucleare si basa sulla fissione dell'uranio o di altri elementi come il plutonio. La fissione consiste nella scissione, per bombardamento con neutroni, degli atomi di uranio. Come prodotto della fissione si hanno dei frammenti, cioè elementi diversi della scala atomica, alcuni neutroni che servono a continuare la reazione a catena controllata, particelle e radiazioni elettromagnetiche.

Quando però si vanno a fare i conti, la massa di tutti i prodotti della fissione è leggermente inferiore alla massa del nucleo di uranio da cui si era partiti, e quella quantità di massa che è apparentemente scomparsa si è trasformata in energia, misurabile secondo la famosa relazione di equivalenza tra massa e energia di Einstein $E = mc^2$; da un difetto di massa di un grammo si ottengono 25 milioni di kWh.

Il nucleare ricevette una notevole spinta allo sviluppo e all'applicazione subito dopo la fine della seconda guerra mondiale, quando si cominciò a porre l'attenzione sui limiti di durata delle fonti allora in uso che, a parte l'idroelettrica già quasi interamente sfruttata, almeno nei paesi industrializzati, erano rappresentati dai combustibili di origine fossile: carbone e idrocarburi. Questa fonte ha avuto un sostanziale ridimensionamento, in ragione della maggiore attenzione posta ora, a seguito del catastrofico incidente di Chernobyl, alla sicurezza di questi impianti per la popolazione.



L'opzione energetica nucleare non è però cancellata: studi e sperimentazioni sono in corso allo scopo di mettere a punto tecnologie per rendere gli impianti nucleari per generazione di energia elettrica "intrinsecamente sicuri", capaci cioè, in caso di malfunzionamenti, di mettersi in condizioni di sicurezza e senza alcun rischio per la popolazione per la loro stessa maniera di funzionare, non richiedendo interventi umani o l'entrata in funzione di dispositivi e sistemi che, per quanto realizzati con criteri opportuni, hanno sempre una sia pur piccolissima probabilità di fallire.



Il nucleare da fusione

Quando l'uomo riuscirà a rendere industriale e quindi utilizzabile l'energia da fusione, avrà portato sul nostro pianeta l'energia del sole e delle stelle. Infatti in modo reciproco rispetto alla produzione di energia dal difetto di massa associato al processo di fissione dei nuclei degli elementi pesanti, l'energia prodotta dalle stelle è dovuta a processi di fusione di elementi leggeri.

Nuclei di idrogeno (nella maggior misura), elio, carbonio, ossigeno si fondono, trasformandosi in elementi via via più pesanti: sodio, magnesio, silicio, sino al ferro, presente nel nucleo di molte stelle, anche in questo caso con produzione di energia corrispondente al difetto di massa tra prodotti reagenti e elementi risultanti.

Queste reazioni di fusione avvengono solo a temperature dell'ordine di diverse decine di milioni di gradi esistenti nei nuclei stellari, inizialmente originate dal collasso gravitazionale della materia stellare primordiale e poi mantenute dallo sviluppo di energia termonucleare dopo l'accensione della stella.

La prima volta che la reazione di fusione è stata riprodotta sulla Terra lo è stato purtroppo con una bomba all'idrogeno nel 1952, sono poi stati avviati studi per lo sfruttamento di questa fonte di energia in applicazioni civili.

Per ottenere la reazione di fusione è necessario far collidere nuclei di elementi leggeri, vincendo le forze di repulsione elettrostatica che si esercitano tra i nuclei; questo può essere ottenuto in due modi diversi: il confinamento magnetico oppure il confinamento inerziale del plasma costituito dai nuclei degli elementi reagenti alle condizioni di temperatura e pressione necessarie alla reazione.

La strada più promettente, a cui si sta lavo-

rando nei laboratori di molti paesi compresa l'Italia, è quella del confinamento magnetico applicato alla reazione tra due isotopi dell'idrogeno, deuterio e trizio, la cui reazione ha una temperatura ottimale di 100 milioni di gradi a pressioni di un milionesimo di quella atmosferica.

Considerando che 1 grammo di miscela deuterio-trizio equivale, sul piano energetico, a 10 tonnellate di petrolio, è evidente che, una volta che si sarà riusciti a riprodurre e a confinare la reazione termonucleare, si avrà a disposizione una fonte di energia praticamente inesauribile, il cui combustibile è facile da reperire e che non produce scarichi inquinanti né scorie radioattive come quelle prodotte dalla fissione.

Per questi motivi ricerche sulla fusione sono in corso in tutto il mondo, anche se è difficile prevedere i tempi necessari alla messa a punto di un processo industriale, oggi stimati non inferiori a trenta o quaranta anni.

[5.2] Le fonti rinnovabili di energia

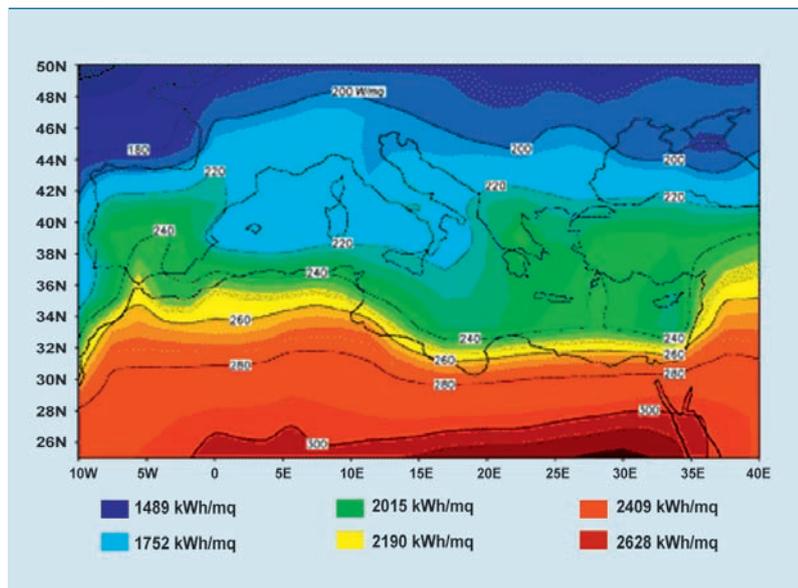
Quasi tutte le fonti di energia sul nostro pianeta hanno un'origine comune: l'irraggiamento solare (fig. 5.1); i combustibili fossili (carbone, petrolio, gas naturale) derivano dalla trasformazione di materiali organici che senza il processo di fotosintesi che trae energia dall'irraggiamento della nostra stella non avrebbero potuto formarsi.

L'energia idroelettrica, che sfrutta le cadute d'acqua, non potrebbe esistere senza il ciclo evaporativo dell'acqua che, a sua volta, trae dall'irraggiamento solare l'energia necessaria. Senza il Sole, niente vento e niente energia eolica.

Tutte le forme di energia sono a rigore rinnovabili, la differenza sta nella "velocità" con cui esse si riproducono: quelle fossili abbisognano di milioni di anni (in un breve spazio di qualche centinaio di anni stiamo consumando quelle la cui costituzione ha richiesto tempi geologici), le altre, che definiamo più propriamente "rinnovabili", hanno in rapporto alle precedenti una velocità o capacità di "rinnovo" praticamente infinita, come nel caso della radiazione solare, sfruttata mediante fotovoltaico, solare termico e eolico al momento in cui essa perviene sul pianeta, e delle maree, o quasi infinita, come nel caso dell'energia idroelettrica, dell'energia da biomasse, da correnti marine e moto ondoso.

Oggi solo l'energia idroelettrica e quella da biomasse vengono sfruttate in maniera significativa, le altre sono in via di sviluppo e di maturazione tecnologica tendente a renderne i costi comparabili con quelli da fonti tradizionali. Le fonti rinnovabili, nel mondo, rappresentano circa il 18% delle fonti di energia totali con una

Fig. 5.1 Irraggiamento solare nel Mediterraneo [kWh/mq]





netta prevalenza delle biomasse (il 13%, in larga misura costituite da biomasse tradizionali, cioè legna) e dell'idraulica (il 3%).

Energia eolica

Lo sfruttamento dell'energia cinetica associata alle masse d'aria in movimento che lambiscono la superficie terrestre, risale ad epoche lontanissime: i popoli antichi ne facevano uso per ricavare energia meccanica da usare per svariate applicazioni, quali: la macinazione dei cereali, il pompaggio dell'acqua, l'azionamento di segherie, cartiere, tintorie e altre.

Una per tutte si ricordi quale importanza abbiano avuto i mulini a vento per l'Olanda che a partire dal 1350 li utilizzò per prosciugare le paludi da cui fu ricavata buona parte del territorio nazionale. I primi generatori di energia elettrica azionati dal vento risalgono agli inizi del novecento; nel periodo tra le due guerre mondiali si verificò una rapida evoluzione sul piano tecnologico che portò alla costruzione di aerogeneratori sempre più potenti, dai 40 kW agli oltre 2 MW.

Un generatore eolico, detto anche "aerogeneratore", è costituito da un rotore ad una o più pale posto in rotazione dall'energia cinetica del vento incidente; il

suo movimento, attraverso organi di moltiplicazione e di trasmissione meccanica, perviene ad un dispositivo generatore di energia elettrica; tale energia viene immagazzinata in un accumulatore o immessa nella rete elettrica.

Il componente principale del sistema è il rotore, costituito generalmente da un numero variabile di pale – da una a tre – fissate su un mozzo centrale, che trasformano l'energia meccanica delle masse d'aria incidenti in energia meccanica di rotazione del mozzo, che la trasferisce, infine, all'asse del generatore elettrico.

I sistemi più diffusi sono quelli con mozzo ad asse orizzontale. Un sostegno porta sulla sommità una "gondola" o navicella che contiene al suo interno: l'albero di trasmissione lento collegato al mozzo esterno alla navicella, il moltiplicatore di giri, l'albero veloce, il generatore elettrico e altri organi ausiliari come freni e limitatori di velocità.

Energia fotovoltaica

Fra le diverse tecnologie messe a punto per lo sfruttamento dell'energia solare, quella fotovoltaica è la più innovativa e promettente, a medio e lungo termine, in virtù delle sue caratteristiche di modularità, semplicità, affidabilità, ridotte esigenze di manutenzione, progresso tecnologico prevedibile.

Il processo di conversione fotovoltaica (FV) si basa sulla proprietà di alcuni materiali semiconduttori opportunamente trattati, come il silicio, di generare energia elettrica quando vengono esposti alla radiazione solare. La conversione della radiazione solare avviene nella cella fotovoltaica (un sandwich costituito da due lamine di materiale semiconduttore drogato da impurità di tipo diverso), con un rendimento del 13-17%. L'insieme di un numero adegua-



to di celle collegate elettricamente in serie forma un modulo fotovoltaico, componente elementare dei sistemi fotovoltaici; più moduli collegati in serie o in parallelo sono in grado di fornire la potenza richiesta dalle diverse applicazioni.

Energia da biomasse

La biomassa utilizzabile ai fini energetici consiste in tutti quei materiali organici che possono essere trasformati in combustibili solidi, liquidi o gassosi. Essa è costituita dalla materia organica, prevalentemente vegetale, sia spontanea che coltivata dall'uomo, prodotta per effetto del processo di fotosintesi clorofilliana con l'apporto dell'energia associata alla radiazione solare, di acqua e di svariate sostanze nutritive.

Le biomasse possono, quindi, essere costituite da: residui delle coltivazioni destinate all'alimentazione umana o animale (paglia di cereali, residui di patata, etc.), o piante espressamente coltivate per scopi energetici e alimentari insieme (piante zuccherine, piante ricche di

amidi, etc.). Altri importanti fonti di biomassa sono: residui dal campo forestale, scarti di attività industriali come i trucioli di legno, scarti delle aziende zootecniche o i rifiuti urbani. Le biomasse, a seconda del tipo e della composizione, possono essere bruciate per fornire calore, convertite in combustibile (metano, etanolo, metanolo, prodotti carboniosi) mediante l'impiego di microrganismi o l'azione di elevate temperature o di agenti chimici, oppure possono essere usate per la generazione di energia elettrica.

Un interessante combustibile derivato da biomassa è il biodiesel, utile per alimentare i motori diesel appunto. Pur costando tre volte il gasolio (sono però previste riduzioni dei costi a breve termine) è associabile a notevoli vantaggi sanitari e ambientali per le ridottissime emissioni nocive e la sua biodegradabilità. Ovviamente la biomassa quale combustibile per la generazione di elettricità sarà competitiva con la produzione tradizionale solo dove essa è abbondante e a buon mercato.



Figura 5.2
Impianto dimostrativo
"JOULE" per
gassificazione
delle biomasse (presso
Centro ENEA Trisaia)



Energia solare termica

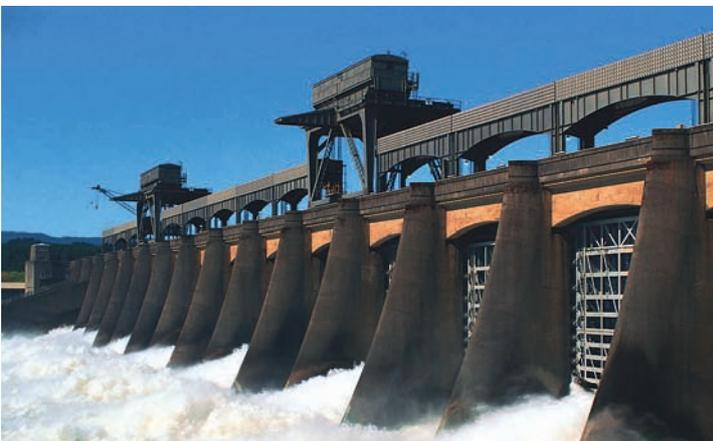
Comprende i sistemi che raccolgono e utilizzano l'energia del sole ricorrendo a dispositivi idonei alla concentrazione e accumulo dell'energia associata alla radiazione solare, cioè ad un collettore.

L'energia raccolta viene utilizzata per riscaldare un liquido o l'aria con lo scopo di utilizzare il calore solare per produrre acqua calda, riscaldare edifici e altre applicazioni particolari (ad es. l'essiccazione del foraggio, la deumidificazione di ambienti ad occupazione saltuaria, etc.).



Energia geotermica

È l'energia termica presente nelle rocce e nei fluidi all'interno della crosta terrestre. Di norma essa si trova in forma dispersa a profondità troppo elevate per poter essere sfruttata industrialmente: bisogna, quindi, per una sua utilizzazione pratica, individuare le zone in cui essa si trova a profondità economicamente accessibili. Una volta estratta è usata direttamente per il riscaldamento o per alimentare processi industriali, oppure convertita in elettricità. Oltre ai sistemi in corso di sfruttamento, che utilizzano vapore e acqua, sono allo studio nuove tecnologie per convertire l'energia contenuta nei magmi e nelle rocce calde secche.



Energia idraulica

L'energia idroelettrica sfrutta il ciclo dell'acqua alimentato a sua volta dall'irraggiamento solare.

L'energia cinetica delle cadute d'acqua viene, tramite turbine idrauliche, convertita in energia elettrica od utilizzata sotto forma di energia meccanica. Le tecnologie per lo sfruttamento di questa fonte sono sviluppate e affidabili, e si possono riferire a grandi o a piccoli impianti, ad acqua fluente o da serbatoi o bacini.



Energia dal mare

In linea di principio si può pensare di convertire almeno quattro tipi di energia presenti nel mare: dalle correnti, dalle onde, dalle maree, dal gradiente termico tra fondali e superficie. Attualmente esiste in Francia un impianto per sfruttare le maree, mentre sono in corso esperimenti per lo sfruttamento del potenziale energetico delle onde (Inghilterra e Giappone) e del gradiente termico e di salinità (Stati Uniti). Nel Mediterraneo questa fonte non rap-

presenta un potenziale reale, in quanto l'energia immagazzinata è enorme ma anche molto diffusa e quindi di difficile estrazione. Sono attualmente in corso studi di fattibilità, nell'ambito dei programmi di ricerca europei, volti a verificare la possibilità di utilizzare le correnti marine in prossimità delle coste.

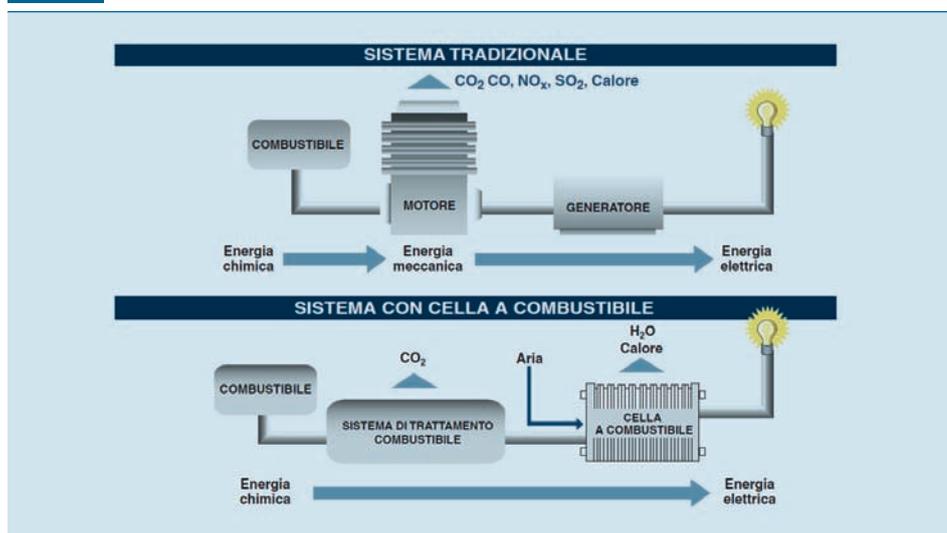
Idrogeno e fuel cell

L'idrogeno possiede caratteristiche che lo rendono un vettore energetico² ideale per lo sviluppo di un sistema energetico sostenibile, in quanto:

- il suo impatto ambientale è quasi nullo, infatti esso bruciando in aria produce acqua, secondo la reazione: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} + \text{calore}$;
- è producibile da più fonti energetiche primarie (fossili, rinnovabili, nucleare), tra loro intercambiabili e disponibili su larga scala, anche in futuro;
- può essere distribuito in rete abbastanza agevolmente compatibilmente con gli usi finali e con lo sviluppo delle tecnologie di trasporto e di stoccaggio;

Fig. 5.3

Energia e celle a combustibile



2. Vettore energetico: tutto ciò da cui si può ricavare energia utile mediante conversione di fonti energetiche primarie quali: carbone, elettricità, benzina, ecc.

Lo strumento che condiziona pesantemente la reale affermazione dell'idrogeno come vettore energetico pulito è senza dubbio la "cella a combustibile", o fuel cell, cioè un dispositivo elettrochimico che converte direttamente l'energia di un combustibile in elettricità e calore senza passare attraverso cicli termici, secondo la reazione: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{elettricità} + \text{calore}$ (fig. 5.3).

In sostanza funziona in modo analogo ad una batteria, in quanto produce energia elettrica attraverso un processo elettrochimico, ma a differenza di quest'ultima, consuma sostanze provenienti dall'esterno ed è quindi in grado di funzionare senza interruzioni, finché al sistema viene fornito combustibile e ossidante (idrogeno e ossigeno).



Capitolo Sei



Esternalità delle fonti energetiche

Uno dei problemi fondamentali che ci si trova di fronte in una valutazione comparativa delle fonti energetiche è riassumibile in questo modo: posto che l'uso delle differenti fonti comporta impatti molto differenti sull'ambiente (inteso in senso ampio: salute umana, ecosistemi, paesaggio, e così via), in quale misura si deve e si può tener conto di tali impatti nella definizione di una scala di preferibilità tra le fonti e, in termini più ampi, della politica energetica? Come attribuire uno specifico valore economico ad una maggiore preservazione ambientale?

Sulla base di queste domande, la problematica delle esternalità costituisce un aspetto essenziale nell'analisi valutativa delle fonti rinnovabili in un'ottica di integrazione tra l'aspetto economico e quello ambientale.



Le esternalità – specialmente nel campo della produzione energetica – possono risultare infatti determinanti al fine di ottenere, nelle necessarie scelte strategiche di breve e lungo periodo, un equilibrio tra efficienza economica e compatibilità ambientale.

[6.1]

Esternalità: concetto teorico e quadro d'insieme

Dal punto di vista teorico e in termini generali le esternalità possono essere definite come gli effetti (vantaggiosi o svantaggiosi) che, pur palesemente provocati da un'attività di produzione e/o di consumo su altre attività di produzione e/o di consumo o sul benessere sociale, non si riflettono nei prezzi pagati o ricevuti.

Come afferma Pearce³, una esternalità esiste se si verificano due condizioni:

1. un impatto, negativo o positivo, viene generato da un'attività economica e imposto a terze parti.
2. l'impatto non ha un prezzo sul mercato, per cui se l'effetto è negativo chi genera l'esternalità non paga un com-

3. D. Pearce, *Energy Policy and Externalities: An Overview*, Workshop on Energy Policy and Externalities: the Life Cycle Analysis Approach, Paris, November 15-16, 2001.

penso a chi la subisce, mentre per esternalità positive chi la genera non può appropriarsi del guadagno di chi ne beneficia.

La mancanza di obblighi di risarcimento per i danni apportati o di pagamento per i vantaggi ricevuti è semplicemente dovuta ad una carenza nella definizione esistente dei diritti di proprietà, tanto che, secondo il noto teorema di Coase, la semplice attribuzione di tali diritti ad una qualsiasi delle parti coinvolte – non importa quale – renderebbe perfettamente inutile ogni altro possibile intervento correttivo da parte del *policy maker*.

Nel caso particolare del settore energetico le esternalità assumono, di norma, tipicamente la forma di danni – nella duplice forma di danni apportati o danni evitati – connessi direttamente o indirettamente alla produzione di energia dalle varie fonti. Per danni vanno intesi congiuntamente due tipi di effetti: in primo luogo l'impatto fisico dell'inquinamento (di tipo sanitario, chimico, biologico ecc.), in secondo luogo la reazione umana all'impatto fisico in termini di perdita di benessere.

Qualora queste esternalità negative, previamente individuate e quindi tradotte in termini monetari, fossero aggiunte a quelli considerati normalmente come costi effettivi, potrebbero sensibilmente modificare la scala di preferibilità delle varie fonti energetiche e le conseguenti scelte di investimento.

In chiave economica il problema di fondo del rapporto tra produzione (in questo caso di energia) e ambiente diviene allora non tanto quello di ridurre o eliminare l'inquinamento, giacché questo è intrinsecamente connesso a qualsiasi processo produttivo, bensì di limitarlo ad un livello efficiente, laddove, con tale espressione,

intendiamo un grado di inquinamento complessivo al di sopra del quale l'impatto dannoso che ne deriva, espresso in termini monetari, si mantiene superiore al costo che occorrerebbe sostenere per ridurlo ulteriormente, e al di sotto del quale accade esattamente l'inverso (impatto inferiore al costo).

L'inquinamento efficiente è pertanto quello in corrispondenza del quale si eguagliano il danno (monetario) marginale e il costo marginale.

Questo concetto di efficienza economico-ambientale, per quanto banale, costituisce in realtà esattamente lo scoglio su cui normalmente si infrangono le analisi di preferibilità delle fonti rinnovabili rispetto a quelle convenzionali.

In genere, infatti, si tende a considerare esclusivamente i costi ma non i benefici marginali di una sostituzione delle prime alle seconde. Inoltre è tutt'altro che scontato il tentativo di identificare un livello efficiente di inquinamento, che spesso si decide semplicemente di limitare al livello di standard collegati a criteri non economici (ad esempio sanitari) da perseguire con strumenti economici quali tasse e permessi.

L'uso di questi strumenti può contribuire ad ottenere nel modo più efficiente il conseguimento dello standard, ferma restando, però, la probabile inefficienza intrinseca di quest'ultimo.

Tuttavia, anche nel caso in cui si rinunci alla fissazione discrezionale di uno standard e si accetti l'obiettivo dell'efficienza economico-ambientale, cercando di individuare un livello di "inquinamento ottimo" sorge immediatamente la necessità di conoscere costi e benefici potenziali: queste informazioni sono contenute rispettivamente in funzioni dei costi ambientali (esterni), e

in funzioni di profitto (costi interni, ricavi) e/o dei costi di abbattimento relativi ai soggetti produttivi.

[6.2]

La problematica della valutazione economica delle esternalità

Il problema su cui concentreremo l'attenzione è essenzialmente la valutazione monetaria delle esternalità, in quanto rappresenta il nodo cruciale ai fini di ogni analisi comparativa tra differenti fonti energetiche.

Per ottenere una valutazione economica delle esternalità (positive o negative che siano) occorre ricondurle nell'alveo degli stessi criteri di valutazione che il mercato normalmente adopera per la valutazione dei beni.

Concetti di valore dell'ambiente: il "valore d'uso" e il "valore di esistenza"

Per poter attribuire un valore alla tutela dell'ambiente occorre innanzitutto specificare tutte le possibili forme in cui questa può articolarsi.

Le tipologie di valore attribuibili alla preservazione ambientale possono essere schematizzate come segue:

1. valore d'uso, distinto in:
 - a) diretto
 - b) indiretto, a sua volta articolato in:
 - b.1) valore d'opzione
 - b.2) valore di quasi-opzione
2. valore d'esistenza

Il valore d'uso diretto

Nel valore d'uso diretto va ricompreso tutto ciò che contribuisce in qualche

modo a mantenere direttamente un certo standard di qualità della vita in senso ampio, nonché tutte le attività che possono conseguire (a rilevanza economica o meno: turistiche, ludiche, sportive).

Questo tipo di valore d'uso rappresenta in un certo senso il cuore del concetto di esternalità positiva. Ad esempio: i benefici alla salute arrecati a una collettività dal minor inquinamento atmosferico indotto da una fonte rispetto a un'altra rientrano esattamente nel valore d'uso dell'ambiente, così come quelli derivanti dalla possibilità che l'uso di una fonte – sempre rispetto a un'altra – consenta o meno di mantenere un afflusso turistico basato su salubrità e bellezza del luogo, genuinità dei prodotti agricoli; afflusso che sarebbe ridotto o assente nella misura in cui quelle qualità fossero compromesse da forme di inquinamento.

La disponibilità a pagare e ad accettare

La misura monetaria del valore d'uso diretto è data dalla disponibilità a pagare (DAP) per ottenere il beneficio o per evitare un danno, o – viceversa – dalla disponibilità ad accettare (DAC) un indennizzo per rinunciare a un beneficio o per sopportare un danno.

Poiché nel caso della produzione energetica il caso normale è quello di esternalità negative, ci si dovrà riferire alla DAP per evitare tali esternalità oppure alla DAC per sopportarle.

Precisiamo innanzitutto che, proprio perché si parla di termini monetari, occorre riferirsi a una misura monetaria della domanda effettiva in cui i consumatori concretizzano le proprie preferenze. L'esistenza di un valore d'uso si associa inscindibilmente a quella di una disponi-

bilità a pagare o ad essere risarciti, e queste disponibilità, a loro volta, rivelano una preferenza esplicita del consumatore.

Per giungere a quantificare le esternalità è essenziale sottolineare che non tutto il valore attribuito ad un bene intangibile (come l'ambiente) viene di norma manifestato: molti individui sarebbero in realtà disposti a pagare per il suo mantenimento una cifra superiore rispetto a quella espressa dai prezzi di mercato che, per loro natura, sono unici e validi per tutti. Soltanto la parte effettivamente espressa dà luogo ad una domanda e ad una corrispondente spesa, e come tale viene del tutto registrata dal mercato.

Ad esempio: l'integrità del territorio di un parco ha un valore d'uso indicato dal fatto che i turisti sono disposti a spendere per il solo fatto di raggiungerlo, visitarlo e eventualmente soggiornarvi.

L'eventuale deterioramento del bene, dovuto ad esempio all'installazione di un parco eolico, darebbe immediatamente luogo a una minor domanda e ad una minore spesa, che verrebbe immediatamente registrata dal mercato: se il parco venisse distrutto non sussisterebbero più le spese di trasferimento e di soggiorno. Tuttavia il mercato spesso non è in grado di intercettare, registrare e quantificare l'intera DAP, che rischia quindi di risultare sottostimata e di non esaurire l'intero valore d'uso.

Il concetto intrinseco di esternalità richiede, pertanto, di quantificare la parte di DAP che rimane inespressa e che non viene registrata dal mercato.

Spesso, ma non sempre, l'emersione di questa DAP avviene solo quando la disponibilità del bene viene (o rischia di essere) pregiudicata. Ad esempio, la purezza dell'aria di un certo sito assume un valo-

re d'uso nel momento in cui viene riconosciuto un indennizzo in cambio dell'assenso ad ospitare una centrale elettrica inquinante. Ancora, una certa temperatura e umidità dell'aria assumono un valore d'uso nel momento in cui vengono meno e la collettività è disposta a spendere nell'acquisto di condizionatori pur di mantenerle e poterne quindi godere.

La possibile compromissione del parco (esempio precedente) farebbe probabilmente emergere una specifica disponibilità a pagare per il suo mantenimento, del tutto autonoma e addizionale rispetto alle spese effettuate per goderne.

Analogamente un pescatore normalmente valuta la tutela di un fiume più di quanto egli in concreto spende per raggiungerlo, dotarsi della licenza, e esercitare la pesca (spese di mercato la cui somma costituisce la DAP), ma questo valore resta inespresso rispetto alla DAP finché la tutela non viene messa in discussione, ad esempio dalla costruzione di una centrale le cui acque di raffreddamento rischierebbero di alterare l'ecosistema fluviale.

Si può pertanto affermare che l'individuo e la società ricevono dalla tutela del bene ambiente un beneficio effettivo superiore rispetto alla DAP o alla DAC dichiarate e valide per tutti: si tratta del cosiddetto surplus del consumatore (SC), che va sommato al valore di mercato della DAP o della DAC per ottenere l'effettivo costo sociale di un impatto sull'ambiente. In particolare, per precisione, il surplus rilevante nella definizione delle esternalità è quello atteso $E(SC)$, in quanto le valutazioni e le decisioni vengono effettuate sulla base di ciò che ci si attende circa i possibili danni futuri.

Il valore aggiuntivo attribuito alla tutela risiede essenzialmente nel benessere

(qualità della vita) che deriva dalla valenza ludica della possibilità di esercitare la pesca e soprattutto di poter continuare a farlo nel futuro. In sostanza, la DAP o la DAC lorde, comprensive cioè del surplus atteso e espresse in termini monetari, rappresentano il valore (il prezzo) attribuito dall'individuo al bene-ambiente che rischia di venire pregiudicato. Se la DAP o la DAC lorde sono riferite all'intera collettività, esprimono il valore sociale attribuito all'ambiente.

Associando a ciascun livello dell'impatto ambientale il corrispondente valore monetario della DAP o della DAC espresse dalla società per preservarlo, si ottiene la curva dei costi sociali che rappresenta, insieme con quella dei benefici privati, l'informazione necessaria per determinare il livello economicamente ottimo delle esternalità negative.

All'interno della DAP il beneficio connesso al valore d'uso diretto è identificabile con il surplus atteso $E(SC)$: ciò in quanto la definizione stessa di esternalità richiede di sottrarre alla DAP lorda ogni forma di spesa che venga già effettivamente registrata dal mercato.

Il valore d'uso indiretto

Il valore d'uso indiretto prescinde invece del tutto dal godimento presente e immediato dei benefici dell'ambiente, e concerne specificamente la reversibilità dell'impatto provocato sul medesimo: la preservazione attuale non implica necessariamente che essa sia (o debba essere) mantenuta anche nel futuro, lasciando aperta l'opzione a se stessi e alle generazioni future se sfruttare l'ambiente o meno.

Questo rappresenta – nell'ambito del valore d'uso indiretto – il cosiddetto valore d'opzione in cui gioca un ruolo chiave

la variabile dell'incertezza, cui si aggiunge un concetto leggermente diverso di valore d'uso indiretto, quello definito di quasi-opzione, associato al mantenere aperte possibili opzioni future in seguito all'incertezza circa gli sviluppi della conoscenza.

Nel determinare il valore di quasi-opzione, in sostanza, si attribuisce un valore alla preservazione ambientale specificamente perché il futuro ampliamento delle conoscenze potrebbe renderne possibili usi del tutto inesplorati e sconosciuti al momento presente.

L'evidenza empirica mostra che il valore d'uso indiretto (di opzione e eventualmente di quasi-opzione) rappresenta una forma del tutto autonoma di valore attribuito all'ambiente: in termini monetari esso indica quanto un individuo avverso al rischio è disposto a spendere in più per assicurarsi anche in futuro la disponibilità di un bene intangibile.

Sia il segno sia l'entità di questo valore dipendono in modo essenziale:

- dall'incertezza futura relativa alla disponibilità del bene-ambiente,
- dall'incertezza futura relativa allo stesso individuo in merito alle preferenze e al reddito,
- dal grado di avversione al rischio dell'individuo.

In generale si suppone che il valore di opzione attribuito all'ambiente sia positivo, ossia che l'individuo presenti una specifica disponibilità a pagare per assicurarsi la disponibilità del bene ambientale anche in futuro.

Il valore d'uso totale

Il valore d'uso totale può essere considerato come la somma dei valori d'uso diretto e indiretto ed è espresso in termini monetari dalla disponibilità totale a

pagare, che possiamo definire prezzo di opzione (PO), pari alla somma del surplus atteso del consumatore e del valore di opzione:

$$PO = E(SC) + VO$$

con: $E(SC) > 0$, VO positivo, nullo o negativo.

In VO può esservi compreso il valore di quasi-opzione (VQO) che, come descritto in precedenza, è normalmente positivo. Ne risulta che sarà sottostimata ogni quantificazione di un'esternalità basata sul solo valore d'uso diretto futuro in presenza di un valore d'opzione positivo, ossia sull'eguaglianza:

$$PO = E(SC) \text{ ogniqualvolta } VO > 0.$$

Il "valore di esistenza"

Infine, accanto al valore d'uso (diretto e indiretto) della preservazione ambientale, si può individuare un valore intrinseco, definito di esistenza che prescinde da ogni motivazione connessa al godimento proprio – presente o futuro – o delle generazioni successive. In questo caso il valore non deriva da alcun beneficio né diretto né indiretto. Si tratta di un valore attribuito all'ambiente in quanto tale e alla sua tutela da ogni processo distruttivo, valore su cui oggi si hanno le maggiori controversie per il semplice fatto che a differenza del valore d'uso non offre occasioni per poter misurare in modo oggettivo – seppur convenzionale – un'effettiva disponibilità a pagare, generando dunque difficoltà ulteriori nel quantificare il valore economico delle esternalità ambientali.

La somma del valore d'uso totale (diretto e indiretto) e del valore di esistenza fornisce convenzionalmente il valore economico totale dell'ambiente.

Calcolo delle esternalità: la metodologia ExternE

La letteratura economica incentrata sulle metodologie per la valutazione economica delle esternalità ambientali affonda le sue origini fin nella seconda metà del secolo scorso, tuttavia l'applicazione empirica e soprattutto organica di tali metodologie è abbastanza recente.

Le esternalità connesse alla produzione energetica possono essere schematizzate sotto una duplice discriminante.

La prima è il grado di incidenza sull'impatto complessivo, in base alla quale le esternalità sono raggruppabili in due principali categorie: i danni alla salute e il contributo all'effetto serra.

La seconda è il carattere locale o globale, in base a cui si può distinguere fra impatto a largo raggio (planetario o almeno transfrontaliero, come rispettivamente il global warming e il fenomeno delle piogge acide) e in un ambito locale o regionale (come ad esempio le concentrazioni di polveri sottili e le relative conseguenze).

Occorre precisare che in realtà gli effetti connessi al riscaldamento globale sono impatti in gran parte analoghi a quelli che si producono a livello locale, sebbene l'analogia sostanziale degli effetti abbia differenti cause fisiche (l'alterazione climatica anziché l'inquinamento convenzionale) e modalità. In pratica, quindi, gli impatti del *global warming* rappresentano spesso una versione delocalizzata di esternalità a corto raggio dovute a inquinamento convenzionale.

Il motivo di una valutazione separata risiede allora nel maggior grado di incertezza da cui sono gravati gli effetti connessi al riscaldamento globale: si tratta di individuare, a ritroso, quanta parte del riscalda-

Tabella 6.1
Una valutazione economica
delle Esternalità

	Effetti locali e regionali	Effetti globali (emissione di CO ₂)	Costi esterni totali
	c€/kWh	c€/kWh	c€/kWh
Gas Naturale (CC*)	0,6	1,14	1,74
Gas Naturale (TV**)	0,77	1,5	2,27
Prodotti Petroliferi (TV)	2,07	2,17	4,24
Carbone (TV)	2,58	2,89	5,47
Grande Idroelettrico	0,36	0	0,36
Mini Idroelettrico	0,26	0	0,26
Eolico	0,15	0	0,15
Fotovoltaico	0,15	0	0,15
Geotermico	0,15	1,34	1,49
Biomasse	1,19	0	1,19
RSU (TV)	1,24	1,6	2,84
Biogas	0	0	0

* Impianti a ciclo combinato

** Impianti con turbina a vapore

Fonte: European Commission – FG XII, *The National Implementation in the EU of the ExternE accounting framework, Final Report (1997)*.

mento sia ascrivibile alla produzione energetica, quanta alle singole fonti, e quanta imputabile al singolo impianto. È intuibile che la labilità delle stime diviene allora tale da rendere necessario il ricorso a

parametri e valutazioni standardizzate, ossia l'abbandono dell'approccio *bottom-up* con cui normalmente vengono valutate le specifiche esternalità locali e il passaggio ad un approccio *top-down*.





Le fonti rinnovabili di energia

Capitolo **Sette**



Perché le fonti rinnovabili

[7.1]

Energia e attività antropiche

La Terra riceve dal Sole un flusso ininterrotto di energia, che alimenta i processi vitali, animali e vegetali, contribuendo all'equilibrio dinamico degli stessi.

L'energia, nelle sue varie forme, è disponibile in natura racchiusa nelle fonti energetiche, classificate in primarie e secondarie.

- Le *fonti energetiche primarie* sono quelle esistenti in natura come il carbone, il petrolio, il gas naturale, ecc.
- Le *fonti energetiche secondarie* derivano dalla trasformazione di altre fonti primarie o secondarie: benzina o gasolio dal petrolio, energia elettrica generata nelle centrali termoelettriche a partire da altre fonti, ecc. Fa eccezione, per convenzione, l'energia elettrica di origine idro-geotermica o nucleare, poiché tali fonti primarie non hanno altra possibilità di utilizzo se non quella che deriva dalla loro trasformazione in elettricità.

Attualmente l'uomo utilizza in gran parte energia nella sua forma termica. Soltanto di recente si è accostato ad altre forme derivate dalla conversione dell'energia solare.

L'energia, ovvero la capacità di un corpo o di una sostanza di compiere lavoro, può manifestarsi/trasformarsi in modi differenti:

- *energia termica*, che deriva dal processo di combustione, cioè dalla reazione chimica tra una sostanza combustibile e l'ossigeno presente nell'aria (la reazione chimica più sfruttata è quella del carbonio con l'ossigeno a formare anidride carbonica);
- *energia meccanica*, connessa, ad esempio, al movimento di una turbina;
- *energia elettrica*, prodotta dall'alternatore azionato dalla turbina;
- *energia chimica*, liberata da certe sostanze mediante reazioni chimiche;
- *energia nucleare*, associata a reazioni di fissione nucleare;
- *energia eolica*, legata alle masse d'aria in movimento sulla superficie del pianeta;
- *energia solare*, captata direttamente dalla radiazione solare e trasformata in energia termica od elettrica.

L'uomo fa uso di energia in due modi diversi ma concorrenti ad elevare il suo benessere e la qualità del suo vivere: da una parte essa è direttamente consumata per soddisfare alcune indispensabili esigenze, dall'altra è un fattore essenziale dei processi produttivi delle fabbriche che producono beni di consumo: utilizziamo, infatti, strumenti che abbisognano di energia. La qualità della vita è migliorata grazie anche ai dispositivi destinati alla mobilità individuale o collettiva, che sfruttano l'energia derivata dagli idrocarburi. Il lavoro domestico, poi, è stato alleviato da un

uso sempre più esteso degli elettrodomestici azionati dall'energia elettrica, e così via per tanti altri aspetti della vita di tutti i giorni. In definitiva, l'uomo ha migliorato enormemente i propri standard di vita e di benessere grazie alla possibilità di disporre di grandi quantità di energia a costi relativamente bassi.

Lo sfruttamento delle risorse naturali

L'utilizzo, spesso nella forma dell'ipersfruttamento, delle fonti che contribuiscono al benessere individuale e collettivo, producono diversi effetti.

Sappiamo che l'energia solare assorbita dalla Terra e dall'atmosfera determina i grandi cicli delle correnti oceaniche e della climatologia atmosferica. L'energia solare, infatti, è il motore che, attraverso il fenomeno dell'evaporazione di grandi masse oceaniche, e successive precipitazioni, alimenta i cicli vitali degli organismi nelle terre emerse. Inoltre, l'energia solare viene trasformata dalle piante tramite la fotosintesi per fornire, direttamente e indirettamente, energia per la crescita degli organismi vegetali e in definitiva di quelli animali.

Lo sfruttamento delle risorse naturali, aventi origine diretta o indiretta dal Sole, è stato oggetto di interesse già a partire dall'antichità, quando l'uomo cominciò a radunarsi in gruppi sociali sempre più ampi, portando alla nascita di quelle comunità odierne che sono le città.

In questo modo prese avvio lo sfruttamento delle risorse naturali, quali ad esempio i fiumi che, riempiti dall'acqua che trae origine dal ciclo idrologico, diventarono vie di trasporto e luoghi di sviluppo per le grandi città. Così come la potenza del vento venne utilizzata per macinare il grano nei grandi mulini a vento e per alimentare le vele delle navi per trasportare, attraverso gli oceani, colonizza-

tori e materiali per il commercio, diffondendo la civiltà.

L'uomo scoprì, poi, che l'acqua che cadeva sulle ruote idrauliche poteva fornire energia elettrica, mentre l'energia solare rilasciata dalla combustione della legna, poteva trasformare l'acqua in vapore, incentivando fortemente il progresso dell'industria e dei trasporti, e fornendo agli uomini un caldo confortevole nelle case e negli edifici.

Conseguenze delle attività antropiche

Nella seconda metà dell'ottocento cominciò l'utilizzo su larga scala del carbone, e contemporaneamente vennero scoperte le possibilità di utilizzo del petrolio, il cui uso rimase comunque marginale fino all'inizio del XX secolo.

La convenienza del carbone e, successivamente, quella del petrolio e del gas (tutte fonti primarie fossili), è stata la causa che ha contribuito in maniera determinante all'abbandono di quelle pratiche costruttive oggi note sotto il nome di solare passivo, quindi dell'utilizzo durante il giorno della luce solare e di altre caratteristiche di progettazione architettonica eco-compatibile negli edifici.

L'utilizzo delle fonti fossili porta inevitabilmente al massiccio incremento dell'emissione in atmosfera di quelli che vengono definiti gas serra, con conseguente alterazione del clima a livello globale.

Bisogna, tuttavia, fare alcune precisazioni. È bene ricordare che l'effetto serra è un processo naturale esistito sul nostro pianeta fin da quando esso ha cominciato a possedere un'atmosfera. È questo effetto serra naturale che ha consentito al nostro pianeta di diventare abitabile nel modo che noi conosciamo.

Consideriamo le condizioni generate dalla mancanza di tale effetto: la temperatura della Terra è determinata da un bilancio

energetico che vede da una parte l'energia ricevuta dal Sole, sotto forma di radiazione elettromagnetica, dall'altra la radiazione che la superficie del pianeta riemette verso lo spazio (ancora sotto forma di radiazione elettromagnetica: in questo caso si tratta di radiazione infrarossa). La temperatura del pianeta risultante dal bilancio dovrebbe essere di molti gradi sotto lo zero.

La presenza dell'atmosfera, e dell'alterazione del bilancio energetico di cui sopra, sposta l'equilibrio verso una temperatura media più alta e permette la vita (15,5 °C). L'atmosfera, infatti, parzialmente trasparente alla radiazione solare, assorbe, grazie soprattutto alla presenza del vapore acqueo e dell'anidride carbonica, la radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre, rimandandone indietro soltanto una parte. Questo processo è chiamato "effetto serra" perché è simile a quello che si ottiene in agricoltura quando il terreno viene coperto con strutture di vetro o di plastica (le cosiddette "serre") trasparenti alla luce solare, tuttavia in grado di intercettare e contenere una parte della radiazione infrarossa emessa dal suolo.

Ora, è la modifica della composizione dell'atmosfera, con l'aumentare o il diminuire della concentrazione di anidride carbonica (CO₂) o di altri gas "serra", che modifica l'effetto serra naturale, e altera il bilancio energetico del pianeta (v. anche paragrafo 1.3).

Se confrontiamo i dati disponibili, attuali e precedenti, si osserva che la concentrazione di questo gas nell'atmosfera ha iniziato ad aumentare a partire dalla prima rivoluzione industriale. In particolare in Inghilterra alla fine del Settecento, dove ha preso l'avvio il fenomeno dell'industrializzazione.

Inizialmente la concentrazione era di circa 260 ppm, mentre attualmente, poco più di

duecento anni dopo, è di circa 370 ppm. Sebbene, come sappiamo, alcuni autori sostengono che l'aumento della concentrazione di gas serra sia un fenomeno naturale, da studi sempre più numerosi e approfonditi si evince che l'intensità e l'estensione delle attività umane stanno cominciando ad interferire pesantemente con i cicli naturali (ossigeno, carbonio, azoto) dell'intero pianeta, e l'equilibrio dell'ecosistema naturale, stabilitosi attraverso un processo evolutivo e di adattamento delle specie umane, animali e vegetali e durato centinaia di milioni di anni, si sta alterando in maniera preoccupante, evolvendo verso configurazioni forse incompatibili con la vita (gli organismi viventi non riescono a tener dietro perché hanno bisogno di periodi di adattamento evolutivo molto più lunghi).

[7.2] Le fonti energetiche rinnovabili

Gli uomini utilizzano in gran parte l'energia proveniente dal Sole. La maggior parte delle volte, tuttavia, si utilizzano i combustibili fossili in modo dissoluto e sconsiderato, come se fossero inesauribili. Al contrario, i combustibili fossili si stanno esaurendo e non possono essere sostituiti in un breve lasso di tempo.

Le attività di accertamento della disponibilità di fonti energetiche ancora disponibili sul nostro pianeta forniscono indicazioni in continua evoluzione. Le stime riguardo le varie fonti fossili sono soggette a continui aggiornamenti in relazione alla scoperta di nuovi giacimenti.

Dopo la crisi petrolifera del 1973, molti preannunciavano l'esaurimento delle riserve mondiali di petrolio greggio. In effetti le riserve accertate nel 1976 ammontavano a 88 Gt ma già nel 1999

erano cresciute a 141 Gt. Mentre le riserve ancora disponibili nel 2004 venivano valutate in 162 Gt di petrolio.

Per ciò che concerne la durata di queste riserve di petrolio e altre fonti (gas naturale e carbone, tornato recentemente in auge), essa è ovviamente legata all'intensità dei consumi, e quindi dei comportamenti che adotteremo.

Al livello dei consumi attuali le riserve di petrolio si stima potrebbero durare ancora per circa 40 anni.

Esiste una soluzione prontamente disponibile, almeno a "dare una mano" alla richiesta delle enormi quantità di energia da parte del genere umano: *le fonti rinnovabili di energia*.

Queste fonti non inquinano e sono virtualmente inesauribili, inoltre funzionano in armonia permanente con i sistemi fisici e ecologici della Terra e creano nuove forme di lavoro e nuove industrie senza spese per combustibili. Infine, contribuiscono all'autosufficienza fisica e economica delle nazioni e sono disponibili sia per i paesi sviluppati che per quelli in via di sviluppo. L'Unione Europea mira ad aumentare l'uso delle risorse rinnovabili: nella Direttiva 2001/77/CE *Promozione dell'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili*, pone i seguenti traguardi:

- entro il 2010: soddisfare, attraverso obiettivi differenziati per ogni singolo Stato membro, il 12% del consumo interno lordo di energia attraverso l'utilizzo di fonti rinnovabili, con una quota indicativa del 22% di elettricità prodotta da fonti energetiche rinnovabili sul consumo totale di elettricità della Comunità;
- entro il 2020: coprire il 20% di energia prodotta con fonti rinnovabili, mediante un considerevole aumento di quelle più vicine al mercato (compresi i parchi eolici *off shore* e i biocarburanti di seconda generazione),

- entro il 2030, produrre energia elettrica e calore con ridotte emissioni di carbonio anche attraverso il ricorso a sistemi di cattura e stoccaggio della CO₂; adattare gradualmente i sistemi di trasporto ai biocarburanti di seconda generazione e alle celle a combustibile ad idrogeno,
- dal 2050, completare il passaggio ad un sistema energetico europeo *carbon free* attraverso l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili e l'utilizzo sostenibile del carbone, del gas e dell'idrogeno e, in prospettiva, della fissione nucleare di quarta generazione.

[7.3]

Sostenibilità dello sviluppo e fonti rinnovabili

Si parla di sostenibilità, come sappiamo, quando un'azione non comporta danneggiamento o perdita di risorse naturali, e, quindi, si svolge nel pieno rispetto dell'ambiente.

In campo energetico vengono definiti sostenibili quei modi di produrre e utilizzare le diverse forme di energia che non inquinano l'atmosfera, il suolo e le acque, e che si avvalgono delle fonti energetiche rinnovabili:

- energia solare termica,
- energia fotovoltaica,
- energia eolica,
- energia da biomassa,
- energia idroelettrica,
- geotermia.

Attualmente oltre l'80% delle risorse del pianeta viene impiegato in modo non sostenibile, consumando fonti energetiche fossili (e quindi non rinnovabili) come petrolio, gas naturale e carbone ad una velocità che supera abbondantemente quella della loro formazione, determinando un'elevata quantità di gas ad effetto serra, come l'anidride carbonica (CO₂),

con conseguenti alterazione dei cicli naturali e produzione di polveri fini e ultrafini nelle città.

Per questo motivo è necessario, pena la insostenibilità dello sviluppo, adottare, oltre alle fonti rinnovabili, strategie che comportino:

- un sicuro risparmio economico,
- un quantitativo di energia in più a disposizione,
- un minore consumo di combustibili fossili e quindi meno inquinamento sia a livello globale che a livello locale.

Per quanto riguarda il risparmio economico e la salvaguardia dell'ambiente, il settore civile è quello in cui si può agire e fare molto: secondo uno studio dell'ENEA del 2003, una famiglia media italiana potrebbe risparmiare, semplicemente usando meglio l'energia, il 40% delle spese per il riscaldamento e il 10% di quelle per gli elettrodomestici.

Il consumo di un solo chilowattora (kWh) di energia, che corrisponde a circa mezz'ora d'accensione di una stufetta o di uno scaldabagno elettrici, richiede, nelle più efficienti centrali, la combustione di circa 0,25 chilogrammi di olio combustibile e provoca l'immissione in atmosfera di 0,55 chilogrammi di CO₂.

Se si considera che la popolazione italiana ha raggiunto quasi i 60 milioni di abitanti e che l'emissione pro capite di CO₂ annua è di 7,5 tonnellate, ci si rende conto che, ai fini della sostenibilità, compreso l'aspetto energetico, è rilevante, anzi indispensabile, il contributo e l'impegno di tutti nel migliorare l'uso delle risorse naturali.

La legge Finanziaria 2007 ha introdotto, in Italia, agevolazioni fiscali per la riqualificazione energetica degli edifici.

Nell'ambito delle agevolazioni previste vi sono:

- gli interventi che permettono significative riduzioni del consumo energetico

per il riscaldamento degli edifici;

- gli interventi su finestre e infissi finalizzati alla riduzione dei consumi;
- la sostituzione di impianti di climatizzazione invernale con i più efficienti impianti dotati di caldaie a condensazioni;
- l'installazione di pannelli solari per la produzione di acqua calda.

I contributi economici incentivano investimenti diretti alla riqualificazione energetica degli edifici, che si ripagheranno ampiamente nei prossimi anni, considerato che i prezzi di tutti i derivati del petrolio e del gas metano sono destinati a notevoli aumenti già nei prossimi anni. Di conseguenza aumenteranno anche le bollette domestiche dei consumi elettrici e del riscaldamento.

[7.4]

Quali opzioni per il futuro?

Per non rinunciare agli standard di vita a cui siamo abituati occorrerà adottare politiche e strategie che tendano alla creazione di un modello di sviluppo della società umana compatibile con le risorse e l'equilibrio fisico-chimico del pianeta.

La risoluzione del rischio ambientale, come la riduzione dei gas serra, richiede un impegno politico internazionale ma anche l'innalzamento del livello di consapevolezza collettiva e individuale.

Occorre, con senso di responsabilità, pensare a una strategia per un sistema energetico accettabile sotto il profilo ambientale e economico, promuovendo al massimo, in alternativa ai combustibili fossili, il ricorso alle fonti energetiche rinnovabili e l'adozione di corrette politiche e misure per un uso razionale dell'energia.

Bisognerà, a tal fine, sviluppare nuove tecnologie che permettano di sfruttare adeguatamente l'enorme potenzialità della

risorsa solare, puntando sulla conversione diretta sul luogo stesso di consumo, e utilizzando l'idrogeno come vettore e forma di accumulo dell'intermittente fonte solare. Bisognerà cambiare radicalmente i principi tecnici su cui poggiano le nostre attuali tecnologie energetiche, basate sulle trasformazioni termodinamiche di cui sono noti i bassi rendimenti. Altro fatto fondamentale sarà il decentramento della produzione energetica, favorendo la generazione distribuita sul territorio in base alle reali esigenze dell'utenza da servire.

Per diminuire l'immissione di anidride carbonica in atmosfera e contribuire alla riduzione dell'effetto serra, bisognerà adottare strategie di minimizzazione del consumo delle fonti fossili. Mentre l'industria sviluppa autonomamente misure di razionalizzazione e risparmio energetico, così non è nei settori civile, dei trasporti e dei servizi, che vanno guidati verso l'obiettivo da organismi e strutture socialmente responsabili.

È necessario bloccare la spirale di crescita consumi-energia, cominciando con lo stabilizzare i consumi energetici dei paesi industrializzati, attraverso l'adozione di tecnologie utili a migliorare l'efficienza delle trasformazioni e degli usi finali, in primo luogo nel settore dei trasporti, attraverso strategie di ottimizzazione dei consumi, di adozione di dispositivi di riduzione delle emissioni inquinanti, di potenziamento di vecchie e nuove modalità di trasporto (car sharing, etc.).

L'aumento di efficienza nei processi produttivi, ad esempio, è strettamente correlato al processo di dematerializzazione e di diminuzione della quantità di materia e di energia adoperate per la produzione dei beni: qualsiasi attività condotta con rendimenti migliori del passato comporta l'uso di quantità inferiori di materie prime e di energia. I servizi di informazione, le

tecnologie informatiche dematerializzano il lavoro e molte delle attività umane: cavi telefonici, personal computer, fax, sistemi video, sostituiscono, con notevoli vantaggi di risparmio di beni, gli spostamenti di persone, l'archiviazione di dati e documenti, l'utilizzo di ore-lavoro per ottenere gli stessi servizi e prestazioni.

Questi processi sono già in atto nei paesi industrialmente più sviluppati, dove negli ultimi anni è notevolmente diminuito il contenuto in materia e energia dei beni prodotti; lo stesso non avviene ancora in quelli in via di sviluppo, dove, sotto la responsabilità dei primi e nell'interesse comune, ci si aspetterebbe il trasferimento degli sviluppi tecnologici produttivi e di organizzazione della società già sviluppati.

Le conoscenze scientifiche acquisite e quelle in corso di acquisizione, le tecnologie disponibili e quelle in via di sviluppo e già previste, i modelli di sviluppo in corso di messa a punto sulla base della recente presa di coscienza delle problematiche socio-ambientali poste da questi modelli, se adeguatamente inquadrati e finalizzati, saranno quasi certamente in grado di scongiurare i possibili limiti alla crescita sociale e economica dell'umanità.

Per non rinunciare agli standard di vita a cui siamo abituati occorrerà adottare politiche e strategie che tendano alla creazione di un modello di sviluppo compatibile con le risorse e l'equilibrio fisico-chimico del pianeta.

Occorre promuovere, in alternativa ai combustibili fossili, il ricorso alle fonti energetiche rinnovabili e a misure per un uso razionale dell'energia.

L'energia elettrica, in particolare, prodotta nelle centrali termoelettriche a partire dai combustibili fossili, vede: perdite di energia nella conversione dall'energia chimica del combustibile fossile a quella elettrica, perdite nella trasmissione e distribuzione puntuale, problemi di inqui-

namento ambientale e elettromagnetico. L'energia elettrica potrebbe essere prodotta da tecnologie che attingono, in alternativa ai combustibili fossili, direttamente all'energia solare, alle fonti rinnovabili, cui non sono associati gli inconvenienti di cui sopra.

Sino ad ora è prevalsa la logica dei macroimpianti per la produzione di energia, caratterizzati da una forte centralizzazione dei sistemi di produzione; questi hanno predominato poiché si riteneva che gli impianti piccoli e decentrati fossero tecnicamente difficili da gestire e economicamente svantaggiosi. Ora le tecnologie rinnovabili, in particolare quella solare, hanno reso disponibili impianti di piccole dimensioni, a costi competitivi e con una notevole riduzione delle emissioni.

I vantaggi del decentramento produttivo, attraverso una "generazione energetica diffusa" con una rete di piccoli dispositivi sono numerosi e evidenti: minore stress per la rete distributiva, minori rischi di black-out, maggiore versatilità di impiego e modularità, maggiore velocità di messa in opera, maggiore elasticità del sistema, minor impatto ambientale per l'eliminazione della rete di distribuzione, maggiore controllo locale e – ovviamente – minori emissioni ambientali di particolato, di ossidi di azoto, di zolfo e di biossido di carbonio.

La *generazione energetica diffusa* può, in certa misura e soprattutto nel settore elettrico, già oggi essere realizzata mediante l'utilizzo di tecnologie rinnovabili; in prospettiva, potrà diventare significativamente più importante attraverso l'utilizzo del nuovo vettore *Idrogeno*, la cui tecnologia di diffusione e di utilizzo è in corso di messa a punto e industrializzazione.

Andare verso il "piccolo è bello", insomma, si può: le nuove tecnologie aiutano a

trovare soluzioni efficienti, efficaci, economicamente vantaggiose, sempre più vicine all'utente finale che diviene così proprietario e controllore di una risorsa fondamentale come l'energia.

L'uso di pannelli solari termici per singole abitazioni e servizi collettivi, di impianti fotovoltaici per gli edifici o di generatori eolici collegati alla rete, potranno in futuro sempre contribuire al processo di "decarbonizzazione" e "generazione energetica pulita" da parte di un utente che non sarà più solo un soggetto passivo divoratore di energia, ma egli stesso attivo produttore della maggior parte dell'energia che gli serve per assicurarsi una adeguata e sempre migliore "qualità della vita".

Bisognerà, però, che il mondo dell'industria e i decisori politici si impegnino per una eliminazione sostanziale degli ostacoli ancora esistenti, ristabilendo regole di mercato più razionali e meno rigide con l'abbassamento dei costi, prevedendo nuove regole per la detenzione e l'esercizio degli impianti di generazione di energia, l'eliminazione di oneri e tasse improprie perché pensate per i grandi impianti di produzione, una maggiore facilità di collegamento alle reti energetiche che connettono tra loro gli edifici di abitazione e di servizio.

Il processo che ci porti ad un futuro migliore e sostenibile richiede l'apporto della Pubblica amministrazione, delle comunità locali, del mondo dell'industria e, soprattutto, di tutti i "cittadini consapevoli" e disposti a preparare un futuro sostenibile per i propri figli.

In definitiva, sono quattro i pilastri dello scenario energetico di domani:

- sicurezza di approvvigionamento,
- efficienza energetica,
- generazione distribuita,
- fonti rinnovabili.



Capitolo **Otto**

Energia solare termica

[8.1] La tecnologia

L'energia solare, che viene sfruttata per la produzione di acqua calda sanitaria o per il riscaldamento degli ambienti, si basa sulla captazione della luce del Sole, trasformata successivamente in calore attraverso determinati processi che si verificano all'interno degli impianti solari. La tecnologia del solare termico permette, infatti, la conversione dell'energia proveniente dal Sole in energia termica.

Il sistema solare termico

Un impianto solare termico tipico è com-

posto da un circuito primario, costituito da una tubazione che assorbe l'energia solare nella forma termica, all'interno del collettore esposto alla radiazione, e da un circuito secondario cui il calore viene trasferito tramite uno scambiatore posto nel sistema di accumulo.

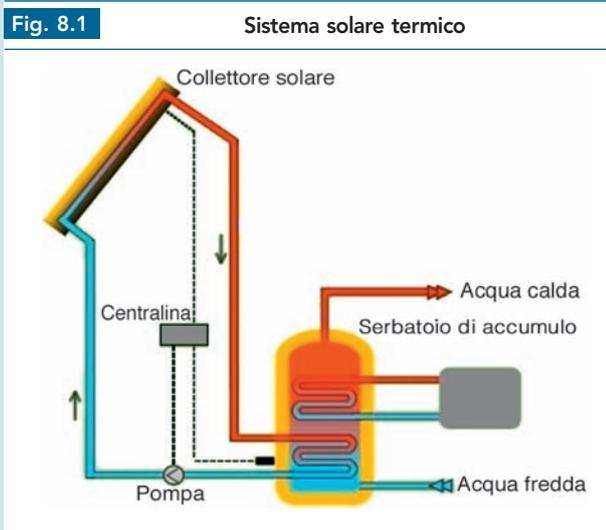
La trasformazione dell'energia è attuata dal *collettore* o *pannello solare* che capta l'energia solare e la converte in calore. L'energia viene poi trasmessa al fluido termovettore che scorre all'interno del collettore e deputato a sua volta alla trasmissione del calore all'acqua contenuta nel serbatoio d'accumulo (fig. 8.1).

Di seguito descriveremo la tecnologia in relazione a diversi parametri quali: la temperatura del fluido termovettore, la posizione del collettore e del serbatoio di accumulo. Infine, ci occuperemo dei collettori solari e del loro funzionamento.

Impianti ad alta e a bassa temperatura

Sulla base della temperatura raggiungibile dal fluido termovettore, prendendo come valore di soglia la temperatura di 100 °C, si distinguono due tipi di dispositivi di sistemi solari: impianti a bassa e ad alta temperatura.

Gli impianti che lavorano al di sotto dei 100 °C, "a bassa temperatura", sono quelli più diffusi e utilizzano acqua o aria; ser-



sono essenzialmente per il riscaldamento di determinati ambienti e per la produzione di acqua calda sanitaria.

Gli impianti che lavorano al di sopra dei 100 °C, "ad alta temperatura", fanno uso di particolari sistemi di captazione in grado di elevare il livello di irraggiamento sull'assorbitore. Essi sono finalizzati alla produzione di energia elettrica (attraverso turbine alimentate dal vapore prodotto dall'impianto) e trovano impiego soprattutto nelle industrie.

Sistemi a circolazione naturale e sistemi a circolazione forzata

Una fondamentale distinzione delle differenti tecnologie atte alla trasformazione dell'energia da solare a termica può essere fatta in relazione al tipo di circolazione del fluido nel circuito primario.

Il circuito primario può essere a "circolazione naturale" (fig. 8.2), e in questo caso il collettore solare deve essere posto ad un livello più basso rispetto al sistema di

accumulo, oppure a "circolazione forzata" (fig. 8.3), cioè indotta meccanicamente da una pompa elettrica governata da una centralina e da alcune sonde.

Inoltre, in base alla modalità di trasferimento del calore al serbatoio di accumulo si distingue tra sistema a circuito aperto e sistema a circuito chiuso. Se infatti il fluido termovettore che scorre nei collettori è l'acqua destinata all'utenza (che arriva direttamente alla rete) avremo un sistema a circuito aperto; sistema che viene utilizzato dove non si pone il problema del congelamento.

Nel caso del sistema a circuito chiuso, invece, uno scambiatore di calore permette il trasferimento di calore dal fluido termovettore in uscita dai collettori (liquido antigelo) all'acqua all'interno del serbatoio.

Questo sistema viene utilizzato in quei luoghi dove non si può prescindere dall'utilizzo di una miscela antigelo per far fronte alle basse temperature.

Fig. 8.2 Schema di un impianto a circolazione naturale

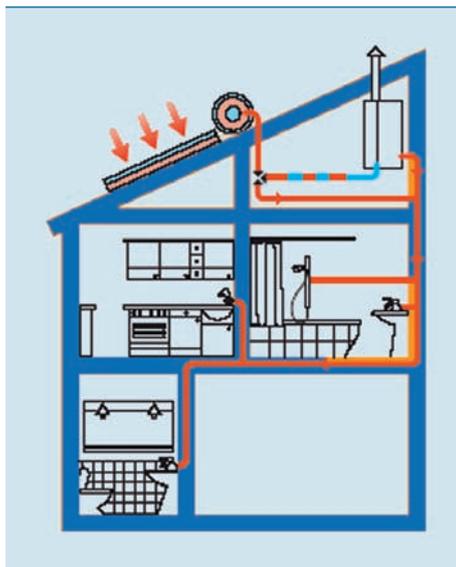


Fig. 8.3 Schema di un impianto a circolazione forzata



[8.2] Collettori solari: caratteristiche e principi di funzionamento

I *collettori o pannelli solari* più diffusi sono vetrati piani o sottovuoto.

I *collettori vetrati piani* sono essenzialmente costituiti da una serie di tubi a stretto contatto con una piastra assorbente in materiale buon conduttore termico; tubi e piastra sono trattati in modo da assicurare il massimo assorbimento della radiazione incidente. L'energia raccolta dal pannello, e quindi dal fluido termovettore circolante all'interno dei tubi (acqua, aria, fluidi organici o freon), viene immagazzinata nel serbatoio di accumulo (boiler).

Il collettore (fig. 8.4) è dotato di una copertura trasparente costituita da una o più lastre di vetro o di plastica posta al di sopra della piastra assorbente; una lastra riflettente e un isolamento termico inferiore riducono al minimo le perdite per conduzione della piastra verso la parte inferiore del pannello.

È importante ricordare che la tecnologia

di un buon collettore piano, al fine di assicurare la miglior captazione dell'energia incidente, deve rispettare determinate condizioni e utilizzare alcuni tipi di materiali quali una lastra di copertura che sia trasparente alle lunghezze d'onda λ comprese tra 0,4 e 2,5 μm e una piastra assorbente (investita dalla radiazione solare) che ne assorba gran parte. Inoltre, la piastra metallica "captante" deve essere resa selettiva all'assorbimento della radiazione solare tramite rivestimento, sul lato esposto, con materiale che abbia caratteristiche ottimali di assorbimento dei raggi solari e bassa riemissione di radiazione per lunghezza d'onda $\lambda > 3 \mu\text{m}$.

Le migliori soluzioni prevedono, poi, un contenitore esterno con un isolamento inferiore e laterale in lana di vetro e un profilo in gomma EPDM e silicone per garantire l'impermeabilità della parte superiore più esposta alla pioggia.

Nei *collettori sottovuoto* gli elementi captanti, lamina e tubi in rame, sono inseriti in tubi di vetro temperato sotto vuoto (fig. 8.5), soluzione che consente di eliminare le perdite di calore verso l'ambiente esterno per conduzione e convezione. Questi sistemi lavorano bene anche a basse temperature esterne, con un'efficienza pressoché costante in ogni stagione.

Esistono due tipologie di tubi sottovuoto: vetro-vetro e vetro-metallo.

Il tubo vetro-vetro consiste in due tubi di vetro concentrici, uno esterno e uno interno. Il tubo interno è coperto con uno strato selettivo che assorbe l'energia solare e inibisce la perdita di calore per reirraggiamento. In fase di assemblaggio, l'aria tra i due strati di vetro viene aspirata così da eliminare le perdite di tipo conduttivo e convettivo; la perfetta tenuta del vuoto è

Fig. 8.4

Schema di collettore solare

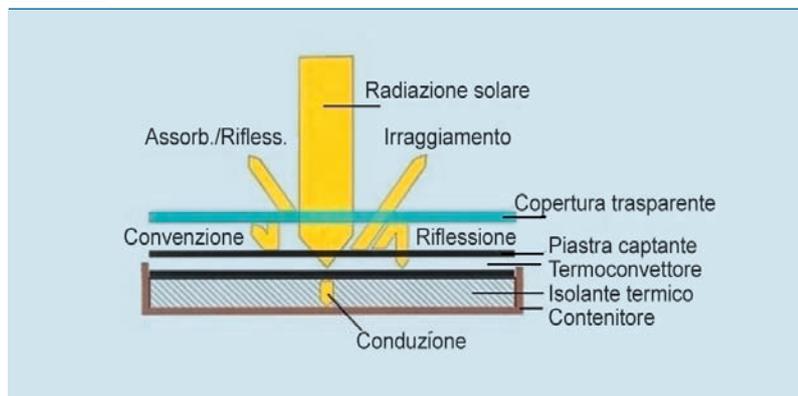
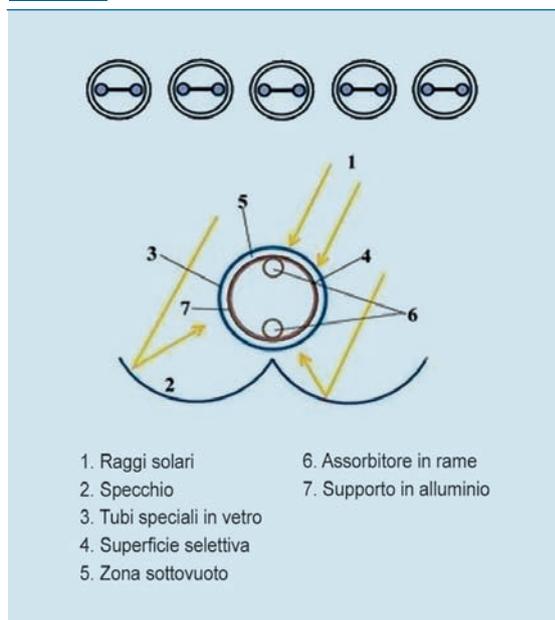


Fig. 8.5 Schema di collettore solare sottovuoto

in questo caso stabilmente assicurata nel tempo da saldature vetro-vetro. Il tubo *vetro-metallo* consiste in un singolo tubo di vetro dentro il quale è posto l'elemento captante, generalmente ricoperto con *tinnox*; questi collettori incontrano più problemi di perdita del grado di vuoto per il fatto che la saldatura di tenuta è realizza-

ta tra materiali con differenti coefficienti di dilatazione termica.

Dall'*assorbitore* dipende il rendimento generale dell'impianto e pertanto le caratteristiche più importanti riguardano la qualità di questo componente.

Quando la radiazione raggiunge la piastra captante (o assorbitore) del collettore, questa assorbe una percentuale elevata (fino a 95% per le migliori superfici nere) dell'energia, si riscalda e quindi la temperatura aumenta. In tali condizioni la piastra è, a sua volta, un corpo che irraggia energia con una distribuzione spettrale che dipende dalla temperatura.

D'altra parte l'assorbitore è circondato da aria alla temperatura ambiente (ad esempio 15 °C) per cui cedendo calore all'aria circostante, sia per convezione che per irraggiamento, tende a raffreddarsi.

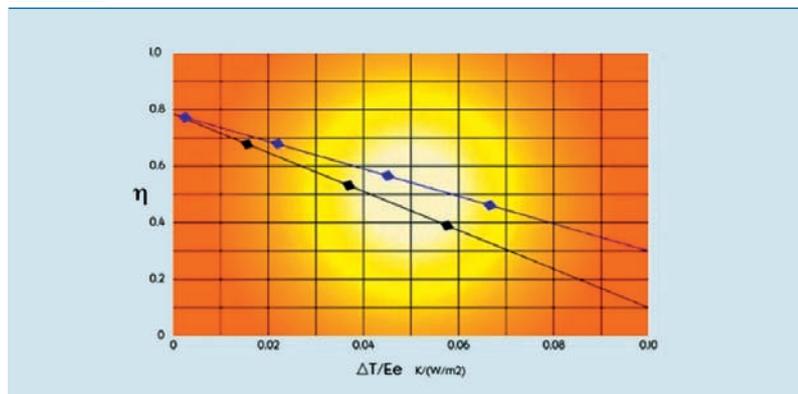
Quindi, maggiore è la capacità di assorbimento, migliori saranno le prestazioni offerte.

Esistono pannelli solari che hanno un assorbitore realizzato in rame verniciato di nero: questo diminuisce il rendimento, in quanto la semplice vernice nera non riesce a convertire tutte le gamme di frequenza di cui la luce è composta, per cui gran parte dell'energia viene riflessa e quindi sprecata.

Il miglior materiale con cui l'assorbitore può essere costruito è una sottile lastra di rame rivestita in materiale selettivo al *tinnox*.

In figura 8.6 è riportata una comparazione tra il rendimento di un pannello solare con assorbitore selettivo in *tinnox* e uno con assorbitore in rame verniciato di nero. Il grafico mostra il rendimento in funzione della temperatura esterna.

La curva più alta rappresenta il rendimen-

Fig. 8.6 Rendimento dell'assorbitore in funzione della temperatura esterna

to della superficie in *tincox* confrontato con il rendimento dell'assorbitore realizzato in rame verniciato. Nei periodi freddi il rendimento di quest'ultimo diventa quasi di tre volte inferiore. Il rendimento migliora se l'impianto è installato più a sud, o se è più vicino al mare.

[8.3] Le aree di applicazione

La tecnologia del solare termico sta trovando applicazione in tutti i sistemi energetici connessi all'edificio.

Accanto al semplice utilizzo dell'energia solare per la produzione di acqua calda sanitaria, infatti, si stanno diffondendo sia i sistemi ad aria per il preriscaldamento dell'aria di ventilazione di grandi spazi, sia l'accoppiamento dei sistemi solari con sistemi a pompa di calore per il riscaldamento a bassa temperatura degli edifici. Questo tipo di impianti impiega sistemi a pavimento o a pannelli radianti.

Acqua calda sanitaria

Attraverso l'utilizzo di collettori solari risul-

ta molto conveniente riscaldare acqua per usi sanitari, per abitazioni singole e soprattutto per comunità.

I collettori, infatti, vanno a sostituire l'energia elettrica o gasolio o gas metano; nei primi due casi il solare può dare un valido contributo e permettere risparmi considerevoli, mentre per il gas metano l'ammortamento dell'investimento risulta in genere di poco più lungo.

Prendendo come riferimento l'ambito urbano, l'acqua calda sanitaria è per la maggior parte dei casi prodotta con scaldabagni elettrici o caldaie a gas.

Confronto di consumi energetici

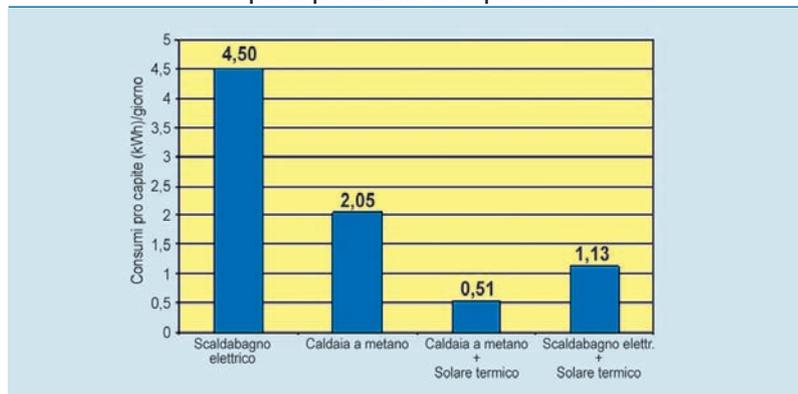
Il grafico in figura 8.7 mostra il risultato del confronto tra il fabbisogno energetico, in termini di energia primaria, necessario per la produzione di acqua calda sanitaria con uno scaldabagno elettrico, con una caldaia a gas, un sistema caldaia gas/collettore solare termico e un sistema scaldabagno elettrico/collettore solare termico, ferme restando le ipotesi sopra enunciate e il quantitativo pro capite di acqua necessaria.

Si osserva che nel passaggio dalla soluzione con scaldabagno elettrico a quella con caldaia a gas integrata da collettori solari, il consumo energetico pro capite passa da 4,5 a 0,5 kWh. È il caso più interessante, dunque, che porta ad una riduzione del 90% del consumo energetico, a parità di servizio reso.

Nel confronto tra il sistema basato sull'integrazione di collettore solare con una caldaia a gas e la caldaia stessa, si nota come il consumo passi da 2,05 kWh, per il caso della sola caldaia, a 0,5 kWh, per il sistema integrato.

Nel passaggio dal solo scaldabagno elet-

Fig. 8.7 Confronto del fabbisogno energetico tra differenti sistemi per la produzione di acqua calda sanitaria



trico ad uno scaldabagno elettrico integrato da collettori solari, il consumo energetico scende da 4,5 a 1,13 kWh.

Ulteriori vantaggi possono essere ottenuti se è maggiore il numero degli utenti che utilizza impianti solari, in questo caso, infatti, diviene più conveniente la suddivisione dell'accumulo termico in più serbatoi.

Piscine e agricoltura

Non soltanto nelle abitazioni è possibile sfruttare le potenzialità della tecnologia solare termica, anche stabilimenti balneari, camping, hotel, palestre, impianti sportivi, pensioni e case di riposo trovano le massime potenzialità d'uso negli impianti solari.

La piscina, principalmente, è uno dei campi di impiego nel quale il riscaldamento solare ha avuto maggiore diffusione. Ciò è dovuto al periodo di utilizzo corrispondente al periodo di massimo soleggiamento, al fatto che non sono necessari sistemi di accumulo, al basso salto termico richiesto, nonché alla possibilità di impiego di pannelli in materiali plastici o gommosi di basso costo e rapido montaggio e smontaggio per usi stagionali.

La ragione principale, comunque, risiede nel fatto che la temperatura da raggiungere nell'acqua non è molto alta e bastano i pannelli in polipropilene, meno costosi e complessi.

Infine, l'aria calda prodotta con pannelli termici è in modo abbastanza semplice e economico utilizzata per l'essiccazione di erbe e di prodotti agricoli; soprattutto in paesi dove questo processo per via naturale richiederebbe una quantità di giorni superiore a quella che le condizioni ambientali consentono.

Riscaldamento ambientale: pannelli e pavimenti radianti

Affinché un sistema solare termico, oltre che fornire l'acqua calda sanitaria, possa integrare anche il riscaldamento di una casa, è necessario che l'abitazione sia dotata di un sistema di riscaldamento a bassa temperatura realizzato tramite superfici radianti: tubi sotto il pavimento (fig. 8.8), nelle pareti o con termostrisce a soffitto in cui scorre acqua a 30-35 °C.

I tubi entro cui viene fatto scorrere il fluido termovettore caldo sono in gene-

Figura 8.8

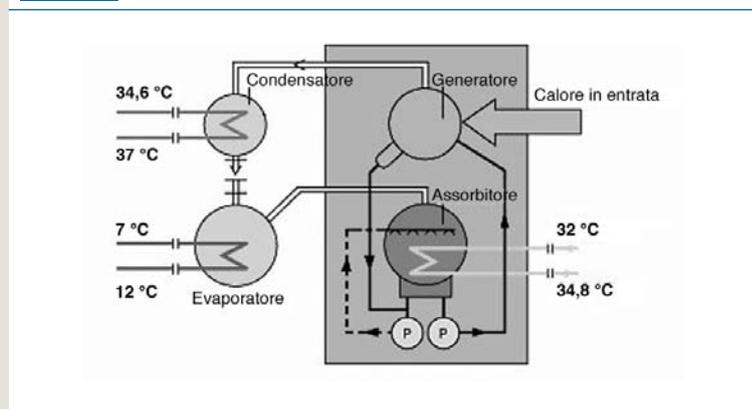


Solar Cooling

Un aspetto più innovativo è quello che riguarda lo sviluppo delle tecnologie di solar cooling.

In questo caso il calore generato da collettori solari in grado di ottenere buoni rendimenti, con temperature più elevate del normale, viene utilizzato da una pompa ad assorbimento di calore (fig. 8.9) con produzione di aria fresca. Le macchine ad assorbimento di energia termica per scopi di refrigerazione o condizionamento dell'aria sono attualmente oggetto di rinnovata attenzione sotto il profilo scientifico e industriale.

Fig. 8.9



Per quanto riguarda le macchine a fiamma diretta, impiegate per il condizionamento estivo, esse possono anche contribuire a ridurre lo squilibrio stagionale oggi esistente nei consumi di gas.

Un ulteriore motivo che ha portato a riconsiderare questa tecnologia è la sempre maggiore sensibilità al problema ambientale: le macchine ad assorbimento possono funzionare con fluidi non pericolosi per l'ambiente, alcuni in particolare dotati di indice GWP (Greenhouse Warming Potential) addirittura nullo, e possono essere alimentate a metano, con emissioni inquinanti di livello contenuto rispetto ad altri combustibili, o con calore di scarto o con energia solare (*solar cooling*).

re realizzati in materiale plastico o rame e possono avere diverse dimensioni.

La loro collocazione può avvenire mediante fissaggio su pannelli per controsoffittatura di gesso o metallo, oppure per posa sulla superficie di intradosso del solaio.

[8.4] Costi e benefici

La giustificazione razionale di un impianto solare deriva da considerazioni non soltanto ambientali, ma anche economiche. Un impianto solare termico permette di far risparmiare dal 40% al 70% dell'energia necessaria per produrre l'acqua calda sanitaria, naturalmente senza l'utilizzo di sostanze inquinanti.

In particolare il risparmio associabile all'uso di un impianto solare termico è legato al costo dell'energia sostituita e varia in ragione del tipo di energia utilizzato (elettrica, metano, gasolio, carbone, altro), delle politiche energetiche del governo, dell'evoluzione del prezzo dei combustibili.

Prendendo come riferimento la situazione del mercato energetico italiano, stimando il consumo di acqua calda sanitaria a 45-50 °C in circa 50 litri al giorno a persona, ciascun individuo consuma ogni anno in media 18.000 litri di acqua calda, che richiedono, a seconda della temperatura dell'acquedotto, circa 700 kWh di energia all'anno (per persona).

Considerando l'efficienza media delle caldaie a gas commerciali, ogni persona consuma ogni anno circa 60 metri cubi di metano per soddisfare il proprio fabbisogno di acqua calda sanitaria. Poiché il costo del metano, aggiornato a metà 2006, è di circa 0,80 €/m³ (dato comprensivo dei costi fissi), la spesa annua per il combustibile è di quasi 50 € a persona.

A questo punto consideriamo un impianto solare termico. Un giusto compromesso consiste nel dimensionare l'impianto in modo tale che esso riesca a coprire il 75% del consumo su base annua, lasciando

Tabella 8.1
Spesa per la realizzazione
di un impianto solare termico

L'installazione di un impianto solare per la produzione di 50 l/giorno di acqua calda, da 15 °C a 45 °C, con apporto solare del 75% richiede (valori indicativi):			Costo medio unitario indicativo di un impianto installato (€/m ²)		
Collettori vetrati piani	Zone geografiche	Inclinazione collettori	Superficie captante m ² /persona	Piccoli impianti (IVA compresa)	
	NORD	50°	1,2		
	CENTRO	45°	0,9		680
	SUD	35°	0,70		

che il restante 25% sia coperto da uno scaldacqua convenzionale (elettrico o a gas). Se fosse dimensionato per soddisfare i consumi in condizioni invernali l'impianto risulterebbe largamente sovradimensionato per l'estate, e non conveniente dal punto di vista economico; viceversa se fosse dimensionato per il periodo estivo. Con il citato criterio di dimensionamento, a fronte di un costo annuo per il combustibile di quasi 50 € a persona, un impianto solare termico consente di risparmiare fino a circa 40 € a persona. Per produrre la stessa quantità di calore per acqua calda sanitaria utilizzando un boiler elettrico si spenderebbe ancora di

più, circa 110 € a persona all'anno. In questo caso il risparmio prodotto da un impianto solare può arrivare anche a 90 € a persona all'anno.

I dati riportati in **tabella 8.1** consentono, noto il numero di persone che compongono la famiglia, di valutare la spesa necessaria per la realizzazione dell'impianto: sarà sufficiente moltiplicare il costo al m² per il numero di persone e per la superficie captante/persona.

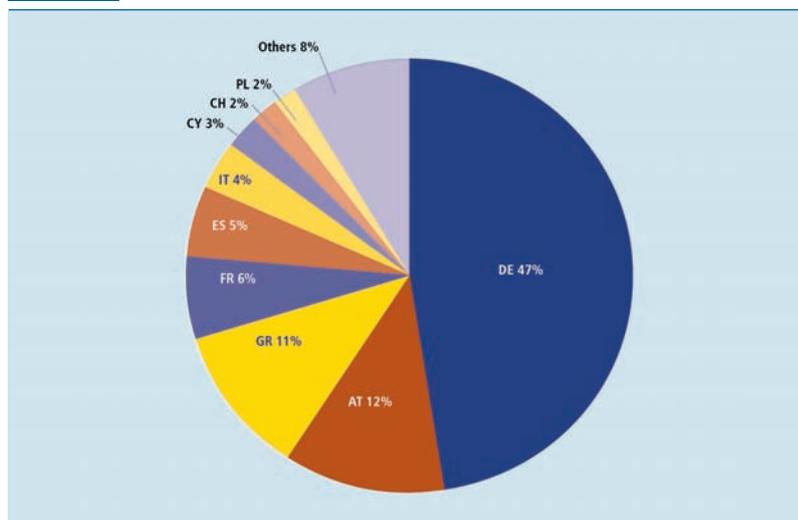
Dalla successiva **tabella 8.2** possono essere dedotti il risparmio economico conseguibile e le emissioni evitate utilizzando un impianto solare termico in sostituzione di uno scaldacqua elettrico o di uno a

Tabella 8.2
Benefici economici e
ambientali di un impianto
solare termico rispetto al
tradizionale scaldabagno
elettrico o a gas

Solare termico per la famiglia media (4 persone)		
	Scaldabagno elettrico	Scaldabagno a metano
Consumi energetici (*)	2.833 kWh/anno	312 m ³ /anno
Costo indicativo dell'impianto solare termico nell'Italia centrale - al netto della deduzione Irpef	1.567 €	
Risparmio economico ipotizzando la copertura parziale dei consumi (**)	430 €/anno	172 €/anno
Tempo di ritorno (oneri finanziari esclusi)	3,6 anni	9,1 anni
Emissioni evitate (t di CO ₂ /anno)	1,3 t di CO ₂ /anno	0,70 t di CO ₂ /anno

(*) per 200 l/giorno da 15 a 45 °C (4 persone)

(**) 75% di copertura dei consumi

Fig. 8.10 Quote di mercato del solare termico in Europa

metano. Nel calcolo si è ipotizzato che l'impianto copra solo il 75% del consumo annuo complessivo.

[8.5] Il mercato

In generale il mercato del solare termico sta trovando in ambito europeo una buona accoglienza. Le stime dell'ESTIF (*European Solar Thermal Industry Federation*) ne mostrano infatti un notevole incremento con un tasso di crescita in costante aumento.

I dati pubblicati fanno riferimento ai paesi dell'Unione Europea e evidenziano il ruolo centrale della Germania e della Grecia nell'ambito dell'applicazione e utilizzo della tecnologia solare termica (fig. 8.10).

Le ragioni principali di questa crescita risiedono nell'impegno assunto dall'Unione Europea a ridurre le emissioni inquinanti come previsto dal Protocollo di Kyoto. In particolare il Governo italiano si sta ado-

perando per colmare la distanza che separa l'Italia dagli altri paesi europei in materia di sviluppo delle fonti rinnovabili. Per questo motivo sono attivati investimenti per il solare termico tendenti ad aumentare l'installazione di collettori solari.

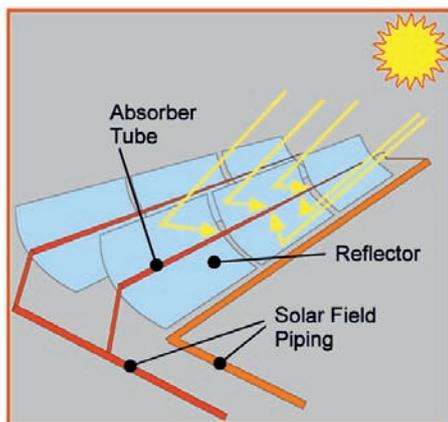
Ai fini del miglioramento dell'efficienza energetica nell'edilizia e nell'impiantistica, l'Italia ha introdotto nuove norme in recepimento di precise direttive europee (Direttiva 2003/87/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 13 ottobre 2003: "Emission Trading") che oltre a stimolare azioni finalizzate al raggiungimento degli obiettivi di cui sopra, favoriranno l'utilizzo delle fonti rinnovabili in edilizia. In particolare dal 1° luglio 2007 è iniziato il processo che porterà alla classificazione delle abitazioni in base alla capacità di risparmio energetico. Il documento attestante l'efficienza energetica, chiamato "certificato energetico", rappresenterà una condizione necessaria per usufruire di agevolazioni fiscali durante le ristrutturazioni. In particolare, sarà poi obbligatorio prevedere sistemi solari termici negli edifici di nuova costruzione, per la produzione di acqua calda sanitaria.

Infine, come detto nel paragrafo 8.3 relativo alle aree di applicazione, le tecnologie dei pannelli radianti a pavimento e del *solar cooling* cominciano ad affermarsi costituendo un potenziale mercato per gli anni futuri.

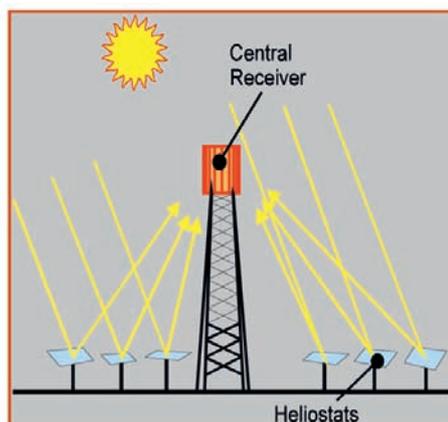
[8.6] Le attese della tecnologia

La novità, per ciò che concerne la tecnologia del solare termico, riguarda una tipologia diversa di sistema. Si tratta di

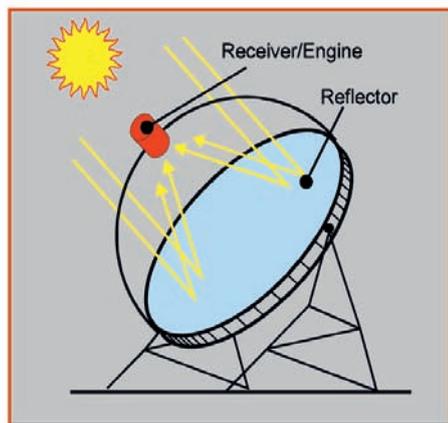
Figura 8.11
Tecnologie attualmente disponibili per il solare termico a concentrazione



Parabolic trough



Power tower



Parabolic dish

dispositivi ad alta temperatura in cui il fluido termovettore può raggiungere una temperatura superiore ai 100 °C. Tali dispositivi sono chiamati sistemi solari termodinamici.

I collettori adoperati sono dotati di sistemi ottici a concentrazione (ad esempio paraboloidi di rotazione) per aumentare l'intensità della radiazione solare sulla superficie che assorbe l'energia, realizzando temperature più elevate del fluido captante rispetto a quelle raggiungibili con l'impiego di un collettore piano. In questi impianti un sistema ottico, detto *concentratore*, raccoglie la radiazione solare diretta e la invia su un componente *ricevitore* dove viene trasformata in calore ad alta temperatura.

Questo sistema può essere utilizzato per la produzione di vapore da impiegare in lavoro meccanico o in vari processi industriali. L'energia meccanica può essere impiegata direttamente o convertita in energia elettrica.

La caratteristica principale riguarda pertanto la possibilità di produrre energia dinamica e elettricità attraverso cicli termodinamici convenzionali, come quelli con turbine a vapore, con turbine a gas o con motori Stirling, alimentati dal calore proveniente dalla radiazione solare concentrata.

Il sistema solare termodinamico non utilizza la radiazione diffusa ma solo quella diretta e comporta quindi il ricorso a dispositivi di inseguimento solare e a tecnologie sofisticate per il sistema ottico di concentrazione, che ne aumentano il costo complessivo.

In relazione alla geometria e alla disposizione del concentratore rispetto al ricevitore, si possono distinguere tre principali

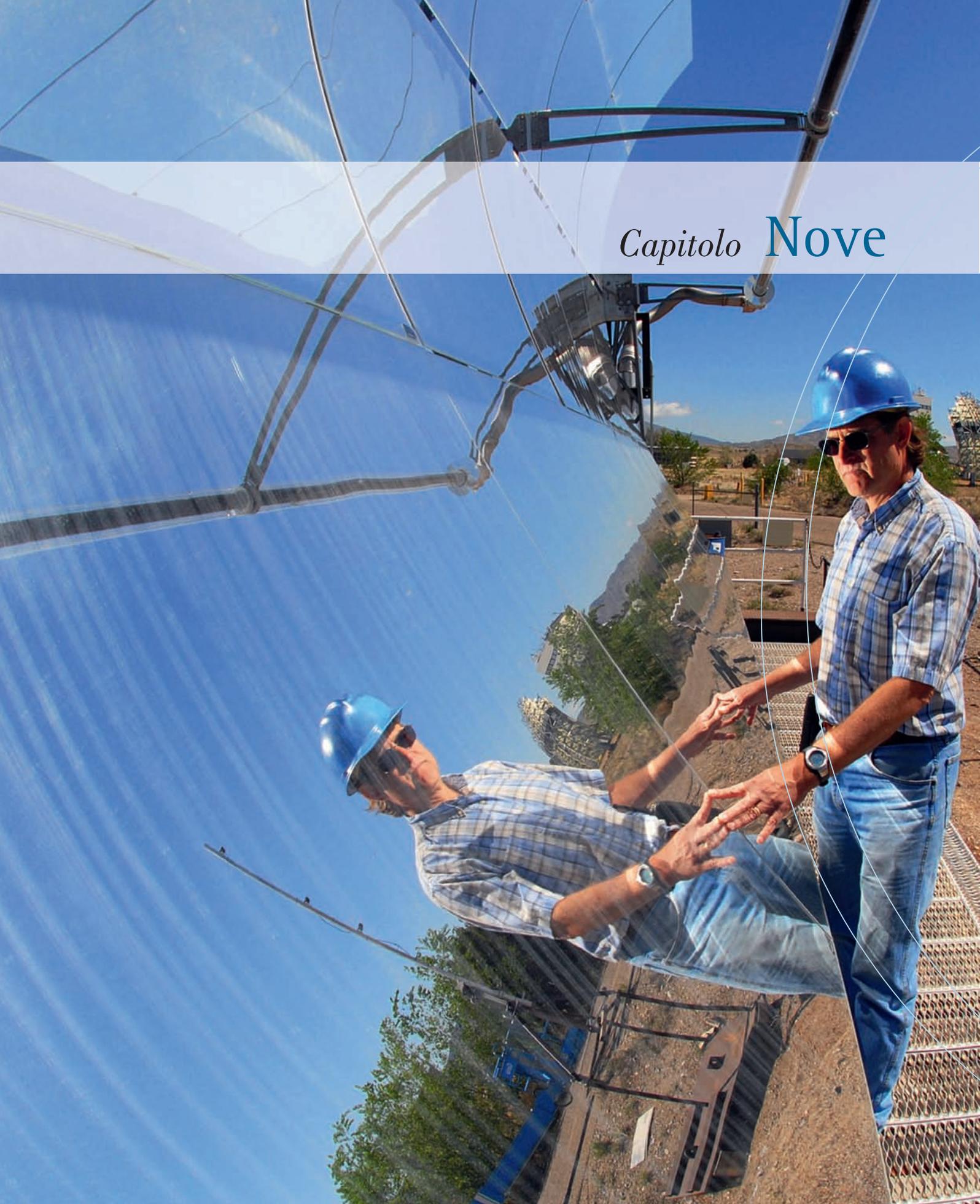
tipologie di impianto: il collettore parabolico lineare (*Parabolic Trough*), il sistema a torre centrale (*Power Tower*), e il collettore a disco parabolico (*Parabolic Dish*). Infine, una importante innovazione progettuale riguarda il sistema che integra un ciclo combinato a gas e un impianto solare termodinamico, ne è un esempio il pro-

totipo industriale dimostrativo "Progetto Archimede". Nato dalla collaborazione ENEA – ENEL, si tratta della prima applicazione a livello mondiale di questo tipo di impianti.

Per ulteriori approfondimenti si rimanda al capitolo successivo sulla Energia solare termodinamica.



Capitolo **Nove**



Energia solare termodinamica

[9.1]

Il sistema solare termodinamico

L'energia solare è una importante e fondamentale sorgente di energia sul nostro pianeta. Questa energia viene utilizzata sia per produrre cibo, sia per generare calore.

Nei secoli si sono sviluppate tecnologie in grado di contribuire al miglioramento della qualità della vita umana. Attualmente ne sono state sviluppate alcune che concentrano la luce solare e fanno uso di tale energia per determinati tipi di applicazioni, come ad esempio per la produzione di elettricità e di calore per i processi industriali.

Ancorché l'energia non concentrata dei raggi solari sia di utilità per produrre acqua calda o per riscaldare le case, essa non è abbastanza intensa per una trasformazione efficiente in energia elettrica. Applicazioni avanzate, basate sul solare termico, hanno quindi necessità di concentrare grandi quantità di luce solare su un'area di piccole dimensioni, al fine di permettere produzione di calore ad alta temperatura che, a sua volta, ad esempio, può essere convertito in elettricità da un sistema di generazione termoelettrica convenzionale.

Protagonista di questi processi è la radiazione solare diretta.

Questo tipo di radiazione giunge al suolo senza subire diffusione da parte dell'atmosfera ed è costituita da raggi quasi paralleli che possono essere concentrati grazie a specchi o lenti ad un livello tale che sarebbe possibile, almeno teoricamente, raggiungere, nel punto focale, temperature vicine a quelle della superficie emittente del Sole (5.000 °C).

Già Archimede avrebbe impiegato un sistema di specchi per dare fuoco alle vele delle navi romane. Attualmente è possibile produrre temperature tra 400 °C e oltre 1200 °C. Tale calore può essere utilizzato per diverse applicazioni pratiche, oltre che per produrre energia elettrica.

Questi dispositivi catturano la radiazione solare diretta e sono convenienti in regioni con una grande insolazione diretta (mentre ad esempio il sistema fotovoltaico funziona anche con luce diffusa). Al massimo dell'intensità e in condizioni ottimali, l'energia direttamente depositata dal Sole sulla superficie della Terra è pari a circa 1 kW/m². In località favorevoli è possibile raccogliere annualmente circa 2000 kWh su ogni metro quadrato di superficie, l'equivalente energetico di 1,5 barili di petrolio per m², cioè uno strato di petrolio spesso circa 20 cm su ogni metro quadrato della superficie (orizzontale) di raccolta.

La tecnologia che andremo ad analizzare consente di produrre elettricità utilizzan-

do un ciclo termodinamico convenzionale alimentato dal calore proveniente dalla concentrazione della radiazione solare. Si tratta del "solare termico a concentrazione".

[9.2] Le tecnologie attualmente disponibili

Ci sono fondamentalmente tre tipi di dispositivi che producono energia elettrica attraverso cicli termodinamici lavorando a medie o alte temperature:

- i collettori parabolici lineari (*Parabolic Trough*),
- il sistema a torre centrale (*Solar Tower*),
- i dischi parabolici (*Parabolic Dish*).

I collettori parabolici lineari (*Parabolic Trough*)

I *Parabolic Trough* sono costituiti da specchi semicilindrici a sezione parabolica che inseguono la radiazione ruotando solo attorno al loro asse e la concentrano sulla linea focale del paraboloide lineare.

Il fluido primario scorre all'interno di un

tubo, posto lungo la linea focale, dove si riscalda a temperature intorno ai 500 °C. Segue un ciclo termico acqua-vapore analogo a quello degli impianti termoelettrici convenzionali, comprendente una turbina a vapore accoppiata ad un generatore elettrico, un condensatore e i sistemi di preriscaldamento dell'acqua di alimento. L'efficienza totale netta ottenuta nei grossi impianti industriali si aggira su valori compresi tra il 10% e il 12%. Questa tecnologia viene detta DCS (*Distributed Collector System*).

L'impianto solare a concentrazione con collettori parabolici lineari per la produzione di energia elettrica, è costituito essenzialmente da tre sistemi (fig. 9.2):

- un sistema primario,
- un sistema secondario,
- un sistema di conversione termoelettrica.

Il *sistema primario* è costituito dal campo solare, dove avviene la concentrazione della radiazione solare, dal circuito di raccolta e trasporto del calore e dai serbatoi di accumulo del fluido vettore.

Il campo solare, che rappresenta il cuore dell'impianto e in pratica sostituisce la caldaia di un impianto termico, è composto da collettori parabolici lineari disposti in file parallele ciascuna formata da sei collettori collegati in serie.

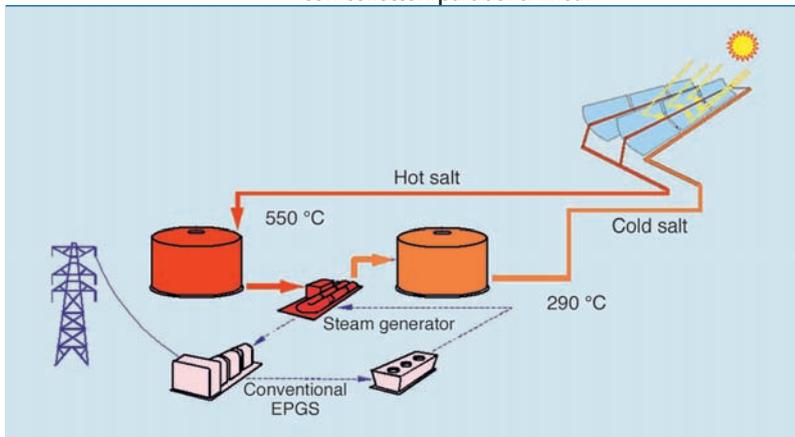
Esso presenta quindi una struttura di tipo modulare; aggiungendo moduli (insieme di file di collettori) si aumenta l'energia termica raccolta e quindi la potenza dell'impianto.

I collettori sono costituiti da un riflettore di forma parabolica che concentra in maniera continua, tramite un opportuno sistema di controllo, la radiazione diretta del sole su un tubo assorbitore (ricevitore) disposto sul fuoco della parabola. All'interno del tubo ricevitore viene fatto



Figura 9.1
Collettore parabolico lineare. Specchi a sezione parabolica concentrano la radiazione solare su un tubo posto lungo la linea focale

Fig. 9.2 Schema funzionale dell'impianto solare a concentrazione con collettori parabolici lineari



circolare il fluido per l'asportazione dell'energia termica solare (ad esempio una miscela costituita per il 60% di nitrato di sodio e per il 40% di nitrato di potassio). La disposizione dei collettori sul campo solare dipende essenzialmente dalla conformazione del sito. Le disposizioni classiche sono quelle con collettori orientati lungo la direzione Nord-Sud oppure Est-Ovest; la scelta può essere fatta in base alla latitudine del sito e al tipo di funzionamento che è previsto per l'impianto. La direzione N-S consente di ottenere una migliore raccolta dell'energia solare nei mesi estivi rispetto a quelli invernali; globalmente l'energia risulta comunque essere superiore rispetto alla disposizione E-O.

Il sistema secondario utilizza il calore accumulato dal sistema primario per produrre il vapore necessario al sistema di conversione termoelettrica. Il sistema è costituito quindi da un generatore di vapore e dai rami del circuito di alimentazione dal serbatoio caldo e di ritorno al serbatoio freddo.

Il sistema di conversione termoelettrico utilizza il vapore prodotto nel sistema

secondario per generare energia elettrica facendo uso di un ciclo termico acqua-vapore analogo a quello degli impianti termoelettrici convenzionali e comprende una turbina a vapore accoppiata ad un generatore elettrico, un condensatore e i sistemi di preriscaldamento dell'acqua di alimento.

L'energia solare viene così trasferita al fluido vettore termico prelevato dal serbatoio freddo ad una temperatura di 290 °C, fatto circolare attraverso la rete di collettori dove si scalda fino ad una temperatura di 550 °C e inviato al serbatoio caldo a costituire l'accumulo dell'energia termica. Quando è richiesta la produzione di energia elettrica, i sali del serbatoio caldo vengono inviati ad uno scambiatore di calore dove si produce vapore ad alta pressione e temperatura, per poi far ritorno al serbatoio freddo. Il vapore viene fatto espandere in turbina, per generare l'energia elettrica, quindi condensato, preriscaldato e successivamente inviato al generatore di vapore.

La portata dei sali nel circuito primario viene regolata in funzione dell'intensità della radiazione solare in modo da mantenere costante la temperatura dei sali in ingresso al serbatoio caldo. Poiché i sali utilizzati presentano una elevata temperatura di solidificazione (238 °C), in assenza di radiazione solare (nuvolosità e notte) è necessario mantenere una portata minima attraverso il circuito del fluido primario per impedire che la temperatura dei sali scenda al di sotto di questo valore.

Il gruppo di potenza dell'impianto solare deve essere posizionato in una zona ottimale rispetto al campo specchi in modo da minimizzare lo sviluppo della rete di raccolta del calore, per ridurre sia il costo della rete, sia le dispersioni termiche e la

potenza di pompaggio del fluido termovettore.

Il gruppo di potenza dell'impianto comprende:

- i serbatoi di accumulo termico caldo e freddo a sali fusi, con relativi sistemi di pompaggio;
- il generatore di vapore a sali fusi;
- i serbatoi interrati per il drenaggio dei sali fusi presenti nel generatore di vapore e nella rete di raccolta;
- i componenti del ciclo termico (preriscaldatori, degasatore, pompa di alimentazione, gruppo turbina-alternatore e condensatore);
- il sistema per il trattamento delle acque (demineralizzatore e addolcitori);
- la sala di controllo.

La tecnologia dei collettori parabolici lineari, attualmente la più matura per la produzione elettrica su grande scala, presenta, tuttavia, alcune serie limitazioni che ne hanno impedito una diffusione più ampia. I problemi ancora da risolvere riguardano:

- l'intermittenza e variabilità (casuale, giornaliera e stagionale) della produzione di energia elettrica, conseguenza dell'intermittenza e variabilità della fonte solare; infatti, in questi sistemi non è ragionevolmente possibile stoccare grandi quantità di olio o sali caldi per mediare le variazioni a breve termine dell'intensità solare e il ciclo giorno-notte. Quindi la turbina e l'alternatore devono essere progettati per la potenza solare di picco e essere capaci di sopportare appieno le variazioni aleatorie di flusso solare. Queste variazioni e il ciclo giorno/notte sono spesso integrati da un riscaldatore a combustibile di supporto, che produce una frazione apprezzabile dell'energia a partire da fossili convenzionali. Essi sono dunque sistemi "ibridi" solare-fossile;

- la limitata efficienza di conversione degli impianti, dovuta, da un lato, alla limitata efficienza di raccolta dell'energia solare termica e, dall'altro, alla bassa temperatura di lavoro (inferiore ai 400 °C) del fluido utilizzato per la raccolta dell'energia termica solare, che limita l'efficienza del ciclo vapore di conversione termoelettrica;
- il costo elevato dell'energia elettrica prodotta, conseguenza della bassa efficienza e dell'elevato costo unitario degli impianti (il sistema di specchi è costoso, in quanto basato su di un foglio di vetro fragile e difficilmente allineabile con la precisione richiesta);
- l'inflammabilità del liquido portatore di calore alla temperatura di operazione al contatto dell'aria e la sua tossicità (quando si utilizzi olio).

Al fine di eliminare tali inconvenienti, si sono andati sviluppando gli impianti a torre.

Il sistema a torre centrale: Solar Tower

Il Solar Tower, chiamato anche CRS (Central Receiver System), è un impianto costituito da numerosi specchi, detti eliostati, che concentrano la radiazione in uno stesso punto dove è collocato il ricevitore termico, sostenuto da un'alta torre centrale. Il fluido primario che circola nel ricevitore viene scaldato a temperature che possono superare anche i 1000 °C, in dipendenza dal grado di concentrazione dell'impianto.

Il fluido primario trasferisce il calore tramite uno scambiatore ad un fluido secondario che alimenta il ciclo termoelettrico finale, costituito dall'usuale gruppo a vapore con turbina-alternatore.

Questa tecnologia ha dimostrato di possedere, in impianti di taglia dell'ordine di



Figura 9.3
Collettore a torre centrale. Numerosi specchi concentrano la radiazione solare in uno stesso punto dove, sostenuto da una torre centrale, è collocato il ricevitore



Figura 9.4
Collettori a dischi parabolici. La superficie riflettente insegue su due assi la radiazione solare e la concentra nel punto focale dove è posto il ricevitore

10 MWe, un'efficienza totale, dalla cattura della radiazione solare all'elettricità immessa in rete, tra l'8% e il 12%. A medio termine promettono efficienze di conversione superiori e investimenti inferiori. I principali miglioramenti introdotti in questo tipo di impianti rispetto alla precedente tecnologia sono:

- la sicurezza del liquido trasportatore di calore, che è un nitrato di sodio e potassio, noto concime di origine naturale, non infiammabile e non tossico;
- il miglioramento del rendimento del ciclo termodinamico, legato all'innalzamento della temperatura di operazione da 390 a 565 °C;
- la possibilità di introdurre un accumulo termico per ovviare alle variazioni giornaliere dell'intensità solare. Ciò comporta importanti vantaggi di continuità per il gruppo turbina-alternatore (che può essere dimensionato secondo la potenza media e non più di picco, pari a circa 3 volte la potenza installata), con conseguenti riduzioni del costo dell'installazione;
- la riduzione del costo per unità di area degli specchi ottenuta con l'adozione di una nuova tecnologia basata su materiali compositi (honeycomb), più leggeri, robusti e economici della semplice lastra di vetro usata nei SEGS (*Solar Electricity Generating Systems*).

I dischi parabolici: Parabolic Dish

Nei *Parabolic Dish* la superficie riflettente è costituita da un disco a sezione parabolica mobile che insegue su due assi la radiazione solare concentrandola nel punto focale, in cui è posto un collettore termico. Il calore immagazzinato dal collettore alimenta direttamente un motore (motore Stirling), grazie al quale si ottiene la trasformazione dell'energia termica

in energia elettrica. Il rendimento di questo motore può raggiungere anche il 40% e permette di usare direttamente la radiazione senza ulteriori perdite di calore, però questi impianti sono molto costosi e difficili da gestire.

[9.3] Costi e benefici

La produzione di elettricità da impianti solari termodinamici è la più economica tecnologia di utilizzo dell'energia solare oggi disponibile per applicazioni connesse alla rete.

Ampie opportunità sussistono per ulteriori riduzioni sostanziali dei costi:

- il costo unitario dell'elettricità prodotta dalle più recenti installazioni da 80 MW elettrici di specchi parabolici lineari (SEGS) è dell'ordine di 12 c€/kWh, circa 1/2 - 1/3 del prezzo dell'elettricità prodotta oggi da impianti fotovoltaici;
- le torri solari con accumulo di energia promettono efficienze di conversione superiori e investimenti iniziali inferiori;
- i concentratori parabolici indipendenti sono oggi competitivi per la produzione di energia in una nicchia ad alto costo per installazioni non connesse alla rete. Si prevede che essi potranno raggiungere gradualmente costi confrontabili con quelli delle torri solari su larga scala;
- miglioramenti nel progetto, basati sull'esperienza acquisita, potranno ridurre i costi di operazione e di manutenzione (O&M) dal 30 al 50% per tutte le tecnologie.

Il maggiore contributo al costo nei sistemi solari termodinamici si identifica nella fabbricazione dei componenti solari, come ad esempio i concentratori, che rap-

presentano più del 50% del costo di un impianto solare termoelettrico. Ciò è dovuto soprattutto al piccolo volume di produzione attuale e rappresenta la principale barriera all'introduzione nel mercato di tale tecnologia.

A tale riguardo:

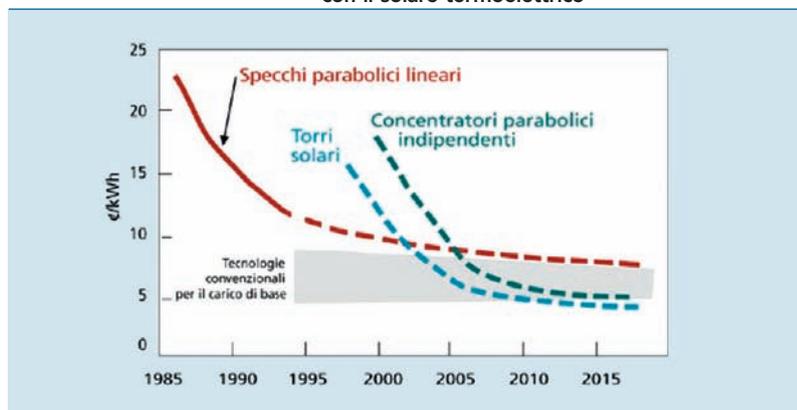
- una domanda forte e sostenuta di questo tipo di sistemi solari permetterà sostanziali economie di scala che dovrebbe ridurre i costi di un fattore almeno quattro rispetto a quelli attuali.
- nuove tecniche di fabbricazione dovrebbero ridurre i costi attuali almeno del 40% senza richiedere grossi capitali di investimento.

I sistemi di produzione termoelettrica solare sono oggi una tecnologia largamente provata, con applicazioni commerciali dall'inizio degli anni ottanta. *Specchi parabolici* lineari sono oggi operativi negli USA con una potenza elettrica complessiva installata di 354 MW. Essi hanno generato ben 6 miliardi di kWh e hanno dimostrato anche la longevità di impianti, specchi ecc.

I costi effettivi e proiettati dalla fase iniziale fino alla realizzazione finale di sistemi maturi, basati su un insieme di semplici stime di costi e volumi di produzione futuri, sono stati prodotti da diverse Agenzie, come ad esempio dal U.S. DOE (1997) e dalla World Bank (1999).

Le stime del DOE sono illustrate nella **figura 9.5**. Questi sono i costi reali confrontati con i bassi costi del kWh da combustibili fossili. Si noti che, grazie a diversi programmi promozionali, si prevede che intorno al 2015 il costo del solare termo-elettrico avrà raggiunto il costo da combustibili fossili.

Una recente proposta di direttiva Europea per l'uso di fonti rinnovabili nella produzione di energia elettrica – all'esame del

Fig. 9.5 Proiezioni del costo dell'energia elettrica prodotta con il solare termoelettrico

Parlamento europeo nei prossimi mesi – fissa un traguardo specifico per ogni paese al 2010: per l'Italia, tale obiettivo è proposto nella misura del 15% escludendo l'idroelettrico di grossa taglia, il che equivale a un aumento di circa il 250% rispetto all'attuale contributo delle rinnovabili "non tradizionali", ovvero, in termini assoluti, ad un incremento di circa 25.000 GWh di produzione annua in dieci anni, quindi una media annua di 2.500 GWh incrementali. Un impianto termoelettrico pilota di 200 MW produce annualmente l'equivalente di circa 500 GWh.

Il solare termoelettrico può rientrare anche nel meccanismo di incentivazione previsto dai fondi strutturali comunitari, in quanto specifico alle Regioni del Mezzogiorno (Obiettivo 1), che godono delle condizioni ambientali di insolazione più favorevoli.

[9.4]

Lo stato attuale delle tecnologie

Attualmente le tecnologie ben sviluppate a livello internazionale su cui imposta-

re il programma nazionale sono quelle di cui si è parlato in precedenza.

Come abbiamo visto, esistono tre fondamentali tipologie di impianti:

- **Specchi parabolici lineari** - Denominati con il termine SEGS, sono usati per focalizzare i raggi solari su un tubo ricevente, posizionato lungo la linea focale dei concentratori. Un mezzo portatore di calore, ad esempio olio, pompato attraverso il tubo ricevente, alimenta una stazione di potenza localizzata centralmente. Il calore solare è trasformato in vapore allo scopo di far funzionare un turbogeneratore elettrico.

- **Torri solari** - Un sistema di specchi che inseguono il moto del sole su doppio asse, chiamati eliostati, riflettono l'energia solare su di un ricevitore montato in cima ad una torre centrale. Il calore solare è raccolto da un fluido, ad esempio un nitrato fuso, che ha anche la funzione di accumulo di energia. Con il calore accumulato nei sali fusi si produce del vapore (565 °C), allo scopo di fare girare un turbogeneratore elettrico.

- **Concentratori parabolici indipendenti** - Consistono in uno specchio parabolico mobile che segue il moto del sole e riflette i raggi solari nel punto focale, dove sono assorbiti dal ricevitore. Il calore assorbito è trasferito (a 750 °C) da un sistema fluido-vapore al motore-generatore, ad esempio un motore lineare tipo Stirling, quantunque altri metodi (Brayton) siano anche utilizzati. Le dimensioni dei singoli moduli possono variare nell'intervallo da 5 a 50 kW elettrici; con una serie di tali concentratori si possono realizzare impianti di qualsiasi taglia e potenza.

Il ruolo dell'ENEA

ENEA ha avviato un programma di ricerca per la realizzazione, dimostrativa su scala industriale, di impianti per la generazione di energia elettrica a partire dall'energia solare attraverso la produzione e l'accumulo del calore a media temperatura (550 °C). Il programma di ricerca sarà orientato agli aspetti più innovativi introdotti nella tecnologia (collettore, ricevitore, accumulo) e prevede:

- circuiti sperimentali (centri ENEA);
- impianto dimostrativo da 0,5 km² (sito da definire).

Completata la fase di sperimentazione verranno realizzati uno o più impianti commerciali di grandi dimensioni nell'Italia Meridionale. La tecnologia individuata è quella del "Solare termico a concentrazione".

Importanti innovazioni progettuali sono state apportate rispetto alle soluzioni oggi presenti sul mercato, con lo scopo di aumentare l'efficienza del sistema, ridurre i costi, ampliare la possibilità di impiego dell'energia prodotta garantendo la generazione anche nelle ore notturne o in condizioni di copertura nuvolosa.

Il progetto ENEA si è largamente ispirato alla tecnologia SEGS su cui sono basati impianti che hanno operato con successo come impianti ibridi solare-gas in America a Kramer Junction.

I miglioramenti apportati riguardano:

- nuovi specchi parabolici per aumentare la robustezza e diminuirne il costo,
- una più elevata temperatura di funzionamento (550 °C) che richiede un nuovo rivestimento selettivo del sistema che assorbe la radiazione concentrata,
- l'uso di un fluido termovettore con minore impatto ambientale e non infiammabile,
- l'introduzione di un grande accumulo

termico a compensare la discontinuità della sorgente solare.

L'impianto dimostrativo dell'ENEA

Considerato il grado d'innovazione introdotto nel progetto dell'impianto, risulta necessario realizzare un impianto dimostrativo, su scala industriale, dove effettuare le sperimentazioni e verificare sul campo la validità delle soluzioni progettuali innovative adottate, per passare poi alla realizzazione dei prototipi dei futuri impianti industriali, col definitivo trasferimento della tecnologia agli operatori commerciali.

Il potenziale tecnico del solare termoelettrico è stato ampiamente provato.

L'obiettivo immediato dell'ENEA è quello di aiutare l'industria nazionale ad utilizzare le possibili nicchie di mercato e nello stesso tempo, a più lungo termine, quello di migliorare la posizione competitiva della nostra industria nella riduzione dei costi dell'energia prodotta con questa tecnologia.

Qualora la nostra industria non fosse sostenuta nella penetrazione nel campo internazionale, estremamente competitivo, della produzione innovativa di energia, essa perderebbe il vantaggio della inevitabile crescita del mercato delle energie rinnovabili. A lungo termine, saremmo costretti, anche in queste tecnologie, ad una pesante dipendenza estera.

Le linee strategiche dell'ENEA sono:

- sostenere le opportunità commerciali a breve termine realizzando, come promotore anche finanziario, impianti dimostrativi di produzione energetica in quantità sensibile al fabbisogno del Paese;
- dimostrare i miglioramenti di qualità e di funzionalità dei componenti e di sistema.

Le attività ENEA si concentreranno su:

- sviluppo di componenti e sistemi in partenariato con l'industria;
- sviluppo di sistemi ibridi per una penetrazione nei mercati emergenti;
- sviluppo di joint ventures con l'industria per la dimostrazione di nuovi sistemi più promettenti;
- sviluppo di piattaforme di prova per sostenere lo sviluppo, la valutazione e le prove a lungo termine;
- risposte alle richieste di consulenze tecniche da parte dell'industria;
- Identificazione delle nuove necessità tecnologiche e valutazione continua dei programmi industriali;
- ridurre i costi al fine di assicurare l'accettabilità della tecnologia del termoelettrico solare (è necessario ridurre drasticamente sia l'investimento iniziale sia i costi di operazione. La costruzione e l'operazione di impianti dimostrativi commerciali dovrebbe permettere di raggiungere ambedue gli obiettivi);
- sviluppare sistemi e applicazioni innovativi con il solare termico con concentratori, per cogliere possibilità interessanti nel campo delle applicazioni non elettriche, come la produzione di idrogeno, reazioni chimiche e calore per processi industriali.

Combattere lo scetticismo contro la diffusione del solare termoelettrico e portare sul mercato italiano tecnologie nuove non è cosa facile. Nel caso del solare termoelettrico, molte delle barriere non possono essere superate solamente con argomenti di carattere tecnico. Tra essi, la riduzione del rischio per ottenere finanziamenti, la politica di incentivazioni fiscali e sul costo dell'energia prodotta, il riconosci-

mento delle ricadute benefiche per l'ambiente giocheranno un ruolo essenziale per assicurare che la tecnologia trovi la dovuta nicchia di mercato.

Il costo del kWh

I costi stimati di produzione di energia termica e energia elettrica con sistemi basati sulla tecnologia ENEA, nelle località italiane a più alta insolazione, per moduli da 400 MW, con un'efficienza di captazione e stoccaggio dell'energia solare incidente prevista pari al 65%, per una vita dell'impianto di 25 anni e tecnologia industrializzata e a scala sufficientemente grande, sono:

- 2,85 \$/GJ per l'energia termica (a 550°C) per l'alimentazione di processi termo-chimici industriali, da confrontare con i costi estrapolati (IEA) al 2020 di 3 \$/GJ da gas naturale (comprese spese di trasporto, mentre a bocca di pozzo sarebbe molto più basso: 0,5 \$/GJ), e di 0,88 \$/GJ da carbone;
- 4 ¢/kWh per l'energia elettrica, da comparare con quello di impianti a polverino di carbone PCSE (*Pulverised Coal Steam Electric*) da 500 MW, con desolforazione, e impianti a gas naturale a ciclo combinato NGCC (*Natural Gas Combined Cycle*) da 400 MW, che producono energia elettrica al costo di circa 3,3 ¢/kWh

Ovviamente l'impianto solare non emette la CO₂ e gli altri inquinanti propri degli impianti a combustibili fossili

Il tempo di ritorno energetico è stimato in sei mesi circa, mentre la vita attesa è di 25-30 anni, dopo i quali la vita dell'impianto potrà certamente essere prolungata operandone un refreshment tecnologico.



Capitolo Dieci



Energia fotovoltaica

[10.1]

La conversione fotovoltaica

La radiazione solare

La sorgente energetica primaria di un sistema fotovoltaico è rappresentata dal Sole, in particolare dalla radiazione solare che investe la Terra. Per radiazione solare si intende l'energia elettromagnetica emessa dal Sole come risultato dei processi di fusione dell'idrogeno in esso contenuto.

Con buona approssimazione il Sole può considerarsi come un perfetto emettitore di radiazioni (*black body*) ad una temperatura di circa $5.800 \text{ }^\circ\text{K}$.

La distanza media tra il Sole e la Terra è di circa $1,5 \cdot 10^8 \text{ km}$ e il diametro del Sole è di circa $3 \cdot 10^5 \text{ km}$ pertanto, considerato l'elevato valore del rapporto distanza/diametro, alla suddetta distanza la radiazione solare vista dalla Terra appare come un fascio ben collimato con una dispersione angolare di circa mezzo grado.

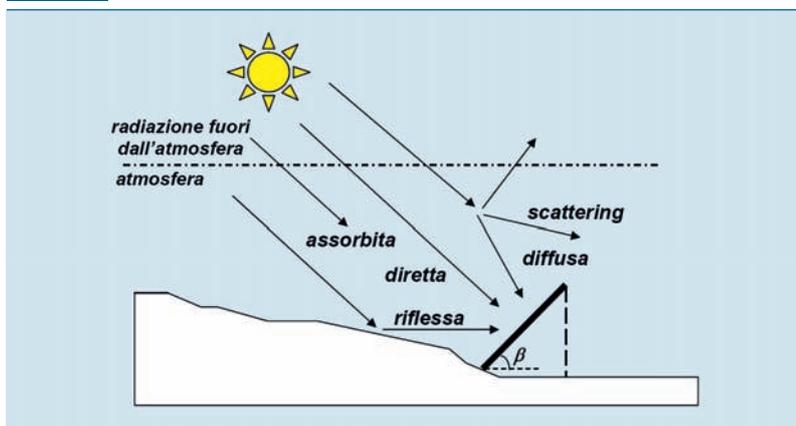
La radiazione solare copre un ampio campo di lunghezze d'onda, e quindi di energie, con una distribuzione spettrale dall'infrarosso (IR) all'ultravioletto (UV) in un intervallo di lunghezze d'onda compreso tra $0,2$ e $2,5 \text{ } \mu\text{m}$, con un punto di massimo nel campo del visibile (da $0,38$ a $0,78 \text{ } \mu\text{m}$) intorno a $0,5 \text{ } \mu\text{m}$. La sua penetrazione attraverso l'atmosfera è molto selettiva e in pratica giungono alla Terra

soltanto le radiazioni del campo visibile; infatti le radiazioni ultraviolette sotto $0,3 \text{ } \mu\text{m}$ (che sono dannose per l'organismo umano) vengono arrestate, ad una altezza di 25 km , dalla fascia di ozono atmosferico mentre le radiazioni infrarosse sono bloccate dal vapore d'acqua e dall'anidride carbonica. Pertanto se consideriamo anche il fenomeno di riflessione nello spazio da parte dell'atmosfera e delle nubi, la radiazione solare che arriva sulla superficie terrestre è pari a circa il 47% di quella potenzialmente disponibile. La banda di sensibilità dipende dal tipo di cella solare utilizzata; in particolare per le celle al silicio è compresa tra $0,4$ - $1,1 \text{ } \mu\text{m}$.

È opportuno osservare che l'intensità dell'irraggiamento disponibile al suolo e la sua distribuzione spettrale dipendono oltre che dalle condizioni ambientali anche dalla massa d'aria attraversata dalla radiazione solare (*AM*, *Air Mass*).

La *densità di potenza* I_n , raccolta fuori dell'atmosfera terrestre su di una superficie normale alla radiazione solare, è definita "costante solare" e assume un valore pari a circa 1366 W/m^2 .

Per tener conto degli effetti dovuti alla presenza dell'atmosfera, viene definita la massa d'aria unitaria *AM1* (*Air Mass One*) come lo spessore di atmosfera standard attraversato dalla radiazione solare in direzione normale alla superficie terrestre e misurato al livello del mare con cielo lim-

Fig. 10.1 Componenti della radiazione solare raccolta al suolo

pido e pressione dell'aria pari ad 1,013 bar (1 atm).

Il valore massimo della costante solare, misurato sulla superficie terrestre in presenza di una giornata limpida e soleggiata, è di circa 1.000 W/m^2 . La sua variazione a causa dell'ellitticità dell'orbita terrestre è percentualmente assai modesta essendo contenuta entro il $\pm 3\%$ del valore medio. In generale la potenza complessiva proveniente da una sorgente radiante che investe una superficie di area unitaria è detta *irradianza*.

Nell'attraversare l'atmosfera terrestre la radiazione solare incidente sulla Terra viene in parte assorbita dall'atmosfera, in parte riflessa nello spazio esterno e in parte diffusa dall'atmosfera stessa.

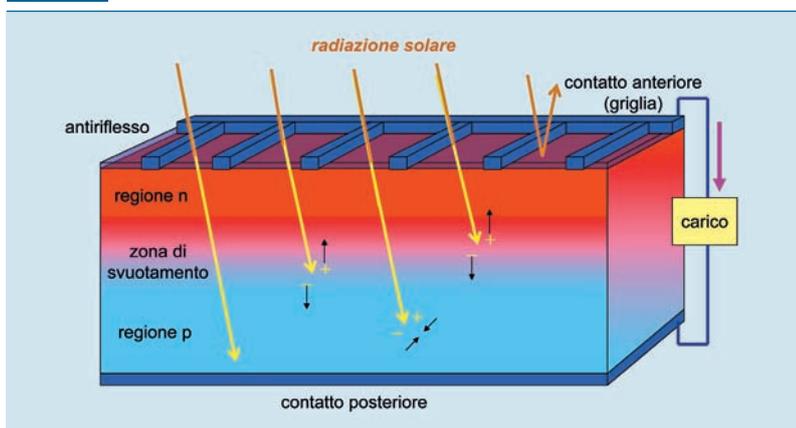
Nella figura 10.1 sono indicate le diverse componenti della radiazione solare raccolta al suolo su una superficie inclinata rispetto al piano orizzontale.

L'effetto fotovoltaico

L'effetto fotovoltaico consiste nella conversione diretta della radiazione solare in energia elettrica. Tale fenomeno avviene nella cella fotovoltaica, tipicamente costituita da una sottile lamina di un materiale semiconduttore, solitamente silicio.

Quando un fotone, dotato di sufficiente energia, viene assorbito nel materiale semiconduttore di cui la cella è costituita, si crea una coppia di cariche elettriche di segno opposto, un "elettrone", avente carica negativa, e una "lacuna", di carica positiva (fig. 10.2), "disponibili per la conduzione di elettricità".

Per generare effettivamente una corrente elettrica, però, è necessaria una differenza di potenziale, e questa viene creata grazie all'introduzione di piccole quantità di impurità nel materiale che costituisce le celle. Queste impurità, chiamate anche "droganti", sono in grado di modificare profondamente le proprietà elettriche del semiconduttore. Se il materiale semiconduttore, come comunemente accade, è il silicio, introducendo atomi di fosforo, si ottiene la formazione di silicio di tipo "n", caratterizzato da una densità di elettroni liberi (cariche negative) più alta di quella presente nel silicio normale (intrinseco). La tecnica del drogaggio del silicio con atomi di boro porta, invece, al silicio di tipo "p" in cui le cariche libere in eccesso sulla norma sono di segno positivo.

Fig. 10.2 Struttura della cella fotovoltaica

Una cella fotovoltaica richiede l'intimo contatto, su una grande superficie, di due strati di silicio p e n (fig. 10.2). Nella zona di contatto tra i due tipi di silicio, detta "giunzione p-n", si ha la formazione di un forte campo elettrico.

Le cariche elettriche positive e negative, generate per effetto fotovoltaico dal bombardamento dei fotoni costituenti la luce solare, nelle vicinanze della giunzione vengono separate dal campo elettrico. Tali cariche danno luogo a una circolazione di corrente quando il dispositivo viene connesso ad un carico. La corrente è tanto maggiore quanto maggiore è la quantità di luce incidente.

Ai fini del funzionamento delle celle, i fotoni di cui è composta la luce solare non sono tutti equivalenti (fig. 10.3): per poter essere assorbiti e partecipare al processo di conversione, un fotone deve possedere un'energia ($h\nu$) superiore a un certo valore minimo, che dipende dal materiale di cui è costituita la cella (E_g). In caso contrario, il fotone non riesce ad innescare il processo di conversione.

La cella fotovoltaica: efficienza di conversione

La cella fotovoltaica può utilizzare solo una parte dell'energia della radiazione solare incidente. L'energia sfruttabile dipende dalle caratteristiche del materiale di cui è costituita la cella: l'efficienza di conversione, intesa come percentuale di energia luminosa trasformata in energia elettrica disponibile per celle commerciali al silicio è in genere compresa tra il 12% e il 17%, mentre realizzazioni speciali di laboratorio hanno raggiunto valori del 24%.

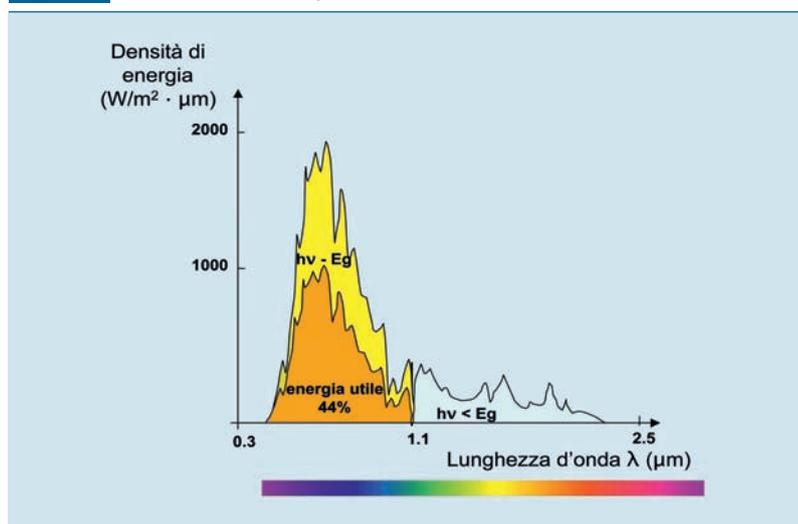
L'efficienza di conversione di una cella solare è limitata da numerosi fattori, alcuni dei quali di tipo fisico, cioè dovuti al fenomeno fotoelettrico e pertanto assolutamente inevitabili, mentre altri, di tipo tecnologico, derivano dal particolare processo adottato per la fabbricazione del dispositivo fotovoltaico.

Le cause di inefficienza sono essenzialmente dovute al fatto che:

- non tutti i fotoni posseggono un'energia sufficiente a generare una coppia elettrone-lacuna;
- l'eccesso di energia dei fotoni non genera corrente ma viene dissipata in calore all'interno della cella;
- non tutti i fotoni penetrano all'interno della cella, in parte vengono riflessi;
- una parte della corrente generata non fluisce al carico ma viene shuntata all'interno della cella;
- solo una parte dell'energia acquisita dall'elettrone viene trasformata in energia elettrica;
- non tutte le coppie elettrone-lacuna generate vengono separate dal campo elettrico di giunzione, una parte si ricombina all'interno della cella;
- la corrente generata è soggetta e perde conseguenti alla presenza di resistenze serie.

Fig. 10.3

Spettro della radiazione solare



I film sottili

Questa tecnologia sfrutta la deposizione (ad esempio su vetro) di un sottilissimo strato di materiali semiconduttori, in pratica silicio amorfo e alcuni semiconduttori composti policristallini quali il diseleniuro di indio e rame (CuInSe_2) e il telluriuro di cadmio (CdTe).

Tale tecnologia punta sulla riduzione del costo della cella e sulla versatilità d'impiego (ad esempio la deposizione su materiali da utilizzare quali elementi strutturali delle facciate degli edifici), anche se resta da superare l'ostacolo rappresentato dalla bassa efficienza e dall'instabilità iniziale. Questa tecnologia potrebbe rappresentare la carta vincente per trasformare il fotovoltaico in una fonte energetica in grado di produrre energia su grande scala.

La tecnologia a film sottile può risolvere il problema dell'approvvigionamento del materiale, in quanto, comportando un consumo di materiale molto limitato, pari a circa 1/200 di quello richiesto per la tecnologia del silicio cristallino (in questo caso la "fetta" ha uno spessore ridottissimo dell'ordine di pochi micron), potrebbe permettere lo sviluppo di processi produttivi dedicati, che non dipendano dall'industria elettronica.

Inoltre, utilizzando questa tecnologia è possibile ottenere moduli leggeri e flessibili, fabbricare il modulo con un unico processo e avere la possibilità di realizzare celle tandem.

Il processo di fabbricazione prevede infatti la deposizione su un substrato (tipicamente vetro) di un sottilissimo strato di materiale trasparente e conduttore (ad es. ossido di stagno).

Tale strato viene parzialmente asportato ottenendo in tal modo una serie di elettrodi che costituiscono i contatti anteriori delle singole giunzioni p-n. Successivamente viene depositato in sequenza il silicio amorfo di tipo p, intrinseco e di tipo n. Anche in seguito al deposito del silicio amorfo si procede alla parziale asportazione del materiale (mediante laser sputtering) in modo da realizzare una serie di giunzioni p-n. Infine, tramite deposizione e parziale asportazione di alluminio o argento viene realizzata una nuova serie di elettrodi che costituiscono i contatti posteriori delle giunzioni. In questo modo, mediante un unico processo che prevede varie sequenze di deposizione e di asportazione di materiale si realizza un insieme di giunzioni p-n collegate in serie fra loro che costituiscono l'intero modulo.

Potenzialmente i film sottili hanno un costo inferiore al silicio cristallino, sia per la maggiore semplicità del processo realizzativo, sia per il minor *pay-back time*, periodo di tempo che il dispositivo fotovoltaico impiega a produrre (restituire) l'energia spesa per realizzarlo. Per le celle al silicio cristallino il *pay-back time* è di circa 3,2 anni mentre per quelle a film sottile è pari a circa 1,5 anni.

La tecnologia del silicio

Attualmente il materiale più usato è lo stesso silicio adoperato dall'industria elettronica, il cui processo di fabbricazione presenta costi molto alti, non giustificati dal grado di purezza richiesti dal fotovoltaico, che sono inferiori a quelli necessari in elettronica.

Il processo più comunemente impiegato per ottenere silicio monocristallino per uso elettronico parte dalla preparazione di silicio metallurgico (puro al 98% circa), mediante riduzione della silice (SiO_2) con carbone in forni ad arco.

Dopo alcuni processi metallurgici intermedi consistenti nella:

- purificazione del silicio metallurgico a silicio elettronico (processo Siemens);
- conversione del silicio elettronico a silicio monocristallino (metodo Czochralski) vengono ottenuti lingotti cilindrici (da 13 a 30 cm di diametro e 200 cm di lunghezza) di silicio mono cristallino, solitamente drogato p mediante l'aggiunta di boro. Questi lingotti vengono quindi "affettati" in wafer di spessore che va da 0,25 a 0,35 mm.

Da alcuni anni l'industria fotovoltaica sta sempre più utilizzando il silicio policristallino, che unisce ad un grado di purezza comparabile a quello del monocristallino costi inferiori. I lingotti di policristallino, anch'essi di solito drogati p, sono a forma di parallelepipedo e vengono sottoposti al taglio, per ottenerne fette di $0,2 \div 0,35$ mm di spessore.

Le nuove tecnologie, i film sottili, la terza generazione

Gli sforzi della ricerca e delle industrie fotovoltaiche sono mirati alla riduzione dei costi di produzione e al miglioramento dell'efficienza di conversione attraverso la realizzazione di celle innovative e lo

La terza generazione

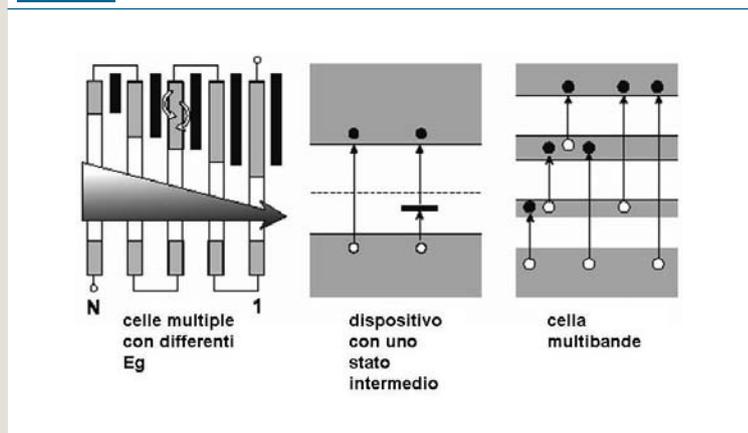
Studi teorici su materiali non convenzionali (*intermediate band PV*, ottenuti inserendo nella struttura del cristallo un metallo di transizione tipo Ti) mostrano la possibilità di ottenere efficienze pari al 63% mentre altri su molecole di materiali discotici, capaci di aggregarsi in modo da favorire una elevata mobilità di cariche, ne evidenziano la potenziale applicazione nel fotovoltaico.

A livello di celle tandem vengono investigati vari aspetti (*high bandgap top cell on TCO*, *tunnel junction*, impatto delle proprietà del TCO) i cui modelli forniscono valori di efficienza intorno al 25%. In pratica i risultati conseguiti si aggirano intorno a efficienze dell'8,8%

Per quanto riguarda le celle *dye-sensitized* sono state investigate alcune strutture, in cui è stato ottimizzato il foto-elettrodo, che hanno fornito valori di efficienza pari a 7,9%. Sono stati inoltre evidenziati i vantaggi (rispetto alle celle di tipo tradizionale Gratzel) nel realizzare dispositivi con due anodi (TiO_2) e un catodo metallico intermedio.

Fig. 10.4

Opzioni e principi della terza generazione



Nel campo dei TCO vengono studiati nuovi ossidi semiconduttori trasparenti basati su chemical bonding.

I materiali emergenti per la realizzazione di nuove celle riguardano l'ossido di indio depositato mediante radio frequenza, il solfuro di stagno (che ha caratteristiche di semiconduttore di tipo P) e il $\beta\text{-FeSi}$ per il suo coefficiente di assorbimento.

Vengono inoltre studiati alcuni approcci per l'innalzamento dell'efficienza riguardanti il termofotonico e la conversione *up and down*. Il termofotonico riesce a superare lo svantaggio del termofotovoltaico ricorrendo ad un led estremamente selettivo con una elevata efficienza quantica. La conversione *up and down* implica l'adattamento dello spettro alle caratteristiche della cella. Per celle a giunzione singola in combinazione con la conversione *up and down* è stata calcolata un'efficienza pari al 35%.

studio e la sperimentazione di nuovi materiali.

In ordine alla fabbricazione di celle innovative, sono stati messi a punto, ad esempio, procedimenti per il taglio delle fette di materiale semiconduttore di grande area (400 cm^2) e di piccola spessore ($0,15\text{ mm}$) che rendano minimi sia i quantitativi richiesti, sia gli sprechi di materia prima. Riguardo ai nuovi materiali si è puntato a sviluppare varie tecnologie, basate su diversi materiali, semplici e composti. Le più rilevanti sono il silicio cristallino di grado solare, i "film sottili" e i dispositivi di terza generazione.

In particolare, nel silicio di grado solare è prevista la purificazione del silicio metallurgico, anziché attraverso i costosi processi Siemens e Czochralskj, mediante processi a basso contenuto energetico e a basso costo. La disponibilità di questo materiale, a differenza del silicio di grado elettronico, è praticamente illimitata. Con il silicio di grado solare, essendo caratterizzato da un minor grado di purezza rispetto a quello elettronico, è possibile inoltre realizzare celle con efficienza dell'11-13%.

Moduli fotovoltaici e stringhe

Il modulo fotovoltaico, l'elemento base degli impianti, è costituito da celle fotovoltaiche collegate elettricamente tra di loro e incapsulate al fine di garantire:

- protezione agli agenti atmosferici
- isolamento elettrico
- supporto strutturale (protezione meccanica).

Fra le caratteristiche dell'incapsulante si evidenzia l'importanza della stabilità ai raggi ultravioletti, la tolleranza alle temperature, la capacità di smaltire il calore e l'autopulizia.

Al fine di minimizzare i costi di impianto

in relazione alle superfici disponibili, i moduli devono essere scelti in modo da avere, compatibilmente con i costi, valori di efficienza pari a quelle dei migliori prodotti attualmente in commercio. Oltre ai valori di efficienza dei moduli al silicio cristallino riportati in precedenza, si ricorda che i moduli al silicio amorfo sono caratterizzati da un'efficienza pari a circa l'8% mentre quella degli altri film sottili si aggira attorno al 10%.

Nell'optare fra cristallino e film sottili può essere utile tener presente i pro e i contro delle due tecnologie.

In particolare il cristallino è caratterizzato da una tecnologia matura e affidabile, con una vita utile testata in campo maggiore di 25 anni. I valori dei rendimenti sono discreti e viene registrato un continuo progresso. Per contro il margine di riduzione dei costi si va sempre più assottigliando e comincia a scarseggiare la disponibilità del materiale di base per la realizzazione dei dispositivi.

Per quanto riguarda invece i film sottili, essi hanno il vantaggio di essere adatti per l'architettura nel senso che sono flessibili, consentono di realizzare tegole e lamiera grecate o conseguire effetti di trasparenza per finestre o facciate di edifici. Inoltre, hanno ampi spazi di riduzione dei costi e maggiore producibilità a parità di potenza. Per contro, la vita utile è non ancora stata testata, presentano fenomeni di degrado nelle prime 100 ore di esposizione, il rendimento è basso con un lento progresso tecnologico.

Più moduli, collegati elettricamente in serie in modo da fornire la tensione richiesta, formano una stringa.

Le stringhe sono costituite dalla serie di singoli moduli fotovoltaici, tutti della stessa classe di corrente al fine di minimizzare le perdite per mismatch.

Il numero di moduli da collegare in serie per formare una stringa dipende dalla tensione del modulo (nota una volta individuato il tipo di prodotto) e da quella dell'intera stringa che viene scelta in base alle considerazioni di seguito riportate.

Occorre innanzitutto precisare che la stringa è caratterizzata da:

- tensione massima pari alla somma delle V_{oc} dei moduli collegati, che corrisponde alla tensione a cui si porta la stringa quando è scollegata dall'inverter o dai carichi (tensione a vuoto);
- tensione di funzionamento pari alla tensione nel punto di massima potenza (V_m) della caratteristica della stringa (o dalla tensione nel punto di incontro delle caratteristiche tensione-corrente della stringa e della batteria).

Ciò premesso, la scelta della tensione di stringa va effettuata in funzione di:

- parametri che influenzano la tensione: V_{oc} e V_m variano in modo inverso con la temperatura dei moduli FV ($-2,2$ mV/°C/cella) e in modo diretto e logaritmico con l'irraggiamento incidente sui moduli fotovoltaici;
- limiti di sicurezza: al fine di classificare l'impianto come sistema di bassa tensione, le norme CEI fissano il limite a $1.500 V_{DC}$ (e il DPR 547 a $600 V_{DC}$);
- correnti di stringa per le quali dovrà essere dimensionato il generatore: a parità di potenza le correnti aumentano con il diminuire della tensione;
- inverter: la tensione va scelta all'interno della finestra di tensione ammessa;
- dispositivi d'interruzione: alte tensioni implicano il ricorso a dispositivi speciali con aggravio dei costi;
- modulo fotovoltaico: è caratterizzato da una tensione massima ammessa verso massa pari tipicamente a $1.000 V$.

Sistemi a tensione più elevata richiedono

il punto centrale a terra, che garantisce al singolo modulo di trovarsi con tensione verso massa pari alla metà rispetto al sistema floating. Lo svantaggio principale del punto centrale a terra consiste nel fatto che il primo guasto a terra dà luogo ad un corto circuito, pertanto è necessario interrompere il servizio.

Più stringhe collegate, generalmente in parallelo, per fornire la potenza richiesta, costituiscono il *campo* o *generatore fotovoltaico*.

Il generatore fotovoltaico, il sistema di controllo e condizionamento della potenza (inverter) e altri dispositivi accessori di interfacciamento alla rete o al sistema di accumulo costituiscono l'impianto fotovoltaico.

Il degrado dei moduli

Sono state effettuate misure (ENEA) volte a verificare il decadimento delle prestazioni di lotti di moduli fotovoltaici al silicio monocristallino, che si trovano da oltre 25 anni in esposizione continua alla radiazione solare. Il tempo trascorso consente di fare considerazioni sul tempo di vita dei moduli fotovoltaici. Questa stima, solitamente, viene effettuata in laboratorio mediante una serie di test che sottopongono i moduli a stress ambientali particolarmente gravosi, tipicamente cicli termici accelerati in ambienti ad elevato grado di umidità, estrapolando poi i risultati ottenuti al fine di prevedere il comportamento dei moduli nelle reali condizioni operative.

Il degrado in termini di efficienza, se riferita alla misura fatta all'accettazione dei moduli, è stata dell'8,4% negli ultimi 22 anni. Il tasso di degradazione è quindi risultato praticamente costante durante tutti i 22 anni e risulta circa pari allo 0,4% annuo.

Per ciò che concerne i difetti riscontrati sui moduli fotovoltaici, va precisato che alcuni di questi presentano fessurazioni sul tedlar posteriore, altri, appartenenti ad una serie diversa dello stesso modello di modulo, hanno il foglio di tedlar, a copertura del back di alluminio, quasi completamente distaccato. Va comunque detto che i difetti sul tedlar non hanno prodotto conseguenze negative sulla prestazione dei moduli fotovoltaici, infatti non è stata notata alcuna significativa degradazione di efficienza, essendo questa in linea con quella media misurata.

Lo stesso discorso vale per quei moduli che appaiono ingialliti o che mostrano le griglie di raccolta delle cariche parzialmente arrugginite. Le scatole di giunzione sono apparse in ottime condizioni, solo in una era entrata acqua, probabilmente per un cattivo serraggio fatto in precedenza. Dal campione di 59 moduli testati solo uno è risultato interrotto (tale modulo nel 1991 aveva comunque fornito un valore di efficienza inferiore alla media); risulta un tasso di mortalità dei moduli dell'1,7% circa.

[10.2]

Il sistema fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico, un sistema cioè in grado di raccogliere l'energia luminosa, convertirla in energia elettrica in forma utile all'utenza e trasferirla alla rete utente o alla rete di distribuzione, il tutto in condizioni di assoluta sicurezza nei riguardi dell'utente e della rete elettrica di distribuzione, è costituito dai seguenti sottosistemi:

- il campo o generatore fotovoltaico;
- le strutture di sostegno moduli;
- il sistema di conversione della potenza;
- il sistema di interfaccia rete.

Il campo o generatore fotovoltaico

Un "campo fotovoltaico" è costituito (fig. 10.5) da un insieme di stringhe di moduli fotovoltaici installati meccanicamente nella sede di funzionamento e connesse elettricamente tra loro. Dal punto di vista elettrico il campo FV costituisce il "generatore fotovoltaico" dell'impianto. Il campo FV poi, nel caso di potenze significative, è costituito da sub campi (collegamento elettrico in parallelo di un certo numero di stringhe).

La potenza nominale (o massima, o di picco) del generatore fotovoltaico è la potenza determinata dalla somma delle singole potenze nominali (o massima, o di picco) di ciascun modulo costituente il generatore fotovoltaico, misurate alle condizioni standard (STC, *Standard Test Conditions*).

Per Condizioni Standard (STC) si intendono le condizioni di riferimento per la misurazione dei moduli:

- irraggiamento a 1.000 W/m^2 ;
- spettro solare riferito ad un Air Mass di 1,5;
- temperatura di cella di $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tipicamente questa misura viene eseguita in laboratorio con un simulatore solare in quanto è molto difficile riprodurre queste condizioni in un ambiente esterno.

Le caratteristiche del generatore fotovoltaico vengono in genere definite mediante due parametri elettrici: la potenza nominale P_n e cioè la potenza erogata dal generatore FV in condizioni standard (STC) e la tensione nominale V_n ossia la tensione alla quale viene erogata la potenza nominale.

Nella fase di progettazione di un campo fotovoltaico riveste una particolare importanza la scelta della tensione nominale di esercizio. Infatti, le elevate correnti che si manifestano per piccole tensioni comportano la necessità di adottare cavi di maggiore sezione e dispositivi di manovra più complessi; di contro elevate tensioni di lavoro richiedono adeguate e costose protezioni. Pertanto, un'opportuna scelta della configurazione serie/parallelo del campo fotovoltaico consente di limitare le perdite e di incrementare l'affidabilità del sistema.

In figura 10.6 viene mostrata la configurazione tipica di un generatore fotovoltaico, dove più moduli sono collegati in serie per formare una stringa e più stringhe sono connesse in parallelo per costituire il campo. Nello schema è possibile osservare la presenza dei diodi di by-pass (D_{bp}) disposti in parallelo ai singoli moduli e del diodo di blocco (D_b) posto in serie a ciascuna stringa idoneo ad impedire che gli squilibri di tensione tra le singole stringhe, nel caso di sbilanciamento nell'erogazione di potenza da parte delle stesse, possano dar luogo alla circolazione di una corrente inversa verso le stringhe a tensione minore.

I diodi di blocco, dimensionati sulla base delle specifiche elettriche del campo foto-

Figura 10.5

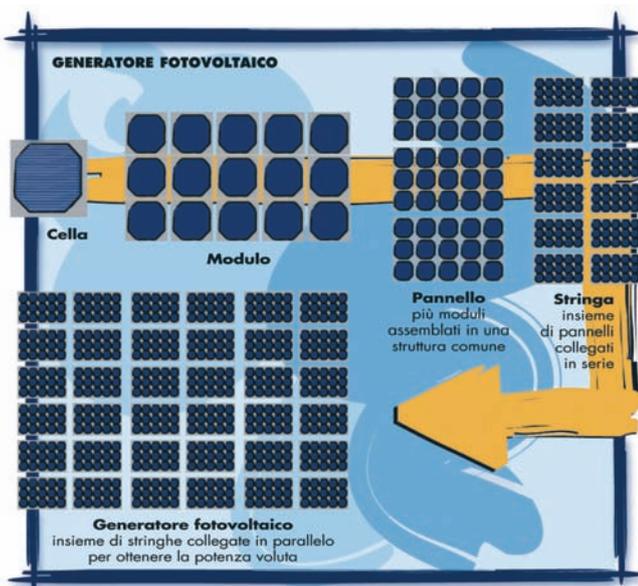
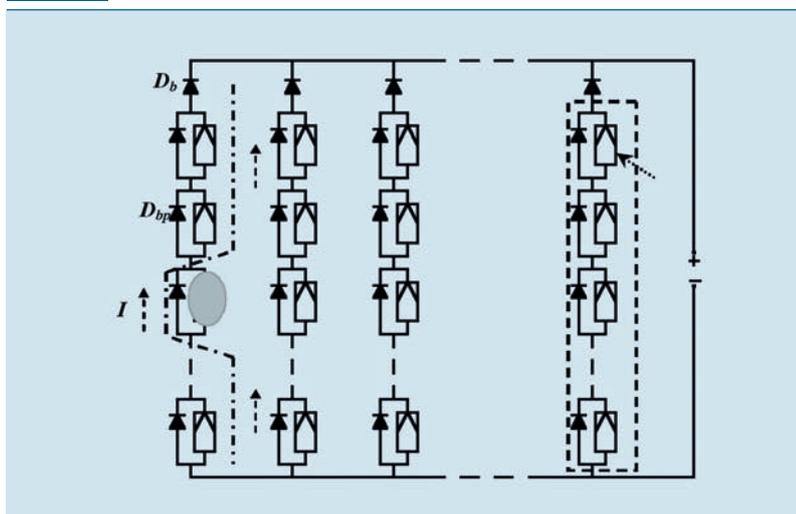


Fig. 10.6 Configurazione elettrica tipica di un campo fotovoltaico


voltaico (corrente di cortocircuito del modulo I_{sc} , tensione a vuoto della stringa V_{oc}), sono generalmente contenuti all'interno del quadro di parallelo stringhe il quale raccoglie il contributo elettrico fornito dalle singole stringhe. Il diodo di bypass consente di cortocircuitare e quindi isolare il singolo modulo, o parte di esso in presenza di due o più diodi per modulo, nel caso di un malfunzionamento, limitando in tal modo la brusca riduzione della potenza erogata dal modulo e/o dalla stringa che si manifesterebbe in sua assenza. Infine, è opportuno ricordare che l'energia prodotta da un generatore fotovoltaico è proporzionale alla quantità di radiazione solare raccolta sul piano dei moduli. Infatti, questi ultimi al fine di ottimizzare la produzione di energia elettrica vengono orientati verso sud (angolo di azimuth uguale a zero) con un'inclinazione rispetto al piano orizzontale (angolo di tilt) prossima alla latitudine del sito di installazione, in modo tale da rendere massima l'energia solare raccolta sulla loro superficie.

Le strutture di sostegno moduli

Si tratta di sistemi costituiti dall'assemblaggio di profili, generalmente metallici, in grado di sostenere i moduli fotovoltaici, ancorarli al suolo o ad una struttura edile preesistente e ottimizzarne l'esposizione. Si distinguono in struttura a cavalletto, a palo e per l'integrazione o il *retrofit*.

In particolare le strutture di sostegno devono essere calcolate per resistere alle seguenti sollecitazioni di carico permanente costituite dal:

- peso delle strutture, che dipende dalle dimensioni e dai materiali costituenti i profilati e la bulloneria,
- peso delle zavorre, che dipende dalle dimensioni e dal materiale,
- peso dei moduli, generalmente fornito dal costruttore,

e alle sollecitazioni accidentali dovute ai sovraccarichi quali il carico da neve, la spinta del vento, gli effetti sismici sulla struttura.

Il sistema di conversione e controllo della potenza: inverter

La caratteristica di variabilità di tensione e corrente in uscita dal generatore fotovoltaico al variare dell'irraggiamento solare mal si adatta alle specifiche dell'utenza, che richiede corrente in alternata, per alimentare direttamente il carico o per il collegamento alla rete elettrica di distribuzione, nonché un valore costante per la tensione in uscita dal generatore.

Nei sistemi fotovoltaici il generatore è quindi collegato, a seconda dei casi, alla batteria, agli apparecchi utilizzatori o alla rete, tramite un sistema di controllo e condizionamento della potenza.

L'inverter raggruppa in un unico apparecchio i dispositivi elettronici deputati a:

- conversione energia elettrica da DC a AC;

- inseguimento del punto di massima potenza;

- interfaccia verso la rete di distribuzione. Il convertitore DC/AC è un dispositivo che converte la corrente continua in corrente alternata. Questo dispositivo assume il ruolo di sistema di condizionamento e controllo della potenza erogata dal generatore. Esso infatti, a fronte della variabilità dei parametri tensione e corrente erogati dal campo in dipendenza delle condizioni di irraggiamento solare e della temperatura delle celle FV, si adopera, funzionando come un trasformatore in corrente continua con rapporto di trasformazione variabile, per fornire un valore costante per la tensione in uscita dal generatore FV.

L'inseguitore del punto di massima potenza MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) è un dispositivo convertitore DC/DC ad alta efficienza, interno all'inverter, che esercita la funzione d'interfaccia tra l'utilizzatore e il generatore fotovoltaico; esso fa sì che il generatore fotovoltaico veda sempre ai suoi capi un carico ottimale per cedere il massimo della potenza. Esso varia il suo punto di lavoro in modo da estrarre dal generatore, istante per istante, la massima potenza disponibile.

I convertitori statici di potenza utilizzati negli impianti fotovoltaici consentono di convertire le grandezze elettriche in corrente continua di uscita del generatore fotovoltaico in grandezze alternate idonee per il trasferimento dell'energia ad una rete o utenza in corrente alternata. La conversione da corrente continua in corrente alternata viene realizzata tramite un "ponte di conversione" il quale utilizza dispositivi semiconduttori, generalmente IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) o MOSFET (*Metal-Oxide Semiconductor*

Field Effect Transistor), pilotati con sequenze di impulsi di comando controllati. Nella maggior parte degli inverter commerciali la commutazione del ponte avviene ad una frequenza superiore di quella di rete (qualche decina di migliaia di Hz) mediante la tecnica PWM (*Pulse Width Modulation*) di modulazione della durata degli impulsi, la quale consente di generare una successione di treni di impulsi di durata proporzionale al valore, assunto in quell'istante, dell'onda sinusoidale richiesta.

Negli impianti fotovoltaici connessi ad una rete elettrica di distribuzione (*grid-connected*) la tensione continua da convertire in alternata è quella generata dal campo fotovoltaico, mentre nei sistemi isolati con accumulo (*stand-alone*) è quella presente nel nodo di generazione campo fotovoltaico-sistema di accumulo. Gli inverter per sistemi connessi a rete sono sempre provvisti del dispositivo di inseguimento del punto di massima potenza MPPT il quale consente al convertitore di variare la propria impedenza di ingresso per assumere quella necessaria a realizzare il massimo trasferimento di potenza all'utilizzatore. Questa funzione viene svolta generalmente da un primo ponte di conversione DC/DC per mezzo di una unità di controllo a microprocessore. In particolare, viene regolata la tensione o la corrente di uscita (a seconda delle tecniche utilizzate) in modo tale che l'inverter sia visto dalla rete, nel primo caso, come un generatore di tensione che regola il suo angolo di carico (sfasamento tra le tensioni del generatore e di rete) per trasferire la massima potenza, e nel secondo caso, come un generatore di corrente che inietta in rete una corrente proporzionale alla massima potenza trasferibile. Un secondo stadio di conversione DC/AC,

sincronizzato con la frequenza di rete, provvede a fornire la potenza di uscita con le caratteristiche desiderate di tensione e frequenza. Nel caso in cui non sia necessario realizzare un particolare "adattamento di tensione" tra l'ingresso (lato generatore FV) e l'uscita (lato carico o rete), le azioni di controllo dell'MPPT e di regolazione delle grandezze di uscita (tensione e corrente) possono essere entrambe effettuate mediante un unico stadio di conversione DC/AC.

A valle dello stadio di conversione finale sono sempre presenti una sezione di filtraggio delle armoniche di corrente iniettate in rete e i dispositivi di protezione di interfaccia lato carico (generalmente dispositivi di massima e minima tensione, massima e minima frequenza, massima corrente) idonei a soddisfare le prescrizioni per il collegamento alla rete elettrica stabilite dalle norme tecniche di riferimento. Lo schema a blocchi di principio di un convertitore idoneo ad essere connesso alla rete elettrica è riconducibile in generale a quello riportato in figura 10.7.

Gli inverter per sistemi *stand-alone* sono costituiti da un ponte di conversione, generalmente con trasformatore a valle, e

da un regolatore interno in grado di assicurare valori costanti di tensione e frequenza di uscita al variare della tensione continua di ingresso entro un campo di valori stabilito. Allo stadio di conversione fa seguito una sezione di filtraggio delle armoniche e un'altra comprendente i dispositivi di protezione lato carico.

Per quanto riguarda il *sistema di interfaccia rete*, la CEI 11-20 costituisce il principale riferimento normativo. Con la prescrizione DK 5940 - 02/2006, ENEL considera la possibilità di far allacciare alla propria rete di distribuzione in BT gli impianti di produzione fino ad una potenza nominale complessiva non superiore a 75 kW: "La scelta del livello di tensione cui allacciare un produttore dipende dalla potenza dell'impianto di produzione e da quella dei carichi passivi e di altri impianti di produzione presenti sulla stessa rete. Generalmente gli impianti di produzione di potenza nominale complessiva ≤ 50 kW vengono allacciati alla rete di BT ed allacciati alla rete di MT se di potenza nominale complessiva superiore a 75 kW". Per potenze minori di 6 kW è ammesso l'allacciamento in monofase. Inoltre, se l'impianto è collegato in MT con un trasformatore e la potenza dell'impianto è minore del 2% della potenza del trasformatore, possono essere applicate le prescrizioni per il collegamento in BT.

Gli impianti devono comprendere sempre il sistema di interfacciamento alla rete, costituito da una protezione interposta tra l'inverter e la rete al fine di salvaguardare la qualità del servizio elettrico e evitare pericoli per le persone e danni alle apparecchiature. Gli impianti fotovoltaici non devono concorrere al mantenimento della tensione e frequenza di rete (effetto isola) e devono poter essere staccati in qualsiasi momento senza pregiudizio per la con-

Fig. 10.7 Schema a blocchi generico di un convertitore DC/AC

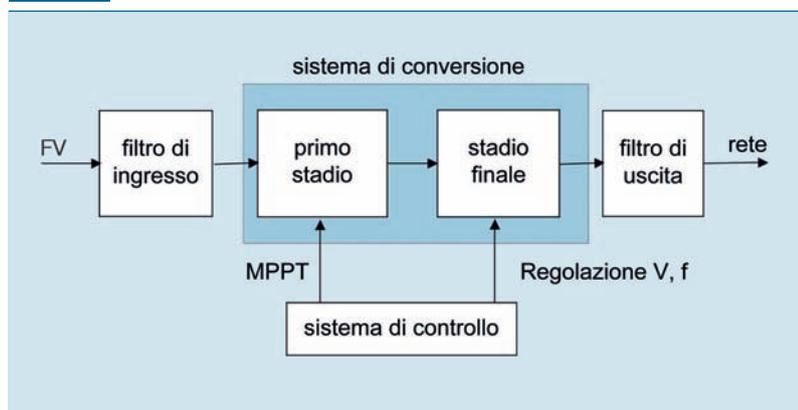
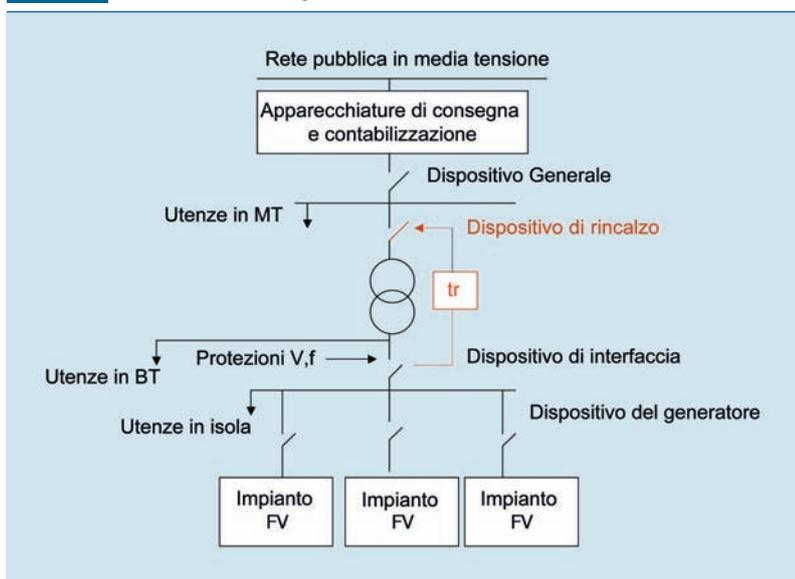


Fig. 10.8 Collegamento alla rete in media tensione

tinuità del servizio elettrico. In particolare, per eliminare il sostentamento della rete da parte dell'inverter, in assenza di alimentazione della principale si utilizzano protezioni basate sul monitoraggio della rete che intervengono per valori fuori soglia di tensione e frequenza di rete.

Nel caso però di valori di potenza attiva/reattiva erogata dall'inverter prossimi a quelli assorbiti dal carico, si può verificare che la tensione e la frequenza restino all'interno della soglia di intervento delle protezioni, con conseguente mancato spegnimento dell'inverter. Per evitare tale condizione vengono adottate protezioni aggiuntive che intervengono in caso di brusca variazione dell'impedenza di rete. In un sistema funzionante in parallelo alla rete, si distinguono 3 dispositivi di protezione (fig. 10.8):

- generale, che interviene per guasto del sistema fotovoltaico o dell'impianto di utente;
- di interfaccia, che interviene per man-

canza rete o guasti sulla rete (valori fuori soglia di tensione e frequenza);

- del generatore, che interviene per guasto o malfunzionamento dell'impianto fotovoltaico (può coincidere con il dispositivo di interfaccia nel caso di impianto fotovoltaico unico).

[10.3] Tipologie impiantistiche e applicazioni

Come detto, un impianto fotovoltaico è costituito da un insieme di componenti meccanici, elettrici e elettronici che captano l'energia solare, la trasformano in energia elettrica, sino a renderla disponibile all'utilizzazione da parte dell'utente. Esso sarà quindi costituito dal generatore fotovoltaico, da un sistema di controllo e condizionamento della potenza e, per gli impianti isolati, da un sistema di accumulo.

Il rendimento di conversione complessivo di un impianto è il risultato di una serie di rendimenti, che a partire da quello della cella, passando per quello del modulo, del sistema di controllo della potenza e di quello di conversione, e eventualmente di quello di accumulo, permette di ricavare la percentuale di energia incidente che è possibile trovare all'uscita dell'impianto, sotto forma di energia elettrica, resa al carico utilizzatore.

Collegando in serie-parallelo un insieme opportuno di moduli si ottiene un generatore o un campo fotovoltaico, con le caratteristiche desiderate di corrente e tensione di lavoro. I moduli o i pannelli sono montati su una struttura meccanica capace di sostenerli e ancorarli; generalmente tale struttura è orientata in modo da massimizzare l'irraggiamento solare.

Negli impianti isolati (*stand-alone*) il siste-

ma di condizionamento della potenza adatta le caratteristiche del generatore fotovoltaico a quelle dell'utenza e gestisce il sistema di accumulo attraverso il regolatore di carica. In particolare il regolatore di carica serve sostanzialmente a preservare gli accumulatori da un eccesso di carica ad opera del generatore fotovoltaico e da un eccesso di scarica dovuto all'utilizzazione, entrambe condizioni nocive alla salute e alla durata degli accumulatori.

Negli impianti connessi ad una rete elettrica di distribuzione (*grid-connected*) il sistema di controllo della potenza converte la corrente prodotta dal generatore fotovoltaico da continua in alternata, adatta la tensione del generatore a quella di rete effettuando l'inseguimento del punto di massima potenza e, infine, controlla la qualità della potenza immessa in rete in termini di distorsione e rifasamento.

Gli impianti isolati (stand-alone)

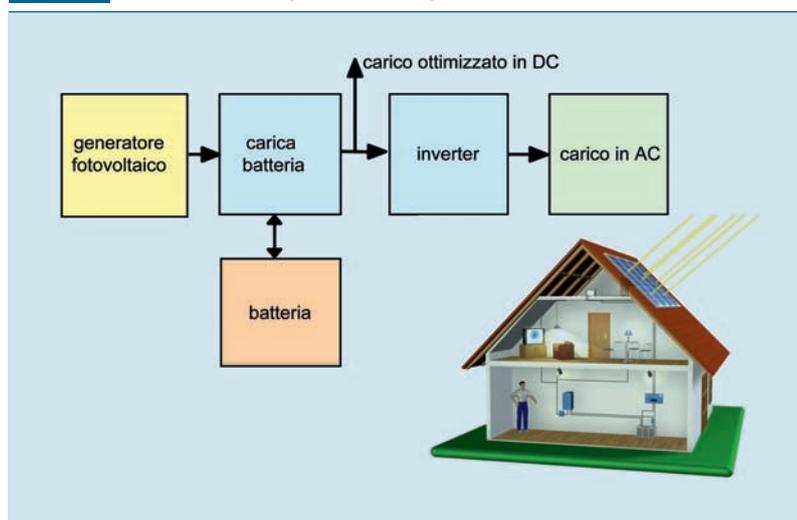
In ragione degli elevati costi legati alla realizzazione di linee di distribuzione in zone a bassa densità abitativa e bassi consumi, oltre che del negativo impatto sul paesaggio, la disponibilità di energia elettrica fornita da un generatore fotovoltaico risulta spesso economicamente conveniente rispetto alle altre fonti concorrenti. Anche nei casi in cui non esistono impedimenti di ordine economico all'approvvigionamento di elettricità tramite gruppi elettrogeni, bisogna considerare, a fronte dei costi di investimento indubbiamente più bassi, gli inconvenienti legati all'approvvigionamento del combustibile, alla rumorosità, all'inquinamento indotto e ai non trascurabili costi di manutenzione. Piccoli generatori fotovoltaici sono utili ad alimentare utenze elettriche situate in località non ancora raggiunte dalla rete

Impianti isolati Le applicazioni



Fig. 10.9

Impianto isolato per utenza domestica



elettrica, o in luoghi in cui il collegamento alla rete comporta costi di investimento troppo elevati rispetto alle piccole quantità di energia richieste.

Una simile applicazione può essere, inoltre, molto utile per portare l'energia elettrica a rifugi, case isolate e siti archeologici, evitando onerose e problematiche operazioni di scavo per i collegamenti elettrici e costose gestioni di linee di trasmissione e sottostazioni elettriche. Inoltre, le caratteristiche dei sistemi fotovoltaici permettono risposte adeguate ai problemi di mancanza di energia elettrica nei Paesi in via di sviluppo: oltre due miliardi di persone, abitanti nelle regioni più povere del pianeta, sono prive di collegamento alla rete elettrica di distribuzione. Rispetto alle fonti tradizionali il fotovoltaico è facilmente gestibile in modo autonomo dalle popolazioni locali e può essere applicato in modo capillare, senza dover costruire grandi reti di distribuzione, risultando quindi economico e compatibile con eco-ambienti ancora non contaminati da attività industriali.

Esempi o campi di applicazioni per utenze isolate sono:

- il pompaggio dell'acqua, soprattutto in agricoltura;
- l'alimentazione di ripetitori radio, di stazioni di rilevamento e trasmissione dati (meteorologici, sismici, sui livelli dei corsi d'acqua), di apparecchi telefonici nel settore delle comunicazioni;
- la carica di batterie, nella marina da diporto, nel tempo libero, per installazioni militari ecc.;
- la segnalazione o prevenzione incendi, nei servizi di protezione civile;
- l'alimentazione di frigoriferi nei servizi sanitari di Paesi in via di sviluppo, ad es. per la conservazione di vaccini e sangue;
- l'illuminazione e, in generale, la fornitura di potenza per case, scuole, ospedali, rifugi, fattorie, laboratori, ecc.;
- la potabilizzazione dell'acqua;
- la segnaletica sulle strade, le segnalazioni di pericolo nei porti e negli aeroporti;
- la protezione catodica nell'industria e nel settore petrolifero e delle strutture metalliche in generale.

Tali impianti richiedono sistemi di accumulo che garantiscano la fornitura di energia anche di notte o in condizioni meteorologiche sfavorevoli e, se gli utilizzatori sono in corrente alternata, viene anche adottato un inverter, che trasforma la corrente continua in uscita dal generatore fotovoltaico in alternata, assicurando il valore desiderato di tensione. Nel caso di generatori fotovoltaici al servizio di impianti di pompaggio, il sistema di accumulo è generalmente costituito dal serbatoio idrico.

Gli impianti collegati alla rete (grid-connected)

Gli impianti *grid-connected* sono utilizzati dove la produzione di energia elettrica

da fonte convenzionale è costosa e/o a elevato impatto ambientale: tipiche applicazioni riguardano la generazione diffusa mediante piccoli impianti collegati alla rete elettrica di distribuzione in bassa tensione, che, a differenza delle utenze isolate, non vedono l'utilizzo di batterie.

Una tipica applicazione in questo settore è quella relativa ai sistemi fotovoltaici integrati negli edifici.

Questo tipo di utilizzazione, in rapido sviluppo, richiede l'impegno non solo dell'industria fotovoltaica e delle capacità progettuali di architetti e ingegneri che ne rendano possibile l'integrazione tecnica, estetica e economica nelle strutture edilizie, ma soprattutto degli organi politici preposti all'emanazione di leggi che ne incentivino lo sviluppo e la diffusione.

Altre applicazioni riguardano il supporto a rami deboli della rete di distribuzione o alle reti di piccole isole. In quest'ultimo caso il costo del kWh fotovoltaico è prossimo a quello prodotto mediante un sistema diesel.

Non meno importanti nel lungo periodo sono, infine, le applicazioni costituite da vere e proprie centrali di generazione di energia elettrica, collegate alla rete, realizzate sino ad oggi, principalmente, con propositi di ricerca e dimostrazione, al fine di studiare in condizioni reali le prestazioni del sistema e dei vari componenti. A titolo di esempio, la centrale fotovoltaica realizzata dall'ENEL a Serre, in provincia di Salerno, occupa una superficie totale di 7 ettari, ha una potenza nominale di 3,3 MW e una produzione annua di progetto di 4,5 milioni di kWh.

La generazione diffusa

La generazione diffusa viene realizzata mediante tanti piccoli impianti (1-50 kW) collegati alla rete in BT senza batterie.

Tali impianti sono adatti per essere installati su edifici e infrastrutture (modularità, assenza rumori, parti in movimento e emissioni). La potenzialità di questa applicazione è enorme nel senso che se si ricoprissero i tetti disponibili si produrrebbe energia sufficiente a tutti i fabbisogni elettrici del Paese.

Per questo tipo tipologia di impianti il costo dell'energia prodotta risulta però ancora doppio rispetto a quello pagato dall'utente alla società elettrica.

I principali vantaggi offerti da questa applicazione riguardano:

- l'impiego distribuito di una sorgente diffusa per sua natura,
- la generazione di energia elettrica nel luogo del consumo, evitando perdite di trasmissione,
- la semplicità di collegamento alla rete e la facilità di quest'ultima ad assorbire la potenza immessa,
- la possibilità di impiego di superfici inutilizzate,
- la valenza architettonica positiva del fotovoltaico nel contesto urbano.

[10.4]

Vantaggi del fotovoltaico

Malgrado i costi elevati, il fotovoltaico rappresenta, fra le varie fonti rinnovabili, proprio per le sue caratteristiche intrinseche, l'opzione più attraente e promettente nel medio e lungo termine.

I sistemi fotovoltaici, infatti:

- sono modulari e consentono quindi di dimensionare facilmente il sistema, in base alle particolari necessità, sfruttando il giusto numero di moduli;
- per il loro uso essi non richiedono combustibile, né riparazioni complicate; questa è la caratteristica che rende il

fotovoltaico una fonte molto interessante, in particolare per i Paesi in via di sviluppo, in quanto l'altra possibilità è rappresentata da generatori che richiedono sia combustibile, la cui fornitura è spesso irregolare e a costi molto onerosi, che interventi di manutenzione più impegnativi;

- non richiedono manutenzione; quest'ultima è sostanzialmente riconducibile a quella degli impianti elettrici e consiste nella verifica annuale dell'isolamento e della continuità elettrica; inoltre i moduli sono praticamente inattaccabili dagli agenti atmosferici e si puliscono automaticamente con le piogge, come dimostrato da esperienze in campo e in laboratorio;
- funzionano in automatico e non richiedono alcun intervento per l'esercizio ordinario dell'impianto;
- hanno positive implicazioni sociali; per esempio, l'illuminazione di una scuola in una zona rurale permette un'educazione serale e attività comunitarie e l'alimentazione di frigoriferi aiuta l'efficacia dei programmi di immunizzazione alle malattie endemiche;
- sono più affidabili rispetto ai generatori diesel e a quelli eolici, come l'esperienza sul campo ha dimostrato;
- hanno una elevata durata di vita e le prestazioni degradano di poco o niente dopo 20 anni di attività; norme tecniche e di garanzia della qualità, stabilite per i moduli da alcuni paesi europei, garantiscono tale durata di vita;
- consentono l'utilizzo di superfici marginali o altrimenti inutilizzabili;
- sono economicamente interessanti per le utenze isolate (a fronte del costo delle linee di trasmissione dell'energia elettrica, valutate in decine di migliaia di euro al km).

L'impatto ambientale

Gli impianti fotovoltaici non causano inquinamento ambientale:

- dal punto di vista chimico, non producono emissioni, residui o scorie;
- dal punto di vista termico, le temperature massime in gioco non superano i 60 °C;
- dal punto di vista acustico, non producono rumori.

La fonte fotovoltaica è l'unica che non richiede organi in movimento né circolazione di fluidi a temperature elevate o in pressione, e questo è un vantaggio tecnico determinante.

Il risparmio di combustibile

Si può ragionevolmente valutare in 30 anni la vita utile di un impianto (ma probabilmente "durerà" anche più); il che significa che esso, ipotizzando un pay-back time pari a 5 anni e una producibilità annua di 1.300 kWh/kW, nell'arco della sua vita efficace produrrà mediamente $1.300 \cdot (30 - 5) = 32.500$ kWh per ogni kW installato.

Dato che per ogni kWh elettrico al contatore dell'utente occorre bruciare circa 0,25 kg di combustibili fossili, ne risulta che ogni kW di fotovoltaico installato produrrà durante la sua vita quanto le centrali convenzionali producono "bruciando" $32.500 \times 0,25 = 8.000$ kg di combustibili fossili.

Tempo di ritorno dell'investimento energetico

Una volta accertata dal punto di vista economico la non immediata competitività sul mercato del fotovoltaico rispetto alle tradizionali fonti non rinnovabili a meno di incentivi statali, è interessante indagare dal punto di vista del bilancio energetico su quanto si assottigli questa differenza. Si osserva, infatti, che i siste-

mi fotovoltaici generano più energia durante tutto il periodo di vita rispetto a quella necessaria alla produzione, installazione e rimozione.

La valutazione va fatta con riguardo a tutti gli input energetici relativi ad ogni fase temporale di utilizzo di materiali necessari alla esistenza e allo smaltimento dell'impianto e poi messi in relazione con la produzione energetica attesa. Il risultato di questo bilancio può essere espresso in termini di "tempo di ritorno dell'investimento energetico" (TRIE).

Il TRIE è un indicatore che è usato di frequente per valutare i bilanci di energia di sistemi di produzione energetici. Spesso il TRIE è semplicisticamente definito come l'energia di fabbricazione del sistema diviso la sua produzione energetica annua. Con maggiore esattezza la formulazione considera un calcolo di tutti gli input energetici considerandone il valore di energia primaria:

$$\text{Tempo di ritorno} \\ \text{dell'investimento energetico} =$$

Il fotovoltaico e l'architettura

La più recente categoria di applicazioni della tecnologia fotovoltaica è quella dei sistemi integrati negli edifici. L'inserimento dei moduli fotovoltaici nei tetti e nelle facciate risponde alla natura distribuita della fonte solare. La possibilità di integrare i moduli fotovoltaici nelle architetture e di trasformarli in componenti edili ha notevolmente ampliato gli orizzonti del fotovoltaico. Il variegato mondo della casistica dell'integrazione fotovoltaica può essere suddiviso in due categorie, quella dell'integrazione negli edifici e quella nelle infrastrutture urbane. Fra le tipologie integrate negli edifici si evidenziano le coperture (piane, inclinate, curve, a risega), le facciate (verticali, inclinate, a risega) i frangisole (fissi, mobili), i lucernai, gli elementi di rivestimento e le balaustre.

Le principali tipologie integrate nelle infrastrutture urbane riguardano le pensiline (per auto, o di attesa) le grandi coperture, le tettoie, i tabelloni informativi e le barriere antirumore.

Energia per la produzione, trasporto, installazione, esercizio e rimozione/Energia prodotta annuale.

Attualmente, a parte i problemi legati all'esaurimento del combustibile fossile che portarono alla sperimentazione durante le crisi energetiche, le ricerche sono mosse dalla nuova consapevolezza "ambientale" del fatto che le emissioni di gas serra causate da questa tecnologia sono nettamente inferiori rispetto a quelle provocate dall'uso dei combustibili fossili. Questa osservazione richiede una analisi in cui tutte le emissioni di CO₂ e di altri gas-serra siano valutate durante tutto il ciclo di vita dell'impianto fotovoltaico.

L'impatto sul territorio

Per rendersi conto delle potenzialità energetiche e dell'impegno di territorio legati ad una centrale di potenza, si consideri un sistema fotovoltaico di potenza pari a 1000 kW (1 MW), che produce circa 1300 MWh/anno e che rappresenta, approssimativamente, la potenza sufficiente a soddisfare le esigenze elettriche di 650 famiglie, occupa un'area di circa 1,5 ettari, di cui il 50% è dedicato ai moduli e alle parti del sistema, mentre il restante 50% è costituito dalle "aree di rispetto", di fatto libere, ma necessarie per evitare l'ombreggiamento.

A fronte della richiesta di energia elettrica consumata in Italia (300 milioni di MWh) sarebbe necessario un impegno di territorio pari a 3.400 km². Tale impegno di territorio, sebbene enorme, costituisce solo un sesto dei terreni marginali in Italia (20.000 km²). Inoltre occorre ricordare che gli impianti non richiedono per la loro installazione opere fisse e che possono essere installati o integrati nelle strutture edilizie esistenti.

[10.5] Costi

I costi dei moduli fotovoltaici, sebbene ancora molto elevati, sono suscettibili di una notevole riduzione. Dal 1980 ad oggi sono stati fatti passi da gigante e per la fine di questo decennio è previsto un ulteriore dimezzamento dei costi. Le cause di tale riduzione sono da attribuirsi essenzialmente al fatto che questa tecnologia è ancora giovane, quindi sia dal punto di vista della ricerca che dell'ottimizzazione dei processi di produzione si possono avere repentini miglioramenti.

La peculiarità di un impianto fotovoltaico consiste nel forte impegno di capitale iniziale richiesto per la sua realizzazione e nelle basse spese di manutenzione. In Italia, il costo di investimento di un impianto varia indicativamente tra i 5.000-8.000 €/kW_p, a seconda della taglia e tipo di applicazione, considerando sinteticamente il costo totale composto dalle seguenti voci: moduli, inverter, strutture di supporto dei moduli, installazione e costi tecnici.

Nella maggior parte dei casi il costo dell'energia prodotta, 25-40 c€/kWh, risulta

ancora superiore al costo dell'energia elettrica prodotta con una centrale convenzionale di grande dimensione. Per questo motivo, sebbene i costi siano fortemente diminuiti nell'ultimo decennio a seguito della crescita del mercato e del miglioramento tecnologico, la convenienza alla installazione di un impianto fotovoltaico sembra dipendere ancora fortemente da eventuali forme di incentivi.

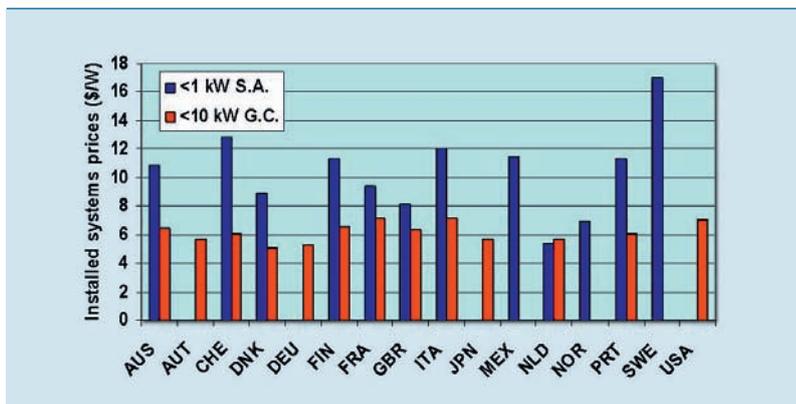
Nei costi del kWh prodotto da fotovoltaico non emergono però i fattori positivi che un tale impianto determina sull'utenza: minore dispersione nella rete di distribuzione, indipendenza dal gestore di rete, minore impatto sull'ambiente. Tutti questi elementi fanno del fotovoltaico la soluzione più praticabile per la generazione elettrica distribuita in ambiente urbano.

Appare quindi evidente come gli sviluppi di questa tecnologia siano legati al sistema degli "usi finali" dell'energia piuttosto che a quelli della generazione di potenza. Sono infatti le applicazioni integrate con l'edilizia che possono contribuire in modo significativo al decollo di questa tecnologia; una indicazione in questo senso ci viene dal Giappone, che ha puntato in modo strategico su tale tecnologia il cui mercato sta rapidamente crescendo in un contesto di graduale diminuzione degli incentivi statali.

Il costo complessivo di realizzazione di un impianto fotovoltaico dipende essenzialmente dalla tipologia e dalla taglia dell'impianto (fig. 10.10).

Per un impianto di piccola taglia, ad esempio da 3 kW_p, collegato alla rete, il costo di realizzazione è di circa 6.500 €/kW_p. Questo costo è dovuto, per circa il 50%, ai moduli e, per la parte rimanente, al costo degli altri componenti del sistema e dell'installazione. I costi annui di manutenzione e gestione sono dell'ordi-

Fig. 10.10 I prezzi dei sistemi isolati e connessi alla rete



ne dello 0,5% del costo dell'investimento. Nel caso di sistemi fotovoltaici per utenze isolate, i costi sono dell'ordine dei 8-12 k€/kW_p. Tali elevati valori dipendono dalla necessità di dotare il sistema di accumulatori.

Nel caso invece di sistemi fotovoltaici integrati negli edifici e collegati direttamente alla rete in bassa tensione, il costo dell'impianto è attualmente pari a circa 7.000-8.000 €/kW_p. Tale costo è legato al tipo di componenti scelti e alla tipologia di impianto installato. Il prezzo dei moduli fotovoltaici varia dai 3 ai 4 €/W e incide per il 45-55% sul costo dell'impianto. L'inverter non pesa considerevolmente sul costo dell'impianto (13-15%). Il costo della struttura di sostegno dei moduli è difficile da stimare perché dipende da vari fattori quali il materiale utilizzato, il luogo di installazione, la superficie di appoggio ecc. In prima approssimazione essa incide sul costo dell'impianto per circa il 10%. Analoghe percentuali sono relative all'installazione e trasporto, all'ingegneria e ai cavi e accessori.

Gli elementi che concorrono a formare il costo attualizzato del kWh sono il costo dell'investimento e il costo annuale di esercizio e di manutenzione, il fattore di attualizzazione dell'investimento e il numero di kWh prodotti dall'impianto in un anno.

Il fattore di attualizzazione dipende dalla durata dell'impianto, di solito stimata in 30 anni, e dal tasso di interesse reale, cioè depurato del tasso di inflazione, posto pari al 3%.

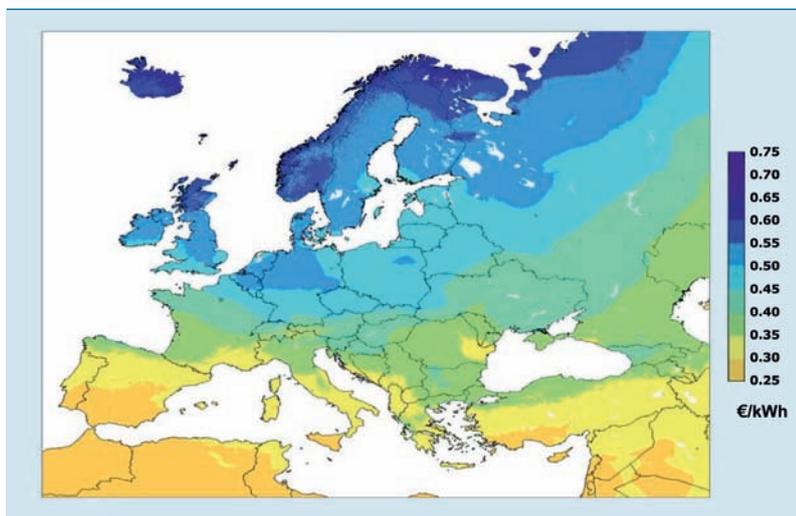
Il costo attualizzato tiene conto degli oneri finanziari dell'investimento. Sia i costi d'investimento, sia quelli di esercizio e manutenzione dipendono in larga misura dalle dimensioni dell'impianto, dal tipo di applicazione per cui è costruito e dalla località in cui è installato.

Nel caso di sistemi fotovoltaici integrati negli edifici e collegati direttamente alla rete in bassa tensione, a fronte di un costo di impianto di circa 6.000-7.000 €/kW_p e di un costo di manutenzione pari 100 €/anno si ottiene un costo attualizzato dell'energia elettrica prodotta quantificabile in circa 0,3 €/kWh in condizioni di soleggiamento medio (circa 1.600 kWh/m² per anno).

Nel caso invece di sistemi fotovoltaici per utenze isolate, i cui costi sono dell'ordine dei 9-11 k€/kW_p, il corrispondente costo attualizzato del kWh è dell'ordine di 0,5-0,7 €.

Il costo del kWh da fonte fotovoltaica viene istintivamente confrontato con quello pagato dall'utente alle società elettriche distributrici di elettricità. Tale costo è, oggi, diverso a seconda del tipo di utenza e dei livelli di consumo; un valore medio per la famiglia tipo italiana è dell'ordine dei 18 c€/kWh. Per il caso degli impianti isolati il confronto non è significativo, a fronte dei costi di allacciamento

Fig. 10.11 Costo del kWh. Piccoli sistemi collegati alla rete ($P_{nom} < 5$ kWp)



Tempo di ritorno dell'investimento (caso dell'Italia)

Programma tetti fotovoltaici

Incentivo in conto capitale:	75%
Costo impianto:	7.000 €/kW _p
Spesa soggetto richiedente:	$7.000 \cdot 0,25 + 700$ (IVA al 10%) = 2.450 €/kW _p - 36% (detr. Irpef) = 1570 €/kW _p
Energia prodotta:	1.100 kWh/kW/anno • 15 c€/kWh = 165 €/anno
Tempo di ritorno dell'investimento:	10 anni (15 anni senza detrazione Irpef)

Conto energia

Incentivo in conto capitale:	0%
Costo impianto:	7.000 €/kW _p
Spesa soggetto richiedente:	$7.000 + 700$ (IVA al 10%) = 7.700 €/kW _p
Energia prodotta:	1.100 kWh/kW/anno • 60 c€/kWh = 660 €/anno
Tempo di ritorno dell'investimento:	9,5 anni

alla rete di distribuzione. Per quanto riguarda gli impianti connessi alla rete, il costo del kWh fotovoltaico è invece circa doppio rispetto a quello pagato alla società elettrica.

Bisogna tuttavia tenere conto del fatto che nessuno può prevedere quale sarà il costo dell'energia negli anni a venire e dei vantaggi, in termine di valore aggiunto, offerti dalla fonte fotovoltaica.

In primo luogo gli impianti fotovoltaici hanno un valore aggiunto di tipo elettrico nel senso che migliorano i parametri della rete (picchi di assorbimento, perdite di trasmissione), possono fornire energia in situazioni di emergenza e nel caso di utenze isolate non richiedono spese di allacciamento alla rete e trasporto del carburante. Nel campo ambientale il valore aggiunto del fotovoltaico si traduce in riduzione delle emissioni e piogge acide. Da un punto di vista architettonico l'elemento fotovoltaico sostituisce i componenti tradizionali di rivestimento, contribuisce ad aumentare l'isolamento termico e acustico, protegge dall'acqua e dal fuoco e riflette le onde elettromagnetiche.

Infine, da un punto di vista socio-economico il fotovoltaico crea lavoro indotto, migliora le condizioni di vita e può avere ricadute tecnologiche in altri settori.

Se a questi vantaggi si aggiungono le incentivazioni previste per il futuro, si può certamente concludere che i sistemi solari fotovoltaici, sia isolati sia connessi alla rete, si possono considerare già oggi una interessante opzione energetica alla portata di un gran numero di utilizzatori.

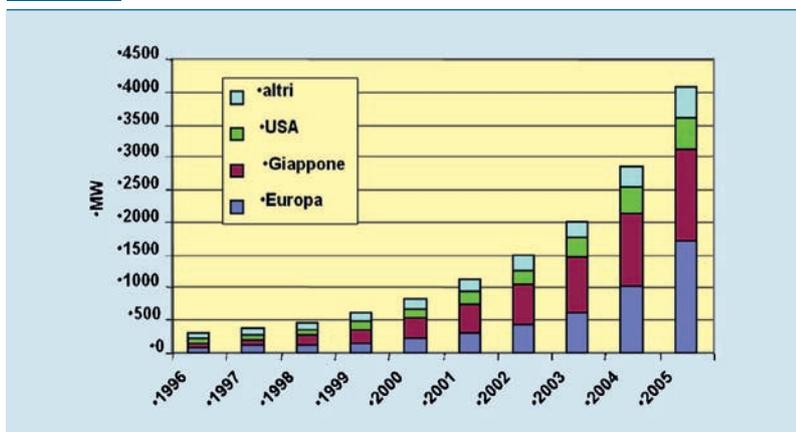
[10.6] Mercato e prospettive

La potenza installata nel mondo cresce a ritmi esponenziali

La produzione mondiale annuale di moduli fotovoltaici nel 2007 è cresciuta del 50% rispetto al 2006, con 3.800 MW_p prodotti. È questa la stima presentata dal Earth Policy Institute (www.earth-policy.org). La crescita annuale era stata di circa 2.520 MW_p nel 2006. Alla fine del 2007 la produzione cumulativa mondiale ha toccato quota 12.400 MW_p.

Fig. 10.12

Potenza installata cumulata

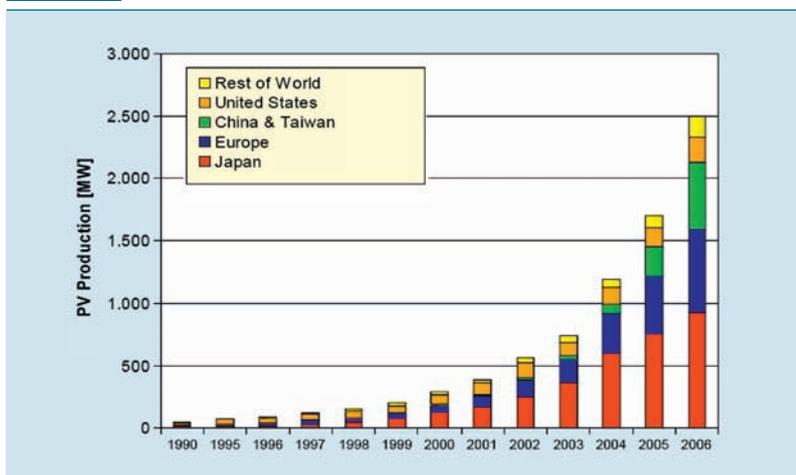


L'istituto di ricerca valuta che i tassi medi annuali di crescita dal 2002 sono stati del 48%: ogni due anni, quindi, la produzione fotovoltaica è raddoppiata.

La curva di apprendimento del settore ha portato ad un dimezzamento del prezzo del modulo fotovoltaico dal 1990: da 7,47 \$/Wp a 3,84 \$/Wp (dato 2006); con l'aumento dell'offerta di silicio i prezzi potrebbero scendere a 2 dollari già nel 2010.

Fig. 10.13

Produzione industriale annuale di moduli fotovoltaici



La tecnologia evolve rapidamente

Nel medio e lungo periodo ci saranno però diverse novità tecnologiche, oggi nella fase post-sperimentale, che potrebbero comportare una riduzione ancora più drastica dei prezzi.

Un fatto nuovo e significativo è che nel 2006, per la prima volta, oltre la metà della produzione di polysilicon è andata al fotovoltaico anziché ai chip dei computer.

La scarsità di questa materia prima ha poi portato ad una crescita dei film sottili, che però hanno ancora una quota di mercato inferiore al 10%.

Tra i paesi produttori è stata impressionante la crescita cinese, passata da una quota mondiale dell'1% del 2003 al 18% nel 2007. La leadership mondiale per la Cina è prevista per quest'anno, quando supererà anche Europa e Giappone. Nelle prime tre posizioni tra le aziende produttrici troviamo la giapponese Sharp, la tedesca Q-Cells e la cinese Suntech.

Il Giappone resta il primo paese al mondo per produzione di fotovoltaico, anche se negli ultimi anni, in fatto di installazioni, ha registrato un lieve rallentamento dei tassi di crescita, ma i valori sono pur sempre di un certo rilievo: 350 MW_p nel 2006 e una stima di 402 MW_p per lo scorso anno. Il governo nipponico ha però annunciato l'obiettivo di installare impianti fotovoltaici sul 30% degli edifici entro il 2030.

La Germania è nettamente la nazione leader nelle installazioni con circa 1.260 MW_p installati nel 2007 (erano 1.050 nel 2006). La Cina non ha invece ancora raggiunto grandi numeri per quanto concerne gli impianti in esercizio sia nel corso del 2006 che del 2007.

Molto meglio hanno fatto, oltre al Giappone, gli Stati Uniti e la Spagna che quest'anno potrebbe superare gli 800 MW_p di installato totale.

Buona la posizione dell'Italia che, secondo quanto indicato dal GSE, nel 2007 ha messo in esercizio poco più di 50 MW_p: un incremento di 5 volte rispetto al 2006.

Scenari del solare fotovoltaico

Il Rapporto preliminare sul solare del CNES (Comitato Nazionale Energia Solare), in accordo con la segreteria tecnica del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, analizza la potenzialità di crescita del mercato nazionale del FV. Questa è stata valutata in base alle stime di crescita annuale del mercato mondiale realizzate dalla Banca Sarasin. Sono stati realizzati tre scenari che ipotizzano che il fotovoltaico in Italia cresca in modo da ricoprire una quota del 5, 10 o addirittura 15% di quello globale.

Se ad esempio venisse mantenuta una quota del 10% (scenario intermedio) sul mercato mondiale, in Italia nel 2020 verrebbero installati in totale 11.000 MW_p con una produzione di energia elettrica pari al 5% del totale (15 TWh). Il giro d'affari sarebbe di 9 miliardi di euro e gli occu-

pati raggiungerebbero la ragguardevole cifra di 76.000.

Conto Energia – potenza installata in Italia al Marzo 2008

La potenza installata degli impianti fotovoltaici incentivati dal Conto Energia ha raggiunto, a oggi, oltre 83 MW_p su tutto il territorio nazionale. Tale potenza si riferisce a 8.030 impianti entrati in esercizio (tra Vecchio e Nuovo Conto energia) da quando è attivo il meccanismo di incentivazione dell'energia prodotta da fotovoltaico gestito dal GSE. Di questi impianti, 3.911 sono relativi ai piccoli impianti (compresi tra 1 e 3 kW), 3.583 ai medi impianti (compresi tra 3 e 20 kW) e 536 ai grandi (superiori a 20 kW). Le regioni con una maggiore potenza installata sono Trentino Alto Adige (9,5 MW) e Lombardia (8,9 MW), mentre quelle con minore potenza installata il Molise (139 kW) e la Valle D'Aosta (106 kW).

Il Gestore dei Servizi Elettrici ha riconosciuto, da quando è attivo il Conto Energia, 15 milioni di euro in incentivi.

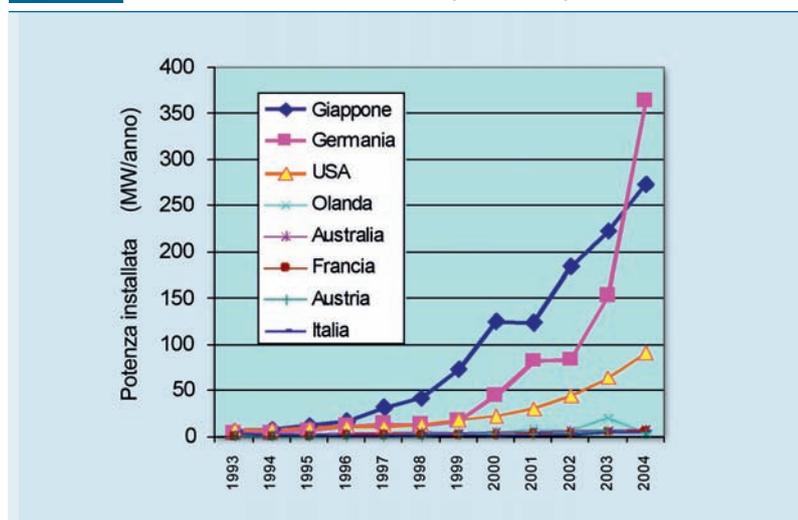
Le prospettive della tecnologia

Per quanto riguarda la tecnologia, la quota di produzione di celle al silicio è in crescita e resta la predominante con il 94,2% del totale prodotto. Il silicio policristallino, con il 60% del mercato, risulta essere il più utilizzato rispetto al mono-cristallino, all'amorfo e al film sottile.

Tuttavia, nuova spinta sta avendo il silicio monocristallino che è passato ad una quota di mercato del 36% (era del 32% nel 2003), a causa della crescente domanda di celle a più elevato rendimento. I

Il Giappone è il maggiore produttore di celle al silicio policristallino e a film sottile (silicio amorfo e altri materiali); per quanto riguarda le celle al silicio monocris-

Fig. 10.14 Incremento annuale della potenza di picco installata



stallino, invece, il primo posto spetta all'Europa.

Nei prossimi anni è ragionevole pensare a una diminuzione dei prezzi dei moduli passando dagli attuali 3,2 \$/W ai 2 \$/W sia introducendo miglioramenti tecnologici sia sfruttando l'effetto di scala. I miglioramenti tecnologici si basano sostanzialmente su nuovi risultati della ricerca e sull'affinamento delle tecnologie produttive (uso razionale dei materiali, aumento dell'efficienza di conversione, innovazione tecnologica nell'assemblaggio dei moduli). Per quanto riguarda l'effetto di scala, è stato valutato che esso ha implicazioni positive fino a livelli di produzione pari a circa 20 MW/anno/turno.

Dal punto di vista delle tecnologie impiegate per la realizzazione dei moduli, oggi è preponderante quella basata sul silicio cristallino e tutto fa pensare che la situazione non muterà significativamente nell'arco dei prossimi anni. Nel medio-lungo termine, però, il silicio cristallino non sarà capace di far raggiungere al fotovoltaico un opportuno livello di competitività per

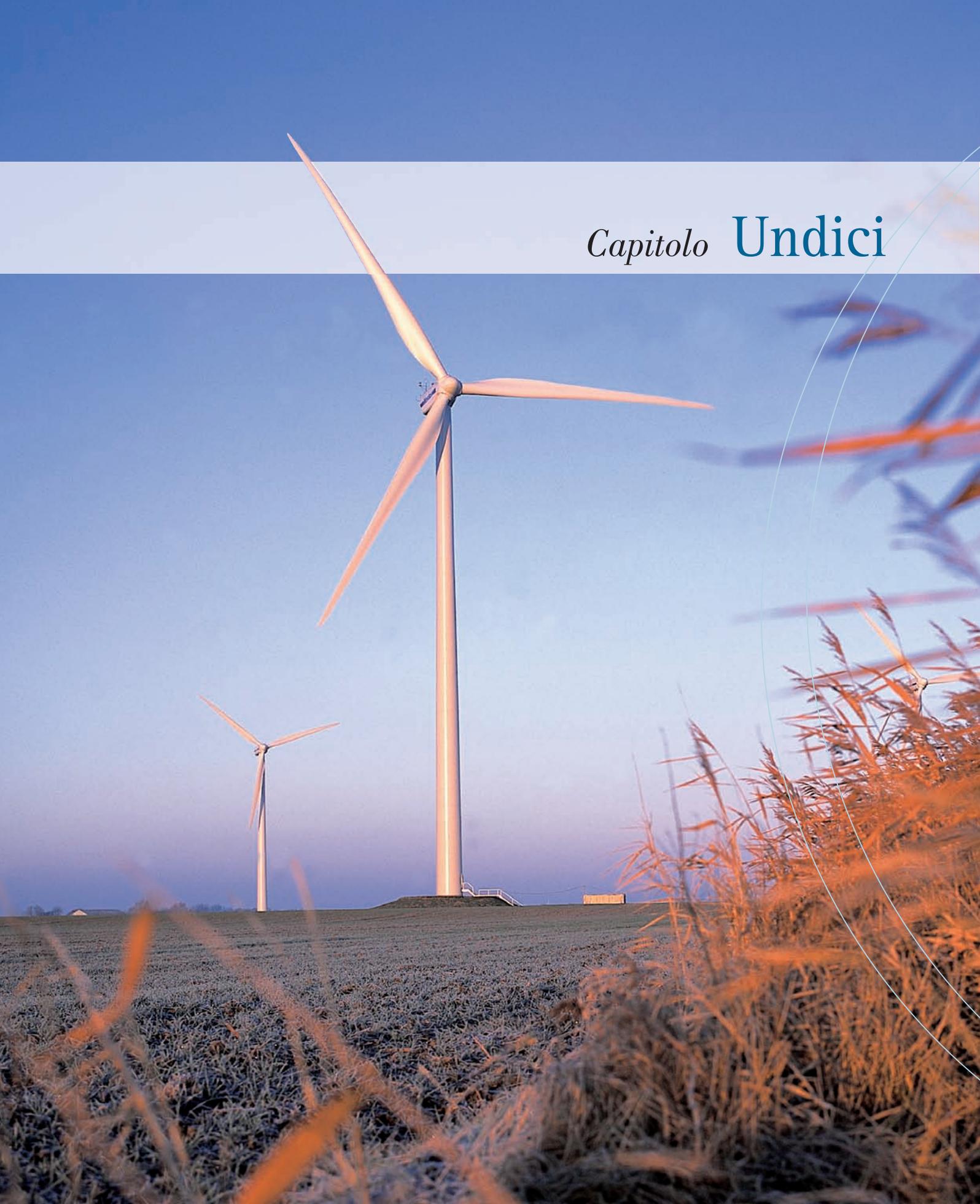
la produzione di massa di energia; altre tecnologie già emergenti o ancora da esplorare, basate sui film sottili, sono le uniche che potranno consentire, qualora opportunamente sviluppate, di raggiungere nell'arco di uno o due decenni, quei costi che renderanno il fotovoltaico una vera opzione energetica.

Per ciò che concerne gli inverter, infine, sul mercato internazionale sono attualmente presenti circa 300 modelli e taglie diverse. L'inverter non è unicamente un componente che permette la conversione di corrente continua in corrente alternata compatibile con la rete, ma un dispositivo in grado di monitorare l'intero sistema e la connessione in rete.

Quasi la metà della produzione di inverter avviene in Europa, con la Germania che da sola produce il 48% del totale. Altri produttori significativi a livello mondiale sono gli USA con il 12% del mercato, il Giappone con il 9% e il Canada con il 7%. In crescita anche in questo settore la produzione dei paesi emergenti del sud-est asiatico (Taiwan 2%).



Capitolo **Undici**



Energia eolica

[11.1]

La risorsa eolica

Il vento

L'energia eolica che utilizziamo quale fonte rinnovabile trae origine da differenze di pressione generate dal riscaldamento non uniforme della superficie terrestre da parte del Sole. I continenti, e in genere le terre emerse, esposti all'irraggiamento solare si riscaldano più rapidamente dei mari e degli oceani circostanti, essenzialmente per il coinvolgimento di uno strato di terreno di spessore inferiore rispetto allo strato d'acqua interessato negli oceani, e per differenze nei coefficienti di scambio termico e nelle capacità termiche.

Come conseguenza, durante il giorno anche l'aria presente sopra le terre emerse si scalda più velocemente rispetto

all'aria soprastante gli oceani. Riscaldandosi, l'aria espande verso l'alto determinando una pressione atmosferica inferiore a quella presente sul mare, da dove altra aria, più fredda e umida, corre a prenderne il posto, generando così il vento. Di notte, il fenomeno si inverte perché l'aria si raffredda più velocemente sulle terre emerse che sul mare.

Allo stesso modo, a causa dell'inclinazione dell'asse terrestre e del moto di rotazione della Terra, vaste zone del pianeta vengono maggiormente irraggiate rispetto ad altre. Queste condizioni determinano differenze di temperatura tali da provocare spostamenti di grandi masse d'aria nell'atmosfera del pianeta: le zone maggiormente irraggiate (in prossimità dell'equatore) agiscono da fonte calda, quelle zone meno irraggiate (in prossimità dei poli) operano da fonte fredda, costituendo globalmente una sorta di gigantesco motore meteorologico.

Misurare il vento

Per verificare su base locale le possibilità di sfruttamento della fonte eolica è necessario misurare gli spostamenti di masse d'aria. Esistono due metodi principali che consentono di effettuare queste misurazioni:

- la *Scala di Beaufort*, metodo empirico che suddivide la forza del vento in 12 gradi e ne stabilisce l'entità osservando i suoi effetti sull'ambiente circostante





(un esempio sono l'altezza e la forma delle onde in mare, con le quali i marinai stabiliscono quale forza abbia il vento in quel momento);

- l'*anemometro*, metodo meno soggettivo rispetto alla scala di Beaufort, serve per ottenere dati attendibili (di norma la torre anemometrica dovrebbe essere alta almeno due terzi della turbina che si intende installare).

Infine, per rilevare le direzioni dei venti si utilizzano le banderuole, mentre i sensori di temperatura servono per identificare le condizioni con potenziale formazione di ghiaccio e conseguente alterazione delle misure.

Dove installare un impianto eolico

Condizione fondamentale per produrre energia elettrica in quantità sufficiente è che il luogo dove si installa l'aerogeneratore sia sufficientemente ventoso. In particolare, per determinare l'energia eolica potenzialmente sfruttabile in una data area, bisogna conoscere la conformazione del terreno e l'andamento nel tempo della direzione e della velocità del vento. La conformazione del terreno influenza la velocità del vento, il cui valore dipende, oltre che da parametri atmosferici, anche

dalle caratteristiche del suolo lambito dalle masse d'aria: più un terreno è rugoso, cioè presenta variazioni brusche di pendenza, boschi, edifici e montagne, più il vento incontrerà ostacoli che ridurranno la sua velocità.

In generale la posizione ideale di un aerogeneratore è quella che lo vede localizzato in un terreno appartenente ad una bassa classe di rugosità e che presenta una pendenza compresa tra i 6 e i 16 gradi. Il vento deve superare la velocità di almeno 5,5 metri al secondo e deve soffiare costante in gran parte dell'anno. I migliori siti eolici off shore sono invece quelli con venti che superano la velocità di 7-8 metri al secondo, che hanno bassi fondali (da 5 a 40 metri) e che sono situati ad oltre 3 chilometri dalla costa.

[11.2]

Impianti eolici, sottosistemi e tipologie

Di seguito descriveremo le diverse tipologie di macchine deputate alla conversione dell'energia cinetica del vento in energia elettrica.

La captazione dell'energia eolica si attua mediante macchine in cui un certo numero di pale fissate su di un mozzo raccolgono l'energia cinetica della massa d'aria in movimento e la trasformano nel movimento rotatorio dell'asse di un rotore.

L'insieme che consente la trasformazione dell'energia cinetica del vento in energia meccanica di rotazione costituisce l'*aeromotore*. L'asse di quest'ultimo trasmette l'energia raccolta all'asse primario di un gruppo di ingranaggi, moltiplicatore di giri. Questo ha la funzione di determinare sull'asse secondario una velocità di rotazione adatta a pilotare un alternatore. Infine, il generatore elettrico realizza la



conversione dell'energia associata al movimento rotatorio dell'aeromotore in energia elettrica da immettere nella rete di trasmissione. L'insieme costituito dall'aeromotore, dal moltiplicatore di giri, dal generatore elettrico e dai relativi sistemi di controllo, freni e limitatori di velocità, trasforma l'energia eolica in energia elettrica e viene definito *aerogeneratore*.

I singoli elementi che compongono un aerogeneratore sono chiamati sottosistemi, alcuni di questi influenzano maggiormente le prestazioni della macchina e hanno subito, nel tempo, una notevole evoluzione. Tali sottosistemi sono il *rotore*, il *generatore/convertitore* e l'*elettronica di controllo*.

Rotore

Il rotore propriamente detto è costituito da un certo numero di pale fissate su di un mozzo progettate per trasformare l'energia cinetica del vento in energia meccanica di rotazione.

Le pale delle moderne turbine eoliche sono il frutto di ricerche specifiche sia nel campo dell'aerodinamica che in quello dei materiali. I profili classici della serie NACA, presenti sulla maggior parte delle macchine fino ad una quindicina di anni

fa, sono stati via via sostituiti con profili appositamente studiati per l'utilizzo eolico. Considerando le pale in vetroresina, che sono di gran lunga quelle più diffuse, si è passati dalla stratificazione manuale, simile a quella utilizzata per la costruzione delle barche, alla stratificazione di tessuto di fibre di vetro preimpregnato, con la tecnica del sacco sotto vuoto, tecnologia che fino a qualche anno fa era usata solo in aeronautica per la realizzazione di pannelli alari.

Generatore

I primi generatori usati nelle macchine eoliche erano dei motori elettrici convenzionali che venivano usati come generatori normalmente collegati alla rete. Uno dei principali svantaggi di questa soluzione era rappresentato dalla curva di rendimento che aveva generalmente un massimo piuttosto pronunciato in corrispondenza della potenza nominale del motore. Quando la turbina funzionava a potenze diverse da quella nominale il rendimento crollava a valori molto più bassi incidendo negativamente sulla resa energetica complessiva.

Nel tentativo di ottenere curve di rendimento più piatte che consentissero una migliore resa in un arco di funzionamento più ampio, l'industria ha sviluppato prodotti specifici classificati come generatori per impiego eolico, facilmente reperibili sul mercato, da utilizzare sulla configurazione di turbina più classica con moltiplicatore di giri.

Elettronica di controllo

Il sistema di controllo di una moderna turbina eolica è costituito fondamentalmente da un microprocessore a cui arrivano le informazioni da tutta una serie di sensori posizionati in vari punti della macchina.

Tipologie di impianti

Le macchine eoliche possono essere distinte in funzione di numerosi parametri.

Modalità di sfruttamento dell'energia

In base alle modalità di sfruttamento dell'energia si parla di aeromotori e di aerogeneratori.

Gli *aeromotori* effettuano la trasformazione dell'energia meccanica del vento in energia meccanica dell'asse di rotazione e, tramite una catena puramente cinematica, movimentano materiali (aeropompe), macinano e frantumano materiali (mulini) e azionano macchine operatrici in genere come *motori primi eolici*.

Gli *aerogeneratori* effettuano la conversione dell'energia meccanica del vento in energia elettrica continua o alternata; sono le macchine eoliche per definizione e, in genere, quelle più significative sono ad asse orizzontale oppure ad asse verticale; possono essere isolati o in *cluster* e ancora essere collegati ad utenze isolate, piccole reti locali (solitamente in sistema integrato con motori diesel) o alle reti regionali e nazionali; possono alimentare direttamente macchine operatrici azionate da motori elettrici.

Posizione dell'asse di rotazione

Le macchine possono essere ad asse orizzontale, ad asse esattamente orizzontale (HAWT, *Horizontal Axis Wind Turbine*), ad asse inclinato sull'orizzontale (esiste il solo rotore Poulsen), ad asse verticale (VAWT, *Vertical Axis Wind Turbine*), Rotori Darrieus, Rotori Savonius, Rotori Giromill e macchine di difficile catalogazione (del tipo ad ala battente e a *tapis roulant*).

Taglia di potenza

In base al diametro del rotore (D) e alla potenza (P) si possono individuare macchi-

ne eoliche di piccola taglia ($D < 20$ m e $P < 100$ kW), di media taglia ($20 < D < 50$ m e $100 < P < 800$ kW), di taglia intermedia ($D \approx 50$ m o poco più e $800 < P < 1000$ kW), di grande taglia ($D > 50$ m e $P > 1000$ kW); si hanno esempi di macchine da 3000 kW.

Velocità del rotore

Prendendo in considerazione la velocità del rotore avremo macchine con movimento lento, (modalità di funzionamento tipica del multipala o *mulino americano*, o veloce, modalità tipica delle macchine con poche pale, in genere fino a 4.

Numero di pale

In relazione al numero di pale avremo macchine multipala (mulino americano) ad elevata solidità, caratterizzate da una coppia molto alta anche a basso numero di giri; o macchine con numero di pale da 1 a 3-4 al massimo, a bassa solidità.

Tipo di regolazione di potenza

È importante ricordare che una caratteristica rilevante di un aerogeneratore è rappresentata dalla modalità di rotazione del rotore, che può essere a velocità fissa, nei casi in cui il generatore elettrico è collegato direttamente alla rete, o a velocità variabile. In questo ultimo caso si riesce a controllare la velocità di rotazione del rotore regolando, a valle, quella del generatore, in modo che il rotore possa funzionare ad efficienza massima per un tratto più o meno esteso della curva di potenza e possa adattarsi alle diverse condizioni di vento.

Il controllo della potenza, per quanto riguarda il sistema e i carichi agenti sul sistema, è stato ed è uno dei fattori determinanti per la sicurezza strutturale della turbina ed ha giocato un ruolo di primaria importanza nello sviluppo dei sistemi eolici. Il sistema di controllo interviene per limitare i carichi quando la velocità del

vento, e quindi la potenza sviluppata, supera il valore nominale per cui la macchina è dimensionata.

I due sistemi più usati per la limitazione della potenza sono il *controllo dello stallo* e il *controllo di passo*. Il primo, usato su macchine a velocità fissa, è di tipo passivo e richiede un progetto aerodinamico dell'elica tale che, oltrepassata una certa velocità del vento, si creino delle turbolenze a partire dal centro, e poi via via verso l'estremità del rotore, ostacolando la spinta sulle pale e portando gradualmente in stallo il rotore a pale fisse. Il secondo controllo è di tipo attivo e prevede che esistano dei dispositivi di tipo meccanico e elettronico che facciano ruotare le pale intorno al loro asse modificando gli angoli di incidenza secondo modalità prefissate.

Altre variabili utili alla classificazione riguardano la tipologia della torre (metallica tubolare o a traliccio, in cemento) e il tipo di progetto delle macchine *soft* o *hard* in funzione della rigidità del rotore (generalmente interessa le macchine ad asse orizzontale).

Una ulteriore classificazione, oltre quella già citata in macchine a velocità variabile o a velocità fissa, si basa sul tipo di generatore elettrico:

- sincrono,
- asincrono,
- a magneti permanenti.

In quest'ultima ripartizione esistono macchine che posseggono due generatori e macchine con generatori a numero di coppie polari variabile.

[11.3] La progettazione

Le fasi preliminari della progettazione prevedono l'esecuzione di una serie di ope-

razioni quali l'identificazione del sito in cui si vuole installare la centrale eolica.

Una volta identificato il sito si procede con la selezione del modello di aerogeneratore. Sulla base dei criteri stabiliti dalle norme del CEI, si seleziona la turbina insieme al tipo di torre e in particolare all'altezza del mozzo. Lo stesso aerogeneratore può essere certificato per diversi classi utilizzando diverse torri.

Avendo a disposizione delle mappe digitali in formato vettoriale e delle misure eseguite sul sito o nelle immediate vicinanze, si può calcolare il flusso dei venti nella zona, e quindi identificare le aree più ventose.

Il software più diffuso per questo tipo di calcolo è il WasP sviluppato dall'ente di ricerca danese Risø. Questo programma è ben collaudato per terreni pianeggianti o colline fino a pendenze del 17%.

Identificazione e idoneità delle aree d'interesse

L'individuazione delle aree di maggior interesse per l'installazione di *fattorie del vento* inizia da un *macrositing* (analisi preliminare) del territorio in esame.

L'estensione di territorio può essere pari a quello di una o più province, ove ragionevolmente si troveranno zone a maggior ventosità.

Il *macrositing* consiste nell'analisi di una carta topografica digitale sulla quale vengono inseriti i dati anemologici a grande scala rilevati dal servizio meteorologico nazionale. L'obiettivo è quello di individuare delle linee di isoventosità (linee ideali che collegano punti con uguale ventosità) che permettano l'individuazione dei siti maggiormente ventosi all'interno del territorio preso in esame.

È importante, oltre ad una adeguata ventosità definita da opportuni parametri statistici, la disponibilità di terreno di impie-

go marginale che abbia un'area adeguata ad ospitare un numero sufficiente di aerogeneratori e che sia libero da vincoli ambientali e d'uso che ne impediscano l'impiego per installazioni eoliche.

Altra condizione è l'andamento di velocità e direzione del vento e un terreno privo di irregolarità con assenza di insediamenti abitativi nelle immediate vicinanze del sito.

Valutazione dettagliata del sito e sviluppo del layout della centrale eolica

In seguito all'esito positivo della valutazione preliminare precedentemente effettuata, si inizia la fase propriamente operativa

finalizzata all'installazione della centrale eolica. Prima di tutto occorre una valutazione dettagliata della producibilità dell'impianto mediante una misura accurata della velocità e della direzione del vento, possibilmente all'altezza del mozzo delle macchine che si intendono installare e, comunque, non inferiori a 30 metri.

Progettazione esecutiva della centrale

Dopo aver concluso le operazioni precedenti, si procede alla progettazione esecutiva attraverso una valutazione tecnica e economica delle opere civili e elettromeccaniche da realizzarsi per l'installazione dell'impianto. La progettazione di una centrale eolica presuppone, tuttavia, la considerazione di un altro aspetto fondamentale: l'impatto e l'interazione della centrale con l'ecosistema circostante, quindi la compatibilità ambientale e l'impatto acustico.

La turbina eolica tipo è una macchina di grandi dimensioni, al fine di generare discrete quantità di elettricità da una fonte di energia a bassa densità di potenza. È caratterizzata da una torre con un'altezza che va dai 50 agli 80 metri e da un rotore di alcune decine di metri di diametro. Volendo produrre una quantità significativa di energia sarà necessario installare un discreto numero di aerogeneratori e interessare un'ampia superficie di territorio. Pertanto occorre tenere conto di questo aspetto.

L'impatto acustico degli aerogeneratori oggi è mitigato moltissimo dall'introduzione, ormai su molte macchine, della velocità variabile, che permette di ridurre il numero dei giri del rotore quando il vento è più debole e consente velocità lineari delle estremità delle pale più contenute, a tutto vantaggio dell'abbattimento del rumore. La valutazione delle infrastruttu-

Un fattore determinante: la rugosità

Un primo effetto determinante sul flusso del vento è determinato dal tipo di copertura del terreno sul territorio, fattore che, oltre a condizionare come si vedrà la possibilità fisica di installare aerogeneratori, influenza considerevolmente l'andamento della velocità nello strato limite superficiale.

Per questi aspetti le caratteristiche del terreno vengono rappresentate con un parametro, z_0 (m), detto "lunghezza di rugosità" (*roughness length*). Nel caso più semplice di terreno piatto, si osserva che la velocità del vento (U) aumenta in generale con l'altezza (z) con un tasso di crescita che dipende dal grado di scabrosità macroscopica del suolo, e secondo una relazione teorico-sperimentale di tipo logaritmico:

$$U(z) \propto \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

Il valore della lunghezza di rugosità per una determinata superficie di territorio viene normalmente attribuito in base ad una classificazione predefinita, frutto di esperienze di lunga data. Così ad esempio un'area urbana sarà caratterizzata da un valore di circa 1 m, una prateria con erba bassa e qualche cespuglio da un valore di circa 0,03 m, una superficie innervata liscia da un valore di circa 0,0005 m.

Un altro effetto determinante è quello dei rilievi montuosi. È ben noto che il vento subisce una accelerazione sulle sommità di creste montuose o collinari, effetto che si combina con l'incremento della velocità dovuto all'altezza. Il profilo della velocità del vento risulta perciò generalmente alterato rispetto alla legge logaritmica sopra descritta.

re è molto importante ai fini della corretta realizzazione della centrale eolica. Questa deve essere eseguita su più fronti e prima di iniziare la costruzione, per evitare brutte sorprese proprio nella fase realizzativa.

Gli aspetti principali da valutare preventivamente sono:

- viabilità e accessibilità, con studio di eventuali modifiche che permettano un accesso migliore al sito da parte dei trasporti più impegnativi, sia dal punto di vista dei pesi, sia delle dimensioni;
- allaccio alla rete elettrica in media tensione (MT) o in alta tensione (AT), con studio su eventuali situazioni critiche di sovraccarico.

Ultimate le operazioni precedentemente descritte e installato l'aerogeneratore, si procede all'avviamento della turbina eolica.

Le operazioni da effettuarsi in questo caso prevedono una serie di controlli del macchinario e dei sistemi ausiliari, compresi i cablaggi elettrici, affinché al momento del primo avviamento tutto sia in ordine per poter entrare in servizio.

La tabella dei lavori prevede, dunque, una serie di azioni che preludono alla successiva prova dell'aerogeneratore, come la messa in tensione degli impianti, la taratura dei sistemi di controllo, la messa in bandiera delle pale, e altro ancora.

[11.4] Le applicazioni

Gli impianti eolici vengono generalmente suddivisi e classificati in base alle applicazioni alle quali sono destinati. Più aerogeneratori collegati insieme formano le così dette "fattorie del vento" (*wind-farm*). Si tratta di vere e proprie centrali elettriche.

Nelle *wind-farm* la distanza tra gli aerogeneratori viene calcolata per evitare interferenze reciproche che potrebbero causare diminuzioni di produzione di energia. Di regola gli aerogeneratori vengono situati ad una distanza di almeno cinque-dieci volte il diametro delle pale. Nel caso di un aerogeneratore medio, con pale lunghe circa 20 metri, questo significa installarne uno ogni 200 metri circa. Esistono sia *wind-farm* terrestri (*on shore*) che in mare aperto (*off shore*).

In generale lo sfruttamento della risorsa eolica ha luogo in ambiente terrestre (*on shore*), ma sta assumendo un ruolo sempre più rilevante la tecnologia *off shore* che prevede l'installazione delle macchine in ambiente marino.

Le applicazioni on shore

La produzione di energia elettrica per via eolica destinata ad utenze isolate o allacciate alla rete elettrica di bassa tensione, si effettua con aerogeneratori generalmente singoli e di piccola taglia, cioè per potenza inferiore a 100 kW. La generazione di elettricità può essere abbinata, nei sistemi ibridi, ad altre fonti di energia quali mini idraulica, fotovoltaico e convenzionale (diesel).

Nel caso di utenze isolate è consigliabile l'uso di accumulo elettrico o di pompaggio dell'acqua. Il mercato di questa tipologia di macchine è in continua espansione sia nei paesi sviluppati sia nei paesi in via di sviluppo.

Nel caso della produzione e vendita di energia elettrica su scala industriale, questa si effettua con aerogeneratori di potenza compresa tra 500 kW e 3.000 kW collegati singolarmente o in più unità (centrali eoliche) alla rete elettrica di media-alta tensione. Tale applicazione, preminente a livello mondiale, ha contribuito in modo determinante all'evoluzio-

ne tecnologica del settore, all'abbattimento dei costi e allo sviluppo commerciale, con rilevanti benefici ambientali.

Le applicazioni off shore

La tendenza verso la quasi totale saturazione dei siti disponibili sulla terraferma ha indotto negli ultimi anni a far convergere l'interesse verso la scelta di siti *off shore* o *semi off shore*, cioè impianti ubicati rispettivamente in mare aperto o lungo pennelli a mare o dighe foranee di porti o località direttamente aggettanti sul mare.

I vantaggi che permette una collocazione *offshore* sono la disponibilità di un potenziale eolico migliore, la minor turbolenza del vento con guadagno significativo in termini di durabilità delle pale e un probabile miglior accoglimento da parte della popolazione per un ridotto impatto visivo.

Piattaforme petrolifere off shore

Negli ultimi anni, fermo restando il tentativo di aumentare la potenza unitaria delle macchine installate *offshore*, si è cominciato a considerare il concetto di aerogeneratori eolici installati a mare, utilizzando piattaforme *off shore* già esistenti, o

sistemi galleggianti e semi-sommersi variamente connessi al fondo del mare o alla costa.

Un esempio di potenziale riutilizzo di piattaforme *off shore* è stato proposto dalla società Edison, riguardo alla piattaforma VEGA, ubicata a 22 chilometri dalla costa siciliana, in un tratto di mare avente profondità di 120 metri. Essa è sostanzialmente costituita da un *jacket* a 8 gambe di acciaio, con dimensioni geometriche di 80x60 metri, per un peso complessivo di 26.000 tonnellate.

Strutture galleggianti e semi-sommerse

Lo studio di strutture *floating* per lo sfruttamento dell'energia eolica, nasce da diversi bisogni, legati alla necessità di evitare fondazioni fisse, di migliorare così l'impatto ambientale degli aerogeneratori e di favorire un eventuale spostamento dell'insieme aerogeneratore-struttura.

La possibilità di equipaggiare la piattaforma galleggiante/mobile con impianti diversi (per produrre energia elettrica con sistema ibrido, acqua dolce da dissalatore ad osmosi inversa, ecc.) può fungere come fonte sussidiaria anche nei siti con forti punte di domanda stagionale di acqua e elettricità, ad esempio.



[11.5] Costi e benefici

L'investimento iniziale per la costruzione dell'impianto rappresenta la voce di costo più significativa di cui tenere conto nell'analizzare la redditività di una iniziativa nel settore eolico. Nel suo complesso l'investimento può suddividersi nei seguenti raggruppamenti di spesa:

- sviluppo iniziativa (2-5% investimento totale),

- fornitura e installazione macchine eoliche (65-78% investimento totale),
- opere accessorie e infrastrutture (18-25% investimento totale).

La fase di sviluppo dell'iniziativa comprende l'individuazione e qualificazione anemologica del sito, la progettazione dell'impianto, l'espletamento dell'iter autorizzativo per la concessione edilizia, la valutazione dell'impatto ambientale e il collegamento alla rete. Economicamente essa rappresenta solo il 2-5% dell'investimento totale.

La fornitura delle macchine eoliche rappresenta la spesa più rilevante in assoluto. La potenza nominale degli aerogeneratori presenti sul mercato varia da pochi chilowatt ad oltre 2.500 kW. La potenza media delle singole macchine installate nel mondo durante l'anno 2002 si attesta intorno ai 1.000 kW (770 kW in Italia, 800 kW in Spagna, 1.300 kW in Danimarca, 1.400 kW in Germania), confermando la crescita in atto da diversi anni. Il costo di una turbina eolica installata, incluso di acquisto, trasporto, montaggio e avviamento, è direttamente legato al diametro del rotore e all'altezza della torre piuttosto che alla semplice potenza nominale. Esso ha tratto benefici di scala dall'aumento delle dimensioni unitarie delle macchine e oggi in Italia per una macchina da 850 kW si aggira tra 600.000 e 700.000 €.

La realizzazione delle opere accessorie e delle infrastrutture raggruppa le voci di costo strettamente collegate alla complessità del sito in relazione alla morfologia e natura del suolo, all'accessibilità e alla connessione alla rete. I costi si riferiscono a:

- opere civili quali fondazioni, scavi per cavidotti, viabilità necessaria a trasportare sul sito le sezioni delle macchine

eoliche, eventuale edificio di servizio;

- opere elettromeccaniche quali box a piè di macchina con quadri elettrici e trasformatore della corrente da bassa tensione a media tensione, apparecchiature per il controllo a distanza, cabling interrati per il collegamento elettrico delle macchine al punto di uscita dell'impianto;
- collegamento alla rete con cavidotto aereo o interrato per il collegamento dell'impianto alla rete di trasmissione in media o alta tensione.

Il costo di produzione del kWh elettrico da fonte eolica è costantemente diminuito negli ultimi venti anni, ovvero da quando l'industria del settore ha cominciato a raggiungere la maturità commerciale.

I maggiori contributi a tale riduzione derivano da economie di scala legate all'ottimizzazione dei processi produttivi, dalle innovazioni progettuali e dal miglioramento delle prestazioni delle macchine.

Notevoli benefici sono stati ottenuti anche grazie ad una più efficace valutazione e sfruttamento delle risorse eoliche dei siti. Le applicazioni dell'energia eolica su scala ridotta sono tipiche della generazione cosiddetta "distribuita" che utilizza macchine di piccola taglia (5-50 kW) per alimentare utenze isolate o per interfacciarsi sulla rete di bassa/media tensione. In questo specifico segmento il mercato è in grado di offrire una discreta gamma di prodotti, tecnologicamente validi anche se economicamente non ancora maturi, soprattutto se confrontati con i modelli di taglia maggiore.

Le spese di funzionamento di un impianto eolico riguardano l'amministrazione, il canone agli enti locali e ai proprietari per l'utilizzo del sito, i premi assicurativi e la manutenzione sia ordinaria che straordinaria degli impianti.

Non vi sono costi di combustibile, e per quanto riguarda l'esercizio, è da sottolineare che gli impianti sono controllati a distanza e non richiedono presidi permanenti sul sito.

I benefici che si acquisiscono con il ricorso all'energia eolica sono di due tipi, in genere difficile trovare abbinati: economico e ambientale.

Gli stati membri dell'IEA (*International Energy Agency*) hanno individuato i principali effetti benefici associati all'impiego dell'energia eolica che, nel tempo, hanno contribuito ad aumentare l'interesse dei mercati nuovi e già esistenti:

- emissioni molto contenute di gas nocivi, soprattutto CO₂, nell'intero ciclo di vita, per unità di elettricità generata;
- risorsa diffusa con costi dell'energia generata prossimi a quelli degli impianti termici;
- disponibilità di elettricità da fonte diversa e sicura;
- rimozione delle incertezze connesse alla fluttuazione dei prezzi dei combustibili;
- nuove prospettive industriali e occupazionali, attraverso la realizzazione dei componenti e del loro assemblaggio, installazione degli aerogeneratori, predisposizione infrastrutture e esercizio e manutenzione degli impianti.

Inoltre, negli USA e in Svizzera, si è riscontrato che l'eolico e l'idroelettrico hanno elevate capacità di integrazione e possono coesistere con ottimi risultati. L'eolico genera quantitativi di elettricità maggiori in inverno quando si ha, in concomitanza, nei paesi freddi, una richiesta superiore di energia elettrica.

L'energia eolica aumenta la disponibilità di elettricità anche attraverso l'accumulo, effettuato con il pompaggio dell'acqua, per soddisfare i consumi di picco.

[11.6] Il mercato

Le politiche dei singoli stati variano sensibilmente in funzione delle circostanze contingenti e delle reali volontà a perseguire gli obiettivi ambientali, anche se, talvolta, dichiarati e sottoscritti.

Stati che attualmente si interessano a questo tipo di tecnologia sono: Austria, Finlandia, Canada, Germania, Danimarca, Grecia, Giappone, Olanda, Spagna, Norvegia, Svezia, Stati Uniti.

Di seguito descriveremo il mercato relativo alle macchine di media e piccola taglia, concludendo con gli impianti *offshore*.

Macchine di piccola taglia

Il mercato degli aerogeneratori di piccola taglia, di potenza nominale inferiore a 50 kW, sebbene tuttora relegato in un'area di nicchia del settore e quasi sempre relativo ad applicazioni quantitativamente limitate in termini di numero di macchine e di potenza complessiva, sta rapidamente crescendo con interessanti prospettive per il prossimo.

Questo rinnovato interesse per le applicazioni eoliche di piccola taglia è principalmente da imputare alla crescente necessità di generazione distribuita e di alimentazione delle utenze, ancora numerose nel mondo, non raggiunte dalla rete elettrica. A testimonianza di questo risveglio del piccolo eolico vi è l'interesse concreto verso tale settore di recente mostrato, attraverso lo sviluppo di progetti ad hoc, da costruttori di aerogeneratori tradizionalmente inclini alla realizzazione di macchine di grande taglia.

Macchine di media e grande taglia

Molti ritengono che le macchine di grande taglia siano una evoluzione pura e

semplice di quelle di media taglia, come se queste ultime lo fossero di quelle di piccola taglia.

In realtà se da un punto di vista funzionale e aerodinamico questo è generalmente vero, bisogna tuttavia considerare che il gigantismo introduce problemi di rilievo, specialmente per quanto riguarda i carichi imposti alla struttura. Per questo motivo i grandi aerogeneratori hanno sistemi attivi di regolazione della potenza, con numero di giri variabile e passo variabile, in modo tale da diminuire, per quanto possibile, proprio quei carichi che potrebbero pregiudicare la durata e l'affidabilità di tali impianti.

Le macchine di taglia più grande sono una seria ipotesi, da parte delle case costruttrici, verso ordinativi importanti in campo *off shore*, nel momento in cui i paesi interessati a questa attività cominceranno a richiederle. Infatti tali grandi turbine, a volte con rotori di oltre 100 metri di diametro, sono studiate appositamente per l'*off shore*.

Il fatto che stia aumentando il numero delle macchine di grande taglia, sia disponibili sul mercato sia installate, non significa che

le stesse stiano soppiantando del tutto le macchine di media taglia. Queste infatti, nelle versioni con potenza a partire da 600 kW, continuano ad essere richieste nel caso di molti siti con scarsa accessibilità.

Macchine off shore

Nel corso del 2002 è stato realizzato il più grande impianto *off shore* in Danimarca, la centrale di Horns Rev, con 80 aerogeneratori da 2 MW Vestas V80-2,0 MW. Con tale impianto, realizzato a 14 chilometri dalla costa occidentale, la potenza complessiva dell'eolico *off shore* nel mondo è ora superiore a 270 MW (per la stragrande maggioranza localizzata in Danimarca). Nell'ambito *off shore* si sta assistendo ad un continuo aumento delle dimensioni e, quindi, delle potenze sia dei singoli aerogeneratori che delle centrali eoliche. Tali centrali saranno sempre più assimilabili per la potenza impegnata e l'energia generata a quelle convenzionali termoelettriche e nucleari.

In conclusione, gli accertamenti sinora effettuati confermano la grande disponibilità di energia eolica utilizzabile in quasi tutte le aree del globo. Il totale di questa energia tecnicamente ottenibile è stato stimato intorno a 53.000 TWh/anno, cioè oltre il doppio della richiesta mondiale di elettricità stimata al 2020.

Affinché l'energia eolica possa soddisfare la domanda di elettricità nel 2020 per il 12% è necessario che generi qualcosa come 3.000 TWh/anno. Non ci sono ostacoli insormontabili per l'immissione di tale percentuale di elettricità nel sistema elettrico, poiché in Danimarca sono già stati raggiunti nella parte occidentale livelli di picco di penetrazione eolica del 50%. Un limite cautelativo del 20% è quindi facilmente ipotizzabile.





Capitolo **Dodici**

Energia dalle biomasse

[12.1]

Le biomasse e la loro conversione energetica



Viene definita “biomassa” ogni sostanza organica di origine biologica, in forma non fossile, prodotta direttamente o indirettamente dalla fotosintesi.

Le biomasse si possono considerare fonti rinnovabili di energia: attraverso determinate tecnologie di conversione energetica, residui agro-industriali e scarti di lavorazione, nonché risorse derivanti dalla frazione organica dei rifiuti solidi urbani (RSU), si inseriscono in un virtuoso rapporto funzionale tra ciclo biologico e ciclo produttivo. A seconda del tipo e della composizione, le biomasse possono essere bruciate per fornire calore, convertite in combustibile (metano, etanolo, metanolo, prodotti carboniosi) mediante l'impiego di microrganismi, l'azione di elevate temperature o di agenti chimici, o utilizzate per generare energia elettrica.

Le biomasse impiegate a fini energetici sono disponibili in varie forme: i residui forestali e di lavorazione (frascami, ramaglie, scarti di segherie) le colture agricole (girasole, colza, sorgo da fibra, kenaf, miscanto) i residui dell'industria agroalimentare e agroindustriale (potature di alberi da frutta, paglie di cereali, vinacce, sanse, noccioli e gusci di frutta), la frazione organica dei rifiuti solidi urbani (RSU),

i rifiuti domestici in raccolta differenziata, i reflui civili e le deiezioni animali.

Le biomasse possono essere impiegate per la produzione di energia utilizzando diversi processi di conversione, sia che esse derivino da colture energetiche dedicate (foreste a corta rotazione, colture alcoligene e oleaginose) ovvero siano prodotti residuali (agricoli, forestali e agroindustriali).

Questi processi fanno riferimento a metodi *biochimici* (digestione anaerobica, digestione aerobica, estrazione di olii e produzione di biodiesel, fermentazione alcoolica) o *termochimici* (combustione, gassificazione, pirolisi), per la cui scelta vanno presi in considerazione i contenuti in carbonio e azoto (rapporto C/N) e l'umidità presente nella materia organica da trattare.

I *processi di conversione biochimica* permettono di ricavare energia per reazione chimica dovuta al contributo di enzimi, funghi e micro-organismi, che si formano nella biomassa sotto particolari condizioni, e vengono impiegati per quelle biomasse in cui il rapporto C/N sia inferiore a 30 e l'umidità alla raccolta superiore al 30%. Risultano idonei alla conversione biochimica le colture acquatiche, alcuni sottoprodotti colturali (foglie e steli di barbabietola, ortive, patata, ecc.), i reflui zootecnici e alcuni scarti di lavorazione (borlande, acqua di vegetazione, ecc.), non-

ché la biomassa eterogenea immagazzinata nelle discariche controllate.

I processi di conversione termochimica sono basati sull'azione del calore che permette le reazioni chimiche necessarie a trasformare la materia in energia, e sono utilizzabili per i prodotti e i residui cellululosici e legnosi in cui il rapporto C/N abbia valori superiori a 30 e il contenuto di umidità non superi il 30%. Le biomasse più adatte a subire processi di conversione termochimica sono la legna e tutti i suoi derivati (segatura, trucioli, ecc.), i più comuni sottoprodotti colturali di tipo ligno-cellulosico (paglia di cereali, residui di potatura della vite e dei fruttiferi, ecc.) e taluni scarti di lavorazione (lolla, pula, gusci, noccioli, ecc.).

Riassumendo

Le biomasse, a seconda del tipo e della composizione, possono essere bruciate per fornire calore o generare energia elettrica, oppure convertite in combustibile (metano, etanolo, metanolo, prodotti carboniosi) mediante l'impiego di microrganismi o per azione di elevate temperature o agenti chimici.

In particolare, dal punto di vista tecnologico e industriale le alternative per la valorizzazione energetica delle biomasse già mature sono sostanzialmente tre:

- la *combustione diretta*, con conseguente produzione di calore da utilizzare per il riscaldamento domestico, civile e industriale o per la generazione di vapore (forza motrice o produzione di energia elettrica);
- la produzione di biogas mediante *fermentazione anaerobica* di reflui zootecnici, civili o agroindustriali, e la successiva utilizzazione del biogas prodotto per la generazione di calore e/o elet-

tricità. In quest'ultimo caso, l'aspetto energetico riveste un ruolo complementare rispetto a quello più propriamente ambientale (oltre alla depurazione dei reflui, la combustione del metano che andrebbe altrimenti disperso in aria);

- la *trasformazione in combustibili liquidi* di particolari categorie di biomasse coltivate come le specie oleaginose (produzione di biodiesel, estrazione degli oli e successiva conversione chimica degli stessi in miscele di esteri metilici e/o etilici) e specie zuccherine (produzione di etanolo via fermentazione alcoolica).

L'utilizzo della biomassa come fonte rinnovabile può essere realizzato nell'ambito di due sistemi: quello in cui si recupera materia prima vegetale residuale (manutenzione forestale, residui agricoli, industria del legno, industria agro-alimentare), e quello in cui la materia prima vegetale deve essere prodotta con apposite coltivazioni energetiche prima di essere raccolta, trasformata e impiegata.

È importante sottolineare, inoltre, che l'utilizzo a fini energetici delle biomasse può essere vantaggioso quando queste si presentano concentrate e disponibili con sufficiente continuità nell'arco dell'anno, mentre una eccessiva dispersione sul territorio e una concentrata stagionalità dei raccolti, rendono più difficili e onerosi la raccolta, il trasporto e lo stoccaggio.

Di seguito descriveremo le tecnologie relative ai vari processi di conversione energetica.

[12.2]

Le tecnologie di conversione termochimica

L'energia prodotta dalla raccolta e in seguito dall'utilizzo delle biomasse per-

mette di produrre sia energia elettrica, sia energia termica. Le tecnologie di conversione possono essere realizzate su grande scala (ad es. centrali di generazione di energia elettrica) o su scala ridotta (ad es. caldaie per uso civile).

Combustibili legnosi

Pellets

Il pellet è una estrusione in continuo che viene suddivisa poi in tronchetti di differenti dimensioni (diametro da 6 a 12 mm altezza da 12 a 18 mm) idonei per l'alimentazione di stufe e caldaie. Si ottiene grazie all'azione di macchine pellettizzatrici che agiscono comprimendo residui legnosi di ridotte dimensioni, trucioli, segatura, corteccia, appartenenti a diverse specie legnose. La fase di compressione può essere preceduta, se necessario, da interventi di triturazione qualora il pezzame presenti dimensioni elevate, e di essiccazione, tenendo presente che per avere un combustibile che assicuri ottima resa e limitato inquinamento, occorre che il livello di umidità non superi il 15%.

I pellets sono caratterizzati da un basso contenuto di umidità, 6-10%, così come un basso contenuto di ceneri, approssimativamente 0.5%; peculiarità del pellet, che lo contraddistingue dal legno, è quella di presentare un volume praticamente costante. Questa sua caratteristica è conseguenza del processo di formazione: la compressione di materiale fine, infatti, porta alla realizzazione di un prodotto con porosità nettamente inferiore rispetto al legno. Il pellet ha un potere calorico inferiore di circa 4200 kcal/kg, nettamente superiore rispetto agli altri combustibili di origine legnosa.

Queste proprietà contribuiscono ad evidenziare le qualità del prodotto dal punto di vista della commercializzazione e degli spazi necessari per lo stoccaggio.

Cippato

L'etimologia del termine è la derivazione dall'inglese chips "pezzettini"; nel caso specifico si tratta di pezzettini di legno ricavati da scarti in lavorazione da piante prive di sostanze inquinanti (quali vernici, ecc.). Il cippato, infatti, è ottenuto da scarti di legno puro delle segherie, scarti di potature e di tagli derivanti da manutenzione dei boschi e delle aree verdi. Utilizzando il cippato, si riscontrano notevoli risparmi complessivi, in più si evitano sprechi essendo questa una risorsa che altrimenti andrebbe dispersa.

Dato il prezzo molto basso, essendo non inquinante e rinnovabile, in alcune regioni viene molto usato, in particolare nel teleriscaldamento, con un risparmio dell'80% sui gas e idrocarburi.

La tecnologia più diffusa per la produzione di energia elettrica è la combustione in caldaia di biocombustibili solidi con produzione di vapore che alimenta una turbina accoppiata ad un alternatore per la generazione di elettricità.

Per quanto riguarda l'uso civile, l'utilizzo di materiale legnoso per fini energetici si sta intensificando in relazione all'aumento di caldaie a legna, passando dai vecchi sistemi a caricamento manuale alle moderne e sofisticate caldaie ad elevato grado tecnologico, dotate di dispositivi di controllo automatici, e in grado di soddisfare da sole il fabbisogno energetico delle unità abitative con rendimenti termici che possono raggiungere il 90%.

Le caldaie moderne bruciano *combustibili legnosi* di alta qualità, come i *pellets*, il *cippato* e gli scarti di lavorazione, con emissioni paragonabili a quelle dei sistemi convenzionali a gas e gasolio.

La combustione in caldaie industriali, invece, è economicamente concepibile solo in impianti di significative dimensioni, che quindi prevedano una soglia minima dell'ordine di 1 MW_e, corrispondenti ad un consumo di biomassa (al 35% di umidità) pari a circa 25 tonnellate al giorno. Il rendimento elettrico di questi impianti è generalmente dell'ordine del 25%, per cui è fondamentale, da un punto di vista economico e ambientale, massimizzare il recupero del calore di processo, pari al 75% dell'energia immessa con il combustibile: ciò non sempre è possibile, anche considerando che le possibili utenze termiche sono normalmente stagionali e, per motivi ambientali, non localizzate vicino agli impianti.

Le tecnologie di conversione termochimica che verranno analizzate di seguito, sono:

- la combustione;

Biomasse utilizzabili a fini energetici e relativi processi di conversione energetica

Tipo di biomasse	Caratteristiche di base		Processo
	Rapporto C/N	Contenuto H ₂ O	
Piante e residui legnosi e cellulósici	C/N>30	H ₂ O = 30%	Combustione Carbonizzazione Gassificazione Pirolisi
Piante e residui cellulósici e amilacei	*	H ₂ O > 30%	Idrolisi e fermentazione alcoolica
Piante e residui zuccherini	*	15 < H ₂ O < 90%	fermentazione alcoolica
Piante e residui fermentiscibili	20<C/N<30	H ₂ O > 30%	Digestione anaerobica
Piante e residui oleoginosi	*	H ₂ O > 30%	Estrazione di olio
Deiezioni animali	20 <C/N< 30	70 < H ₂ O < 90%	Digestione anaerobica

(*) Il rapporto C/N può essere qualsiasi

- la *gassificazione*;
- la *pirolisi*;
- la *termovalorizzazione* dei rifiuti.

Combustione

La combustione consiste nell'ossidazione completa di una sostanza, che brucia in presenza dell'ossigeno contenuto nell'aria, il quale agisce da comburente. Si tratta di una reazione esotermica nel corso della quale l'energia chimica contenuta nel combustibile si libera sotto forma di calore.

Gli schemi classici prendono in considerazione quattro fasi distinte, caratterizzate dalla trasformazione del combustibile: riscaldamento e essiccazione (fino a circa 200 °C), pirolisi, fase gassosa, reazioni di ossidazione del carbonio.

Per quanto riguarda la combustione, i sistemi di piccola taglia sono impiegati nel settore industriale essenzialmente per la produzione di energia termica: solo in Italia il loro numero è stimato in oltre 3.000 unità. Per la produzione combinata di energia elettrica e termica, invece, sono impiegati sistemi di taglia maggiore e più sofisticati.

Già da diversi anni sono in funzione numerosi impianti di media-grossa taglia alimentati a biomassa che generalmente privilegiano la produzione combinata di elettricità e calore e in diversi casi alimentano dei sistemi di teleriscaldamento. La soluzione della produzione combinata elettricità e calore (CHP, *Combined Heat and Power*), per esempio, è stata adottata in Danimarca, dove vengono impiegati generalmente combustori a griglia alimentati da paglia, cippato di legna e rifiuti. La potenzialità di questi impianti è relativamente bassa, con taglie che partono da circa 2 MW_e per arrivare ad oltre 20 MW_e. La combustione di biomasse, nel complesso, fornisce un significativo ammontare di energia, sia come calore che come energia elettrica.

I diversi sistemi di combustione utilizzati sono:

- a *griglia* – fissa o mobile la griglia è un elemento fondamentale oltre che per la reazione termica, anche per la rimozione delle ceneri; i sistemi fissi sono generalmente usati per i combustori di piccola taglia. Per gli impianti industriali si adoperano le griglie mobili che facilita-

no la movimentazione, il rimescolamento del combustibile e la rimozione delle sue ceneri; tali griglie possono essere di vario tipo, vibranti orizzontalmente e/o verticalmente, a nastro, rotante, a gradini, a rulli, ecc., e in alcuni casi vengono raffreddate con aria o con acqua per consentirne un carico termico specifico maggiore;

- *in sospensione* – scelta indicata per le biomasse polverulenti e leggere tipo la lolla di riso, la segatura, la polvere di legno e la paglia triturata, in cui la biomassa viene alimentata nella parte superiore del combustore e brucia mentre cade sulla griglia sottostante, avente principalmente la funzione di scarico delle ceneri;
- *a tamburo rotante* – soluzione utilizzata per applicazioni in cui il combustibile ha caratteristiche termo-fisiche particolarmente povere e contenente elevati carichi di inquinante. La biomassa in combustione è continuamente rimescolata dalla lenta rotazione del tamburo e il percorso dei prodotti di combustione può essere in equicorrente o in controcorrente con la direzione di avanzamento della biomassa;
- *a doppio stadio* – processo in cui si verifica preliminarmente la gassificazione e la pirolisi del materiale, in una prima camera, e una completa combustione dei prodotti gassificati in una seconda, costituente il corpo principale del trasferimento dell'energia al fluido vettore;
- *in letto fluido* – soluzione che consente di trattare vari tipi di biomassa, inclusi i materiali carboniosi "difficili" quali ligniti, torbe, rifiuti solidi urbani selezionati, fanghi di varia natura, anche ad elevata percentuale di umidità (> 40%). La camera di combustione è parzial-

mente riempita con materiale inerte, quale la sabbia o l'allumina, che viene fluidificato dall'aria di combustione primaria in modo da costituire il "letto bollente" o, nel caso di maggiore velocità dell'aria e di trascinarsi del materiale, il cosiddetto "letto ricircolato", il quale viene recuperato e reimpresso nella camera di combustione. Oltre al materiale inerte può essere immesso anche del materiale che permette di variare le condizioni dell'ambiente nel quale si verifica la combustione: infatti, nel caso di combustibili inquinati con composti acidi o contenenti ceneri basso-fondenti, si può usare del calcare o della dolomite per abbattere gli inquinanti acidi e per evitare la fusione delle ceneri nelle condizioni operative del combustore.

I principali dispositivi per il settore civile (riscaldamento degli ambienti) che vedono numerosi modelli in commercio sia a livello nazionale che europeo, possono essere così raggruppati:

- *termocucine a legna*, di uso prettamente mono-familiare, adibite sia al riscaldamento di ambienti sia per la cottura dei cibi, aventi un rendimento globale di circa il 70-75%;
- *termocamini a legna*, anche questi per uso mono-familiari, con scambiatori ad acqua o ad aria, aventi una efficienza media pari a circa il 50%;
- *caldaie a legna di piccola-media potenza* (20-300 kW_{th}), aventi una efficienza media variabile tra il 60-80%, in grado di garantire il riscaldamento di singole unità abitative o di piccoli complessi residenziali, dotati nel caso delle taglie più piccole di griglia fissa e di caricamento manuale del combustibile, mentre per le potenzialità maggiori sono presenti tramogge di carico, siste-

mi di alimentazione, griglie fisse o mobili, sistemi di evacuazione delle ceneri e abbattitori di polveri prima dello scarico dei fumi al camino. Le caldaie per il riscaldamento dell'acqua sono del tipo a tubi di fumo, in cui i gas caldi di combustione attraversano i fasci tubieri immersi nell'acqua cui trasferiscono il calore.

Per quanto riguarda il settore agricolo sono particolarmente interessanti i combustori a larga camera e a griglia mobile, dotati di opportuni sistemi per l'alimentazione di paglia in balle, dei residui di potatura degli alberi, residui della lavorazione agro-industriale.

Da quanto esposto si desume che le apparecchiature adoperate per la combustione puntano a recuperare la massima parte dell'energia sviluppata durante il processo. Tale recupero può avvenire in modo diretto tramite le pareti del dispositivo (stufe), oppure in modo indiretto per mezzo di fluido vettore (caldaie). La presenza della sezione di recupero del calore non solo è conveniente dal punto di vista energetico e economico, ma si rende necessaria per ridurre la temperatura dei fumi in uscita della camera di combustione (si può arrivare a 1200 °C) a livelli tali da rendere possibile il loro trattamento (non superiore a 300 °C). I dispositivi di combustione delle biomasse presentano delle caratteristiche costruttive differenti a seconda che il loro impiego sia destinato al settore civile, agricolo o industriale.

Gassificazione

Si tratta di un processo non ancora maturo e in via di sviluppo, in particolare la gassificazione per la produzione di combustibili liquidi *sun-diesel*.

Attraverso la gassificazione è possibile convertire materie prime quali legno, bio-

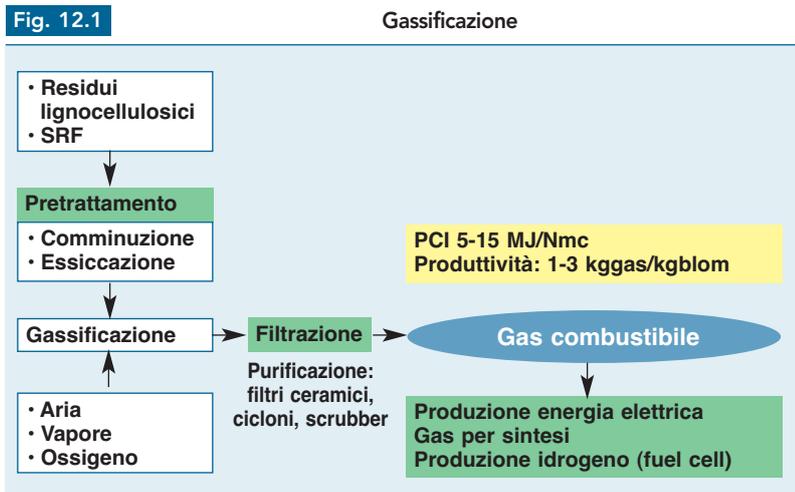
masse lignocellulosiche coltivate, residui agricoli o rifiuti solidi urbani, in un gas combustibile molto più versatile da utilizzare. Tale gas può infatti essere impiegato in motori a combustione interna (MCI), per l'alimentazione di turbine a gas o cicli combinati o anche per applicazioni più avveniristiche come l'alimentazione di *fuel cells*.

Il processo di gassificazione (fig. 12.1) consiste nella trasformazione di un combustibile solido, nel caso specifico la biomassa, in combustibile gassoso, tramite la reazione con l'ossigeno. Da questo processo si ottiene, infatti, un gas a basso potere calorifico (detto gas di gasogeno) variabile tra 900 e 1200 kcal/Nm³, per reazione della biomassa stessa con una quantità di aria tale da non consentire completa ossidazione.

L'utilizzazione del gas di gasogeno quale vettore energetico, pone alcune limitazioni legate essenzialmente ai problemi connessi con il suo immagazzinamento e trasporto, causa il basso contenuto energetico per unità di volume. Ciò fa sì che risulti eccessivamente costoso il trasporto su lunghe distanze. Tali inconvenienti possono essere superati trasformando il gas in metanolo (CH₃OH), che può essere agevolmente utilizzato per l'azionamento di motori.

Le tecnologie relative alla gassificazione si distinguono in base a un determinato parametro che è la pressione di esercizio. Si hanno così gassificatori che operano sotto pressione oppure a pressione atmosferica. La composizione del gas e il potere calorifico non sono significativamente diversi per i due sistemi, tuttavia, rispetto ai gassificatori atmosferici i *gassificatori pressurizzati*:

- hanno un sistema d'alimentazione più complesso e costoso,



Fuel cells (celle a combustibile)

Le moderne celle a combustibile sono reattori elettrochimici in grado di convertire l'energia chimica delle reazioni che in essi avvengono direttamente in energia elettrica (v. capitolo 13). Questo passaggio diretto comporta rendimenti elevati e assai maggiori di quelli dei tradizionali sistemi per produrre energia. Rispetto alle modalità classiche di generazione energetica si evita infatti il ciclo termico intermedio.

Si possono qui riassumere una serie di vantaggi derivanti dall'uso di celle a combustibile:

- i dispositivi non presentano parti in movimento, assicurando una maggiore sicurezza per le persone che operano nelle vicinanze, un progetto più semplice, una maggiore affidabilità e silenziosità;
- il ridotto impatto ambientale di tipo chimico e acustico, rende questi sistemi particolarmente appropriati per la produzione di energia elettrica, anche nelle vicinanze di centri abitati;
- l'alimentazione di cella può essere costituita da metano, metanolo, gas naturale e gas di sintesi (da combustibili liquidi, gassificazione del carbone, biomassa); quasi tutti i tipi di cella offrono una buona flessibilità nella scelta dei combustibili;
- sono applicabili in sistemi di generazione dispersa (generatori stazionari on-site, piccoli gruppi elettrogeni, autotrazione, ecc.) e, se operanti ad alta temperatura, offrono la possibilità di cogenerazione.

Uno dei maggiori limiti degli impianti tradizionali è costituito dalla forte dipendenza dalle variazioni di carico elettrico e dalle dimensioni minime per avere un rendimento accettabile: le buone prestazioni in condizioni di off-design e la flessibilità di taglia delle celle a combustibile costituiscono quindi un ulteriore motivo a favore della loro affermazione, la loro modularità inoltre permette di soddisfare eventuali richieste di potenze maggiori senza influire troppo sul piano economico e sui tempi di costruzione.

- comportano investimenti più alti a parità di dimensioni,
- non richiedono la compressione del gas prodotto per l'accoppiamento con turbogas, permettendo più alti contenuti di catrame nel gas e la depurazione a caldo dello stesso,
- hanno efficienza più alta, grazie alla ritenzione del calore sensibile e all'energia chimica del catrame nel gas.

I gassificatori atmosferici comunque:

- producono senza particolari oneri gas idoneo per impieghi nei motori a combustione interna (MCI) per i quali non è richiesta pressione;
- presentano costi di investimento potenzialmente inferiori a più basse potenze (sotto i 30 MW_e).

Il gas può essere usato per un elevato numero di applicazioni; idealmente si considera la completa conversione di tutti i prodotti condensabili, gli idrocarburi e il particolato solido nel gassificatore, per ottenere gas combustibile.

Il processo di gassificazione, inoltre, può essere impiegato per la produzione di idrogeno, combustibile primo di *fuel cells* (v. anche capitolo 13).

Pirolisi

Un altro processo di conversione è la pirolisi, che mira ad ottenere combustibili liquidi più facilmente trasportabili (bio-oli), e la produzione di bioetanolo da biomasse lignocellulosiche.

La pirolisi è un processo di decomposizione termochimica di materiali organici, ottenuto mediante l'applicazione di calore, a temperature comprese tra 400 e 800 °C, in completa assenza di un agente ossidante, oppure con una ridottissima quantità di ossigeno (in quest'ultimo caso il processo può essere descritto come una parziale gassificazione). Il calore è gene-

ralmente fornito indirettamente in vari modi, sebbene la parziale gassificazione possa essere sfruttata per fornire direttamente calore a spese delle sostanze carbonizzate e dei prodotti liquidi.

In questo processo si sfrutta la *generica biomassa*: una miscela di emicellulosa, cellulosa, lignina e altre sostanze organiche presenti in quantità minore. Ciascun componente subisce il processo di pirolisi in diversa misura e con diversi meccanismi (fig. 12.2); il grado di decomposizione di ciascuno dipende dai parametri di processo della pirolisi: temperatura di reazione, livello di riscaldamento della biomassa e pressione. I prodotti della pirolisi sono sia gassosi, sia liquidi, sia solidi, in proporzioni che dipendono dai metodi e dai parametri di reazione. Il grado della reazione secondaria dei prodotti gas-vapore dipende dalla storia (tempo-temperatura) a cui essi sono stati sottoposti. Sebbene alcune ricerche mirate siano state condotte relativamente ai singoli componenti delle biomasse, la maggior parte degli studi e delle sperimentazioni finora effettuati si è concentrata sull'intera biomassa, in quanto, a tutt'oggi, i costi di pre-separazione

dei componenti elementari della biomassa sono considerati troppo alti.

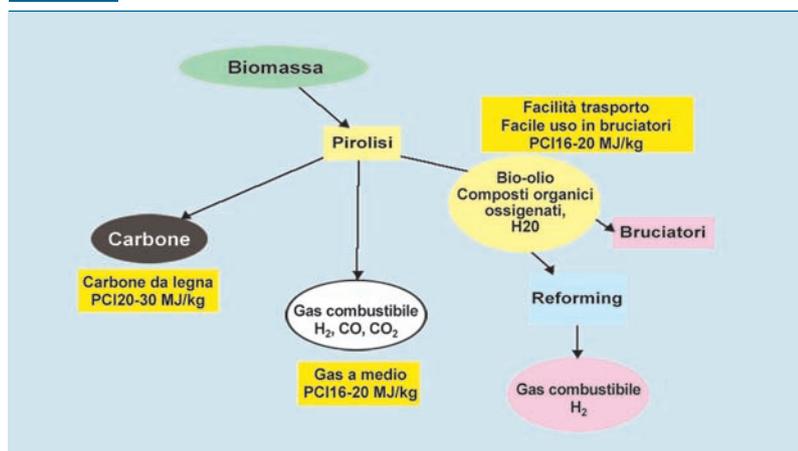
Ad esempio, la separazione di lignina e emicellulosa pure risulta molto difficoltosa, e quindi particolarmente costosa, a causa dei cambiamenti strutturali che intervengono nei processi, mentre è relativamente facile ottenere cellulosa pura. Le più comuni modalità di esecuzione del processo di pirolisi sono:

- la *carbonizzazione*, il più antico e conosciuto processo di pirolisi, che avviene a temperature comprese tra i 300 e 500 °C; da tale processo si recupera solo la frazione solida (carbone vegetale), per cui si procede in modo da minimizzare le altre frazioni;
- la *pirolisi convenzionale*, che avviene a temperature moderate, minori di 600 °C, con moderati tempi di reazione; da tale si ottengono approssimativamente le tre frazioni in uguale proporzioni;
- la *fast pirolisi*, che avviene a temperature relativamente basse (da 500 a 650 °C); in questo processo le reazioni della gassificazione avvengono velocemente e con tempi di contatto brevi in modo da ridurre il riformarsi di composti intermedi, favorendo la produzione della frazione liquida fino al 70-80% in peso della biomassa in entrata;
- la *flash pirolisi*, realizzata in modo da mantenere gli stessi tempi di contatto della fast pirolisi, ma a temperature superiori a 700 °C e con tempi di contatto inferiori ad un secondo, in modo da favorire la produzione di una frazione liquida intorno all'80% in peso della biomassa in entrata, ma con una variazione di composizione più ristretta.

In sintesi, con il processo di pirolisi si trasforma un combustibile a bassa densità energetica (3000-4000 kcal/kg) in un altro a più elevato contenuto energetico spe-

Fig. 12.2

Energia dalle biomasse



cifico (8000-10000 kcal/kg), riducendone di conseguenza i costi di trasporto.

I prodotti liquidi della pirolisi devono subire ulteriori processi per aumentarne la qualità e la stabilità (*up-grading*) per ottenere un prodotto chiamato "bio-olio", utilizzabile per esempio, come combustibile in campo industriale, per il riscaldamento dei forni di cottura per il cemento e la calce.

La termovalorizzazione dei rifiuti

Un'altra importante applicazione delle tecnologie di conversione termochimica è la valorizzazione energetica dei rifiuti, quale ottima alternativa al recupero di materia, in quanto consente:

- recupero energetico,
- igienizzazione e inertizzazione dei rifiuti,
- protezione dell'ambiente,
- riduzione della quantità di rifiuti smaltiti in discarica e conseguente aumento del rendimento volumetrico delle discariche.

In particolare la termovalorizzazione dei RSU può essere condotta secondo tre possibili vie:

- incenerimento di RSU tal quali;
- incenerimento di una frazione combustibile ricavata da separazione grossolana, mediante selezione meccanica dei rifiuti urbani;
- incenerimento di combustibile derivato da rifiuti (CDR), ottenuto attraverso una separazione raffinata del rifiuto urbano in modo da aumentarne il potere calorifico.

È possibile bruciare i rifiuti in impianti dedicati oppure in impianti industriali convenzionali (cementifici, centrali elettriche, ecc.). Lo schema generale di un impianto di incenerimento prevede, oltre alla eventuale sezione di separazione di alcuni componenti dai RSU, una fossa biologica, un sistema di convogliamento alla camera di combustione, il recupero

energetico, la bonifica dei fumi e un forno inceneritore.

Inoltre, la parziale sostituzione dei combustibili fossili con rifiuti (o combustibili derivati dai rifiuti) in centrali termoelettriche o impianti industriali, detta co-combustione, consente numerosi vantaggi quali eliminazione dei rifiuti e risparmio di combustibili fossili, nonché risparmio di materia con riduzione dell'effetto serra e incremento dell'efficienza energetica.

La maggior parte delle esperienze di co-combustione hanno riguardato particolari tipologie di rifiuti speciali o di rifiuti tipici della produzione industriale in relazione alle necessità di smaltimento delle diverse realtà locali. Le principali tipologie di rifiuti utilizzati sono:

- pneumatici usati,
- fanghi attivi dei processi di depurazione,
- carta,
- paglia,
- rifiuti di legno (segatura, demolizioni, ecc.),
- biomasse (pellami, scarti mercatali, ecc.),
- letame,
- plastiche.

Infine, è importante ricordare che grazie all'evoluzione tecnologica dei sistemi di abbattimento degli inquinanti prodotti durante la combustione, oggi è possibile realizzare inceneritori con un impatto ambientale assolutamente accettabile.

[12.3]

Le tecnologie di conversione biochimica

I processi di conversione che descriveremo riguardano applicazioni sia mature sia in via di sviluppo.

Digestione anaerobica

La digestione anaerobica è un processo di conversione consistente nella demolizione, ad opera di micro-organismi, di sostanze organiche complesse (lipidi, protidi, glucidi) contenute nei vegetali e nei sottoprodotti di origine animale, che produce un gas (biogas) costituito per il 50-70% da metano e per la restante parte soprattutto da CO₂, e avente un potere calorifico medio dell'ordine di 23.000 kJ/Nm³. Tale processo si svolge in assenza di ossigeno, tramite lo sviluppo di popolazioni micro-organiche, in tre stadi successivi:

- *idrolisi*, ossia rottura per effetto di molecole di acqua, delle grandi molecole quali la cellulosa, le proteine e i lipidi;
- *acidificazione e fermentazione* di acidi volatili, di anidride carbonica e di idrogeno;
- *metanizzazione* dei prodotti derivanti dal secondo stadio, per azione dei batteri metanigeni presenti.

Il processo avviene entro un apposito recipiente (digestore), in cui viene immessa una massa (substrato) formata da sostanza secca (solidi totali) e acqua, in concentrazioni variabili. La materia che viene demolita è il 40-60% della sostanza organica (solidi volatili) presente nel substrato, il quale deve essere mantenuto nel digestore ad una temperatura di circa 35-37 °C (nota come fascia mesofila) per un periodo di ritenzione massimo di 20 giorni, diverso a seconda della tecnologia impiegata, delle fluttuazioni della temperatura esterna, nonché della composizione dello stesso substrato. Alcuni nuovi processi operano a temperature maggiori di 55 °C (fascia termofila) offrendo la possibilità di ottenere un maggior grado di decomposizione.

Il biogas così prodotto viene raccolto, essiccato, compresso e immagazzinato e può essere utilizzato per alimentare lo stesso processo di bioconversione, veicoli a gas, ovvero caldaie a gas per riscaldare l'acqua o produrre energia elettrica.

Un contributo importante che può dare questo processo è relativo alla riduzione dei gas serra.

Le deiezioni animali rappresentano circa il 90% delle circa 1.200 milioni di tonnellate di biomassa prodotta annualmente nei paesi dell'Unione Europea.

Le emissioni di metano prodotte dalle attività zootecniche derivano sia dai processi digestivi (emissioni enteriche) sia dalla degradazione anaerobica delle deiezioni animali (emissioni derivanti dalla gestione delle deiezioni).

Riduzioni delle emissioni di metano possono essere ottenute attraverso interventi sulle strutture di stoccaggio delle deiezioni, che consistono sostanzialmente nella copertura dei contenitori di stoccaggio dei liquami, con captazione del biogas e combustione dello stesso. In tal modo è possibile da un lato limitare sostanzialmente le emissioni di metano, dall'altro attraverso la combustione di quest'ultimo, produrre energia da fonti rinnovabili (elettrica e termica nel caso di utilizzo di cogeneratori, o soltanto termica qualora il biogas venga utilizzato in caldaia) sostituendo combustibili fossili.

Digestione aerobica

Il processo di digestione aerobica consiste nella metabolizzazione delle sostanze organiche per opera di micro-organismi, il cui sviluppo è condizionato dalla presenza di ossigeno. Questi batteri convertono sostanze complesse in altre più semplici, liberando CO₂ e H₂O e producendo un

elevato riscaldamento del substrato, proporzionale alla loro attività metabolica. Il calore prodotto può essere così trasferito all'esterno, mediante scambiatori a fluido.

In Europa viene ampiamente utilizzato (soprattutto in Germania, dove sono imposte stringenti norme circa la distruzione delle sostanze patogene) il processo di digestione aerobica termofila autoriscaldata (*Autoheated Thermophilic Aerobic Digestion*) per il trattamento delle acque di scarico. Più recentemente tale tecnologia si è diffusa anche in Canada e Stati Uniti. Il processo necessita generalmente di un periodo di ritenzione di circa sei giorni ed è in grado di raggiungere alti gradi di stabilizzazione e di distruzione dei microbi patogeni.

[12.4]

Produzione di combustibili liquidi

Produzione di biodiesel

Esistono altre tecnologie che utilizzano particolari tipi di sostanze organiche quali ad esempio gli oli vegetali che possono essere estratti da piante oleaginose tipo soia, colza, girasole, ecc.

Caratteristica comune di tutte le oleaginose è quella di essere ricche di materie proteiche le quali, dopo l'estrazione dell'olio, sono impiegabili nell'alimentazione animale sotto forma di panelli. I principali paesi produttori europei sono:

- per la *colza*, Germania, Francia, Gran Bretagna e Danimarca;
- per il *girasole*, Francia, Spagna e Italia;
- per la *soia*, principalmente Stati Uniti, Brasile e Argentina.

La tecnologia di estrazione consente di

separare le sostanze grasse dalla matrice proteica che le sostiene, pervenendo all'isolamento di ciascuna di esse. I processi tecnologici di estrazione rappresentano una successione di operazioni la cui complessità dipende dalla morfologia della materia prima. Gli oli possono essere utilizzati come combustibili nello stato in cui vengono estratti oppure dopo esterificazione, e il loro utilizzo ha destato ormai da tempo un notevole interesse, sia per la disponibilità di tecnologie semplici di trasformazione e utilizzazione, sia perché consentono bilanci energetici favorevoli.

Il biodiesel, in particolare, deriva dalla transesterificazione degli oli vegetali (soia, colza e girasole) effettuata con alcool metilico e etilico: il risultato è un combustibile simile al gasolio e utilizzabile sia puro, sia in miscela con il gasolio stesso. Dal 1992 la produzione di biodiesel da colza e girasole è sensibilmente aumentata; inizialmente il business legato al biodiesel derivava essenzialmente da motivazioni agricole mentre oggi si sono affermate le motivazioni energetiche e ambientali. Le stime della produzione a livello europeo per il 2001 sono di circa 750.000 tonnellate di biodiesel, che significa 14 volte la produzione del 1992; le valutazioni sulla produzione del 2007 superano i 5 milioni di tonnellate.

Grazie ad un importante aumento del volume di olio di colza prodotto, la Germania si pone al primo posto in Europa per la produzione di biodiesel; la Francia si colloca al secondo posto; seguono Austria e Italia. Il Belgio ha una discreta capacità produttiva ma la produzione è fortemente variabile di anno in anno. Esistono numerosi impianti di esterificazione in funzione nei Paesi citati oltre a Svezia e Repubblica Ceca.

Il trend va comunque nella direzione dell'incremento a causa della crescita di nuovi progetti.

La Gran Bretagna ha approvato una defiscalizzazione del prodotto che dovrebbe causare la realizzazione di altri impianti. Francia e Italia prevedono l'esenzione dall'accisa per un contingente annuo; in Germania e Austria non vi sono limiti quantitativi per la vendita del biodiesel puro.

Fermentazione alcolica e bioetanolo

La fermentazione alcolica è un processo, di tipo micro-aerofilo, di trasformazione in *bioetanolo* dei glucidi contenuti nelle produzioni vegetali; esso interessa tutti i prodotti e sottoprodotti agricoli ricchi di glucosio, presente sotto forma di zuccheri, di cellulosa, di emicellulosa di lignina o di amido. Questi ultimi, essendo polisaccaridi, possono essere trasformati in alcool etilico previo trattamento di idrolisi, avente il compito di rompere le grandi molecole riducendole a glucosio.

Il bioetanolo viene prodotto, quindi, tramite processi di fermentazione e distillazione di materiali zuccherini o amidacei; la destinazione più considerata è il suo utilizzo nella sintesi dell'ETBE (*EtilTertio ButilEtere*), usato in miscela alle benzine come antidetonante in sostituzione del piombo tetraetile o degli idrocarburi aromatici.

Il bioetanolo viene oggi prodotto in quantità industriale per essere utilizzato come carburante in Brasile e negli USA, mentre vari programmi di ricerca e sviluppo sono portati avanti in Germania, Svezia, Italia e Francia.

Tali sostanze sono utilizzabili anche nei motori a combustione interna, e la loro

applicazione si è fortemente ampliata a partire dalla metà degli anni settanta, a causa della crisi petrolifera, con l'intento di costituire una valida alternativa ai carburanti di tipo tradizionale. Il particolare interesse verso la filiera dei biocombustibili è anche dovuto alla necessità di individuare valide soluzioni per il contenimento dell'inquinamento causato dai combustibili fossili usati per i trasporti; infatti, il traffico stradale è responsabile per il 93% delle emissioni di CO e per il 12% di quelle di CO₂. I biocombustibili, di contro, sono di origine vegetale e quindi non contribuiscono in maniera netta all'emissione in atmosfera né di CO₂, né di altre sostanze nocive associate ai combustibili fossili.

[12.5]

Le principali aree di applicazione

La quantificazione del consumo di legno a fini energetici è una operazione estremamente complessa, in quanto non esistono rilevazioni sufficientemente attendibili, in particolare per ciò che concerne gli utilizzi domestici. Tuttavia, va sottolineato che il mercato del calore per il riscaldamento di edifici (e per usi industriali a piccola scala) vede già ora le biomasse lignocellulosiche in posizione di grande competitività nei confronti dei combustibili fossili.

Energia per uso domestico

Nel comparto domestico, stufe, camini, caldaie e termocucine di potenza di qualche decina o centinaio di kW sono correntemente commercializzate.

Oggi il mercato dei dispositivi di piccola

potenza (10-50 kW) per riscaldamento domestico si aggira in Italia in qualche decina di migliaia di unità all'anno.

La convenienza economica di un impianto di riscaldamento a biomassa si basa sui tempi di ammortamento dell'investimento, che dipendono dal risparmio di gasolio/gas e quindi dall'intensità d'uso dell'impianto. Attualmente, in base ai prezzi dei combustibili per riscaldamento, il costo del kWh termico da biomassa può essere anche di 2-3 volte inferiore a quello del gasolio.

Abitazioni di piccole dimensioni o abitate solo saltuariamente o situate in zone a clima mite, hanno un basso fabbisogno energetico e richiedono lunghi tempi di ripagamento dei costi di investimento. Viceversa, abitazioni di dimensioni relativamente grandi e abitate con continuità per tutto l'anno, presentano sovente fabbisogni annuali di calore superiori ai 50.000 kWh, equivalenti a 5.000 litri di gasolio, 5.000 m³ di metano o 6.300 litri di gas liquido (GPL). In queste situazioni l'impianto a biomassa può essere molto conveniente, anche in considerazione dei minori costi unitari per gli impianti di maggiore potenza.

Nei centri urbani si inizia ad utilizzare il teleriscaldamento, che sfrutta l'energia termica di cogeneratori alimentati con fonti fossili e in qualche caso con rifiuti urbani. Attualmente il teleriscaldamento in Italia è esteso a 27 città, con un totale di 53 reti per una lunghezza complessiva di 1091 km e una potenza complessiva installata di 730 MW_e e 3000 MW_{th}.

Infine, nel bilancio economico è necessario valutare anche eventuali incentivi pubblici, disponibili in qualche caso come contributi a fondo perduto, oppure come detrazioni di imposta.

Energia termica per usi industriali

Nel settore industriale ci sono molteplici realtà che ben si prestano alla valorizzazione degli scarti lignocellulosici, derivanti dal loro stesso ciclo produttivo, da riutilizzare come risorsa per la produzione di energia termica (riscaldamento, raffrescamento, calore di processo) e anche elettrica di cui necessitano. In molti casi le grandi imprese arrivano a disporre di quantitativi ragguardevoli di biomasse residuali tali da consentire loro, oltre al soddisfacimento delle proprie esigenze energetiche, la messa in rete del surplus di energia prodotta. Tale valorizzazione determina vantaggi da un punto di vista economico, sia per il risparmio sull'energia da acquistare o eventualmente per quella venduta, sia per la riduzione dei costi di smaltimento dei residui prodotti. Un altro aspetto da non trascurare è dato dal ritorno di immagine che una corretta politica ambientale, rivolta all'uso di fonti energetiche rinnovabili, può produrre a vantaggio dell'impresa nei confronti dei numerosi consumatori attenti a queste tematiche.

Biocombustibili per i veicoli a motore

Esistono, come spiegato in precedenza, oli vegetali che possono essere estratti da piante oleaginose. Questi oli sono già stati impiegati come carburanti nei motori diesel, anche se in alcuni casi si è riscontrato qualche inconveniente (deposito sugli iniettori, usura delle parti metalliche, gelificazione degli oli nei carter, produzione di elevata fumosità, aumento del consumo nel tempo): l'uso degli oli tal quali esige dunque una messa a punto particolare e impianti di alimentazione specifici.

Queste esigenze si attenuano, o spariscono, se l'olio viene trasformato in estere metilico o etilico.

Il confronto delle emissioni prodotte da motori alimentati a *biodiesel* (metilestere) e a diesel fossile mostra che i *gas di scarico* di veicoli alimentati a *biodiesel* presentano valori inferiori per tutti i principali inquinanti (tranne che per gli ossidi di azoto), diminuzione del particolato dall'8 al 60%, assenza di SO₂, indice di fumosità inferiore alla metà, riduzione di 2/3 dei composti volatili e dal 20 all'80% degli incombusti, diminuzione fino al 40% del CO. Rilevazioni effettuate sui fumi al camino di un impianto di riscaldamento del Centro ENEA di Frascati alimentato con metilesteri della Novaol mostrano una diminuzione del 66% del CO, del 75% delle polveri, tracce di SO₂ e riduzione oltre il 70% dei composti benzenici, mutageni e cancerogeni, mentre l'NO_x resta invariato.

Un altro combustibile, in via di sviluppo, potrebbe essere l'idrogeno, ritenuto il combustibile del futuro. L'utilizzo dell'idrogeno presenta problemi connessi con la sua disponibilità a costi contenuti, lo stoccaggio a bordo del veicolo, la creazione di adeguate infrastrutture di distribuzione e aspetti di sicurezza e accettabilità da parte degli utenti.

La conversione in idrogeno a bordo dell'auto, di un combustibile fossile o di un derivato da biomassa, è al momento oggetto di studio da parte di molte organizzazioni e istituti di ricerca. Il vantaggio connesso ad una simile scelta sarebbe principalmente quello di utilizzare infrastrutture esistenti; tuttavia la complessità del processo e la messa a punto di sistemi di trattamento in grado di generare idrogeno, della purezza necessaria, senza compromettere le caratteristiche positive

di efficienza, minimo impatto ambientale e flessibilità del sistema di generazione nel suo insieme, è ancora impresa difficile da realizzare.

Un'altra soluzione è rappresentata dal *metanolo*. Rispetto alla benzina, il metanolo presenta una serie di vantaggi, importante soprattutto il fatto che può essere convertito in idrogeno a temperature notevolmente più basse (250-300 °C contro 800-900 °C); caratteristiche importanti dal punto di vista della sicurezza sono una più bassa volatilità e un più alto limite di infiammabilità inferiore. Il metanolo è inoltre un prodotto chimicamente stabile, facile da trasportare, che presenta una buona densità di energia, il che consente al veicolo una autonomia simile a quella dei veicoli tradizionali.

Tuttavia bisogna ricordare che il metanolo risulta tossico e che la sua natura corrosiva lo rende incompatibile con le infrastrutture di distribuzione esistenti.

Da notare che con il metanolo vi è la possibilità di sviluppare celle a combustibile DMFC (*Direct-Methanol Fuel Cell*) in grado di utilizzarlo direttamente; i risultati finora ottenuti in questo settore fanno comunque ritenere che questa soluzione sia proponibile solo a più lungo termine. È chiaro che la transizione ad un ampio uso dell'idrogeno avverrà gradualmente e che nel medio termine giocheranno ancora un ruolo importante l'utilizzo diretto di combustibili come metanolo o benzina nel classico motore a scoppio.

Nel breve termine l'idrogeno sarà utilizzato soprattutto per flotte di veicoli circolanti nei centri urbani, per le quali è possibile centralizzare l'approvvigionamento o le operazioni di ricarica delle bombole.

Il suo impiego per altre tipologie di veicoli potrà aversi solo in una fase successiva e richiederà sviluppi particolari delle

tecnologie di stoccaggio dell'idrogeno stesso.

[12.6] Costi e benefici

Le biomasse, considerate come risorse rinnovabili di energia, permettono già oggi un risparmio di quote rilevanti di combustibili fossili sia nei paesi industrializzati, sia in quelli emergenti o a basso sviluppo tecnologico (usi domestici). Mediamente il 10-12% dell'energia prodotta e consumata in tutto il mondo proviene dalla fonte biomassa.

Se si tiene presente poi che il potenziale delle biomasse tecnicamente utilizzabile a livello mondiale è poco più di 2000 Mtep/anno, circa il 30% degli attuali consumi primari di energia fossile, si capisce l'importanza da attribuire a questo settore. Secondo alcune stime, il 30% di tali risorse sono costituite da colture energetiche e il 15% da residui agricoli di diversa provenienza, risorse che hanno forti interconnessioni con il territorio.

Potenziale energetico

Uno studio condotto in Italia dal CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche), assieme ad ENEA e Università degli Studi di Roma "La Sapienza" CIRPS (Centro Interuniversitario di Ricerca Per lo Sviluppo sostenibile) ha stimato che da biomasse si potrebbero ottenere 3.360.000 tonnellate di idrogeno all'anno, equivalenti a circa 170.000 GWh di energia elettrica, come dire che da sole le biomasse potrebbero soddisfare il 50% del fabbisogno di energia elettrica o il 30-40% del fabbisogno di combustibili e carburanti. Le biomasse intese come combustibili mostrano una spiccata versatilità sia per le

forme fisiche in cui si possono presentare (solide, liquide e gassose), sia per le utilizzazioni energetiche finali (energia termica, meccanica, elettrica).

Per quanto riguarda la *produzione di energia elettrica* da biomasse vegetali, le principali motivazioni che rendono negativa l'economicità dei progetti in questo settore, sono, primi tra tutti, gli ingenti costi di investimento in fase di realizzazione e gli elevati costi della biomassa in fase di gestione. Inoltre, è proprio questo il settore che presenta le maggiori lacune circa le normative e le forme di incentivazione emanate per favorirne lo sviluppo. Basti solo pensare che il costo per MW di potenza necessario per la realizzazione di un impianto viene stimato quattro volte maggiore rispetto a quello necessario per un impianto a ciclo combinato. Quindi, al di là della sensibilità ecologica, per rendere possibile il raggiungimento degli obiettivi fissati dalla Comunità Europea, occorre che i progetti per la produzione di elettricità da biomasse possano usufruire di più adeguati incentivi economici e normativi.

Il settore del *riscaldamento domestico e del teleriscaldamento*, invece, là ove le condizioni siano particolarmente favorevoli, è l'unico che presenta caratteristiche tali da rendere attrattiva la fattibilità economica dei progetti.

Infine, anche il settore dei *biocombustibili liquidi* (biodiesel e bioetanolo) e *gassosi*, strettamente legati al comparto agricolo, dovrà risolvere alcune difficoltà per rendere economicamente vantaggioso il bilancio dell'intera filiera di produzione. Si può immaginare un percorso di sviluppo delle filiere agro-energetiche solo attraverso l'affermazione di adeguati meccanismi di incentivazione a sostegno del reddito degli agricoltori, primo anello

della filiera, fino alla defiscalizzazione del prodotto finito.

Come già ampiamente spiegato, la biomassa è l'unica fonte rinnovabile che prima di essere utilizzata deve essere prodotta (coltivata se di origine agricola o comunque curata se forestale), raccolta e trasportata. In questi aspetti risiede la causa principale dell'elevato costo della biomassa, parametro che limita notevolmente il ritorno economico, e di conseguenza anche l'attenzione, delle imprese potenzialmente interessate al settore della bioenergia.

In genere, il costo di approvvigionamento della materia prima incide per circa il 45% sul costo totale della produzione di energia.

Biomasse e territorio

Vi è una stretta interdipendenza fra biomasse e territorio; l'uso razionale delle rispettive potenzialità può portare notevoli benefici ad entrambi i sistemi.

Ad esempio, l'introduzione nell'uso del territorio di colture non alimentari innovative e la possibilità di utilizzare queste colture a fini energetici e industriali, potrebbe fornire un contributo non trascurabile alla rivalutazione dei terreni non più utilizzati per la produzione alimentare, e per i quali è necessario definire un programma di gestione. Tale programma avrà successo a condizione che sia attuato in un contesto produttivo simile a quello previsto nel settore agricolo alimentare. D'altra parte, lo stato di salute del territorio, inteso non solo in senso fisico ma anche in senso socio-economico, è fondamentale per lo sviluppo delle biomasse.

Infatti, il sistema biomasse attinge dal territorio la materia prima, sia sotto forma di residui da attività agricole e forestali (e delle relative industrie di trasformazione),

sia sotto forma di colture dedicate alla esclusiva produzione di energia; al territorio ritorna buona parte delle uscite sia in termini di energia, sia in termini di sottoprodotti utili per il sistema agricolo.

[12.7]

Mercato e sviluppi futuri

Il mercato è spesso costituito da impianti pilota o dimostrativi. Il mercato futuro dipenderà dagli esiti di questa sperimentazione. Tra i vari processi per la conversione termochimica delle biomasse, di cui si è parlato, la combustione diretta è senza ombra di dubbio la più vecchia e matura. Nonostante ciò, sono in corso ricerche volte allo sviluppo di sistemi sempre più efficienti e con minore impatto ambientale.

Come la combustione diretta, anche la produzione di biogas ad opera della digestione anaerobica e la trasformazione di biocombustibili liquidi sono tecnologie mature per la valorizzazione energetica delle biomasse. Al contrario, la gassificazione e la pirolisi sono più distanti dalla maturità. Il mercato di alcuni combustibili, come il biodiesel e il bioetanolo, è in crescita.

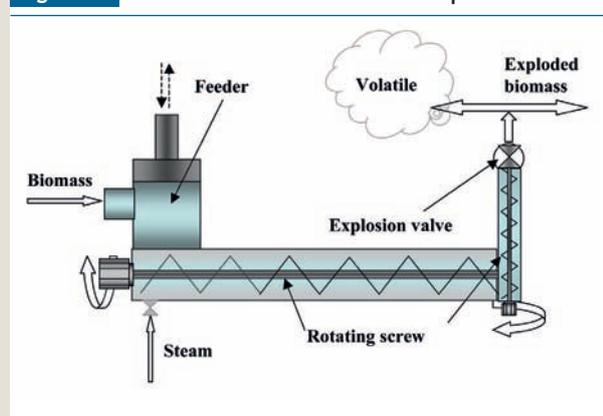
Per quanto riguarda il *biodiesel*, la Germania si pone al primo posto in Europa per la sua produzione, mentre la Francia si colloca al secondo posto. Il trend va nella direzione dell'incremento a causa della crescita di nuovi progetti.

Il mercato dell'etanolo vede invece l'impegno di numerosi paesi nell'elaborazione di programmi per la realizzazione di impianti di produzione sia di grande che di piccola taglia. L'America Latina, in modo particolare il Brasile, risulta la regione a maggior produzione di bioetanolo.

Steam Explosion

Un innovativo trattamento idrotermico delle biomasse si sta affermando in relazione alle numerose aree di applicazione. Questo trattamento, denominato Steam Explosion (esplosione di vapore), rende più facile e di minor impatto ambientale la separazione delle tre differenti frazioni costituenti i comuni substrati vegetali (emicellulosa, cellulosa e lignina), consentendo l'utilizzazione totale delle biomasse.

Fig. 12.3 Schema reattore Steam Explosion



Il processo consiste nel sottoporre il materiale lignocelluloso a un particolare trattamento, con l'uso di vapore saturo ad alta pressione (15-30 kg/cm²) e temperatura (180-230 °C), per riscaldarlo rapidamente in un reattore continuo o discontinuo.

Il materiale viene tenuto alla temperatura desiderata per un breve periodo (1-10 minuti) nel corso del quale l'emicellulosa viene idrolizzata e resa solubile. Alla fine di questo intervallo di tempo, la pressione viene rapidamente riportata al valore atmosferico (decompression) ottenendo una decompressione esplosiva che sfibra ulteriormente la biomassa.

È possibile ottenere, da vari tipi di biomassa vegetale, sia prodotti direttamente commerciabili (pasta da carta, pannelli in fibra, mangimi, ecc.), sia composti utilizzabili in molteplici settori (autotrazione, industrie tessili, dolciarie e della chimica di base).

L'impianto pilota di Steam Explosion Legno (Stele), realizzato in Trisaia dall'ENEA, è uno dei più importanti al mondo, vi si possono trattare a ciclo continuo fino a 300 kg/h di biomassa secca e consente la conversione di biomasse residuali in *biocombustibili* (bioetanolo) e prodotti ad alto valore aggiunto (cellulosa, xilotolo ecc.).

Programmi volti a favorire la produzione di etanolo sono stati realizzati anche in vari Paesi africani, che attualmente sono produttori di zucchero, come Zimbabwe, Kenya e Malawi, anche a seguito di alcuni fatti contingenti: alcuni di essi hanno modernizzato la propria industria dello

zucchero abbassando i costi di produzione; molti inoltre, sono senza sbocco sul mare, e ciò spesso rende non conveniente la vendita di melassa direttamente come co-prodotto nel mercato mondiale, accrescendo la convenienza di un suo utilizzo interno per la produzione di etanolo.

Capitolo Tredici

Superare gli ostacoli alla diffusione delle rinnovabili

L'analisi fin qui condotta sulle tematiche energetico-ambientali, sullo sviluppo compatibile e sulle fonti energetiche rinnovabili, ci consente ora di fare una valutazione sulle prospettive future e i limiti delle rinnovabili, nonché sull'utilizzo di nuove forme di energia indirizzate allo sviluppo di uno scenario energetico compatibile con le risorse messe a disposizione dal pianeta che ci ospita.

Esistono, a fronte di questa ipotetica possibilità, *due principali ostacoli di natura tecnica* alla diffusione delle rinnovabili, che si traducono anche in svantaggi economici: la *difficile vettoriabilità* (trasportabilità) dell'energia rinnovabile verso altri settori di consumo e l'*intermittenza della produzione* di energia, propria delle fonti solari.

Considerato che le fonti più promettenti producono prevalentemente energia elettrica, l'energia rinnovabile non può essere convenientemente trasferita in modo diretto verso altri settori di consumo, quali: il condizionamento invernale degli edifici e dei luoghi di lavoro, l'industria nei suoi consumi non elettrici, la trazione dei veicoli commerciali e privati, ecc. Il suo potenziale sviluppo è quindi limitato dall'effetto di confinamento nel solo mercato parziale dell'energia elettrica, che costituisce oggi il 29% del mercato dell'energia in Italia.

È poi da tenere presente che tutte le fonti rinnovabili più promettenti sono intermittenti: solare termico e termoelettrico, eolico e fotovoltaico. Possiamo prevedere con una discreta attendibilità la quantità complessiva di energia rinnovabile che verrà prodotta nell'arco dell'anno, ma non potremo mai prevedere il valore istantaneo o anche giornaliero di tale produzione. Per esigenze di corretto funzionamento e continuità di servizio, la rete di distribuzione elettrica nazionale non può accettare sorgenti di potenza intermittente oltre un limite ben definito. Occorre pertanto una adeguata strategia se si vuole profittare dell'occasione offerta dall'energia rinnovabile per rispondere alla richiesta di sviluppo sostenibile.

Se si vuole realmente intervenire e por mano al risanamento ambientale, occorre accelerare in modo consapevole il processo, già in atto, di decarbonizzazione dei combustibili usati nella produzione di energia. Infatti la fase presente del ciclo storico di sostituzione dei combustibili fossili riguarda il progressivo passaggio dal petrolio al metano. In termini chimico-fisi-

Idrogeno e celle a combustibile: energia per il futuro

ci tale processo comporta la riduzione del contenuto specifico di carbonio per unità di energia prodotta e il contemporaneo aumento del contenuto percentuale di idrogeno.

Questa tendenza ha peraltro accompagnato l'intero ciclo storico del consumo di energia: si è infatti passati, intorno al 1750, dal consumo delle biomasse come legna da ardere a quello intensivo del carbone minerale; dopo la seconda guerra mondiale, negli anni cinquanta, il carbone ha iniziato la sua parabola discendente in favore del petrolio, che alla fine del secolo scorso regna sovrano.

A partire dagli anni ottanta, si sta però verificando, come abbiamo visto, la graduale sostituzione del petrolio con il gas naturale, il cui consumo è in continua rapida crescita. Mentre la prima fase di questo processo è avvenuta per motivi essenzialmente economici, la fase attuale sta avvenendo in modo consapevole anche per motivi di utilità ambientale.

Quindi l'intero processo evolutivo della storia degli approvvigionamenti energetici può essere visto come un graduale passaggio a combustibili sempre più leggeri in termini di contenuto di carbonio.

A questo punto ci aspettiamo che il passo successivo consisterà nel passaggio dal metano (CH_4) all'idrogeno (H_2) che non contiene più alcun atomo di carbonio e che può essere utilizzato per combustione termica diretta o per combustione elettrochimica catalitica nelle celle a combustibile.

Per superare i limiti sopra indicati all'apporto energetico delle fonti rinnovabili, studi e ricerche oggi convergono verso un nuovo modello di sviluppo, che preveda la possibilità di accumulo e vettoriamento dell'energia solare primaria verso tutti i settori d'uso.

Allo stato attuale della tecnologia, l'idrogeno viene indicato come mezzo di accumulo sotto forma di energia chimica dell'energia solare, in quanto permetterebbe di aggirare i limiti al tasso di penetrazione di questa fonte nella rete elettrica con il trasferimento agli altri settori d'uso, oggi inaccessibili (i trasporti prima di tutto).

La scelta di questo vettore energetico emerge da un esame delle diverse opzioni possibili allo stato attuale della tecnologia, soprattutto in relazione alla necessità di avere un mezzo di accumulo di lungo periodo e un combustibile pulito e versatile.

[13.1]

Il futuro energetico: fonti rinnovabili e idrogeno

Il mondo si sta muovendo verso un'era che vedrà il tramonto della "cultura energetica" del combustibile fossile, cominciata 300 anni fa con il carbone. I petro-geologi non sono concordi nel prevedere quando la produzione di petrolio raggiungerà la sua punta massima (si stima che ciò avverrà quando la metà delle riserve conosciute e di quelle già individuate o che si stima di potere ancora scoprire saranno state utilizzate). Una volta raggiunto quel punto, il prezzo di questa importantissima fonte primaria di energia, che ha determinato e informato lo sviluppo tecnologico dell'era moderna, salirà costantemente e la produzione diminuirà. I più pessimisti pensano che ciò avverrà entro il 2030; gli ottimisti, invece, sostengono che il picco di produzione globale non si verificherà prima del 2050; in ogni caso abbiamo ancora da 20 a 40 anni di "petrolio facile". Dopo di che sulla spinta dei prezzi crescenti è prevedibile che il consumo comincerà a diminuire e, soprattutto, il suo utilizzo si sposterà dal settore dei trasporti e da quella della produzione di elettricità ad altri settori produttivi per i quali tale combustibile rappresenta l'unica materia prima.

L'idrogeno appare essere il vettore di ele-

zione per un sistema energetico sostenibile, in quanto:

- in linea di principio, può essere prodotto da una pluralità di fonti (combustibili fossili, con separazione della CO₂; rinnovabili; nucleare), tra loro intercambiabili e disponibili su larga scala per le generazioni future;
- può essere impiegato in applicazioni diversificate, dal trasporto alla generazione di energia elettrica per taglie da qualche W a diversi MW, con un impatto ambientale nullo o estremamente ridotto sia a livello locale che globale.

[13.2]

L'idrogeno come "vettore energetico"

Proprietà

Dal greco *hydro* e *geno*, "generatore d'acqua", è il primo elemento chimico della tavola periodica degli elementi ed ha come simbolo H. L'idrogeno naturale, costituito da molecole biatomiche (H₂), è un gas incolore, inodore, altamente infiammabile.

Fra tutti gli elementi è il più abbondante nell'universo e, costituito da un solo protone e un solo elettrone, il più leggero; la sua molecola, costituita da due atomi, è 14 volte più leggera dell'aria, quindi l'idrogeno presente in atmosfera tende a disperdersi negli spazi siderali. Per questa ragione sul nostro pianeta è introvabile allo stato libero, al contrario del carbone, petrolio o gas naturale, e si trova legato solo ad altri elementi, come per esempio nei gas vulcanici. È tuttavia costituente fondamentale dell'acqua ed è presente nei combustibili fossili e in tutte le creature viventi.

L'idrogeno si combina facilmente con

l'ossigeno formando acqua; la reazione avviene lentamente a bassa temperatura, con andamento invece esplosivo sopra i 550 °C.

Il suo limite di infiammabilità è molto ampio, essendo compreso fra il 4 e il 75% in volume. Il potere calorifico superiore è di 141,9 MJ/kg, quello inferiore di 119,97 MJ/kg. Per confronto i corrispondenti valori per il metano sono, rispettivamente, 55,53 MJ/kg e 50,02 MJ/kg.

Il vettore idrogeno e la resa energetica

L'idrogeno non può essere considerato una fonte primaria di energia in quanto non è presente in natura allo stato "libero", come detto in precedenza, ma è un "vettore energetico", ovvero è un buon sistema per accumulare o trasportare energia e deve, quindi, essere prodotto a partire da altre fonti energetiche primarie. Esso può essere estratto dall'acqua, dal carbon fossile, dagli idrocarburi, da molti composti organici. L'idea più immediata è ovviamente quella di estrarlo dall'acqua di cui tanto abbonda il pianeta; purtroppo però l'elettrolisi richiede 5 kWh per ottenere 1 m³ di idrogeno ed è quindi economicamente proponibile soltanto dove si disponga di energia elettrica a basso costo (ad esempio da idroelettrico).

L'idrogeno ha il più alto contenuto energetico per unità di massa rispetto agli altri combustibili: bruciando un kg di idrogeno si producono 125.000 kJ di energia termica contro i 44.000 kJ ottenuti da un kg di benzina.

Occorre tuttavia considerare che in condizioni normali (temperatura e pressione ambiente) l'idrogeno si presenta in forma gassosa, mentre la benzina è liquida e quindi con densità di massa molto più elevata. Il risultato pratico è che 1 litro di

idrogeno gassoso nelle condizioni normali (standard) contiene solo circa 2,48 kcal contro le quasi 8.000 kcal di 1 litro di benzina. Ragionando sull'energia specifica per unità di volume di liquido, l'idrogeno allo stato liquido contiene circa 2.000 kcal per litro, valore comunque inferiore, di un fattore quattro, rispetto a quello della benzina; ciò significa che, a parità di tutte le altre condizioni, per avere la resa energetica di 1 litro di benzina occorrono 4 litri di idrogeno liquido; la combustione dell'idrogeno può tuttavia essere realizzata con un'efficienza più alta.

La produzione di idrogeno può divenire un ottimo sistema di utilizzo e accumulo dell'energia, e in particolare di quella ricavata da fonti rinnovabili per loro natura intermittenti, legate per lo più ad eventi atmosferici, all'alternarsi delle stagioni e del giorno e della notte.

Vettore idrogeno e elettricità saranno in grado di soddisfare pienamente le nostre necessità energetiche. Questa infatti sembra essere per la maggior parte degli analisti una valida soluzione, se non l'unica percorribile, sia per rispondere in maniera soddisfacente ai criteri di sostenibilità, inquinamento globale e locale, sia per ridurre nel breve-medio termine l'eccessiva dipendenza dai combustibili fossili, sia, infine, nel lungo-lunghissimo termine, per soddisfare i bisogni energetici globali quando i combustibili fossili saranno esauriti.

[13.3] **Le tecnologie di produzione dell'idrogeno**

L'idrogeno viene usato per scopi industriali da più di un centinaio di anni. Due terzi dell'idrogeno prodotto è utilizzato

nell'industria dei prodotti chimici, soprattutto per la produzione di ammoniaca e metanolo, in raffinerie, per trattamenti di raffinazione e idrogenazione, e nei campi alimentare, elettronico e metallurgico. L'idrogeno può essere prodotto in vari modi:

- *reforming* degli idrocarburi,
- ossidazione parziale degli idrocarburi,
- decomposizione degli idrocarburi,
- gassificazione del carbone,
- processi biochimici,
- processi termochimici,
- processi fotochimici,
- elettrolisi.

Allo stato attuale tuttavia le modalità per la produzione di idrogeno sono principalmente due:

- la conversione di combustibili fossili tramite processo termochimico, che permette l'estrazione dell'idrogeno contenuto negli idrocarburi;
- la scissione dell'acqua in idrogeno e ossigeno, attraverso processi di elettrolisi o di termolisi.

Entrambi i processi richiedono un apporto di energia: il primo di energia termica, generalmente fornita dalla combustione di una frazione degli idrocarburi da convertire, il secondo, di un apporto di energia elettrica, nel caso di elettrolisi, o termica, nel caso di termolisi.

La produzione dell'idrogeno dai combustibili fossili ha tuttavia l'inconveniente di dar luogo alla emissione, come prodotto di scarto, di CO₂, gas notoriamente ad effetto serra, in quantità dipendenti della fonte utilizzata per la produzione di idrogeno. Una delle soluzioni proposte e studiate per ovviare a tale problema consiste nel sequestro e nel confinamento della CO₂ prodotta.

La produzione di idrogeno invece da fonti rinnovabili o da energia nucleare non con-

tribuisce alle emissioni di gas ad effetto serra, sebbene risulti in genere economicamente meno competitiva.

Produzione di idrogeno da combustibili fossili

Steam reforming

Lo steam reforming del gas naturale è il processo più utilizzato per produrre idrogeno. Circa il 48% della produzione mondiale è ottenuta con questa tecnologia.

Nel processo, il gas naturale (ma anche nafta o GPL) è fatto reagire con vapor d'acqua, ad una temperatura di 820-870 °C, in presenza di un catalizzatore (normalmente a base di nichel) per formare un gas di sintesi contenente idrogeno e monossido di carbonio. Il gas di sintesi viene ulteriormente trattato con produzione di altro idrogeno e conversione del CO in CO₂.

La reazione è altamente endotermica ed è quindi favorita da alte temperature e basse pressioni.

Il processo di reforming prevede i seguenti stadi:

- desolforazione del metano;
- reazione catalitica del metano con vapor d'acqua;
- reazione catalitica del CO e del vapore prodotti nel reforming (*reazione di shift*);
- purificazione dell'idrogeno dagli altri gas prodotti.

Il gas naturale a temperatura ambiente è compresso e quindi inviato all'unità di desolforazione.

La maggior parte degli attuali impianti di produzione idrogeno, dopo la rimozione del monossido di carbonio nel reattore di shift, per la purificazione adottano unità PSA (*Pressure-Swing Adsorption*); in passato la rimozione della CO₂ e la metana-

zione venivano condotte in unità separate (processo *wet scrubbing*).

Impianti di steam reforming sono sviluppati da Haldor Topsoe, KTI, Howe-Baker Engineering, Linde e Foster Wheeler.

Le capacità installate sono normalmente elevate, dell'ordine di 50.000-100.000 Nm³/h. Sono attualmente in corso di sviluppo unità molto più piccole, realizzate in modo specifico per l'uso su veicoli o per produrre idrogeno direttamente presso il consumatore.

Il costo dell'idrogeno prodotto in impianti con capacità da 50.000 a 100.000 Nm³/h è compreso tra 5 e 8 \$/GJ; in impianti più piccoli (10.000 Nm³/h) il costo raddoppia.

I processi di gassificazione del carbone

La conversione del carbone in idrocarburi liquidi e gassosi è un processo che è stato commercialmente utilizzato in tutto il mondo. Nella prima metà del secolo il carbone ha costituito la principale fonte di idrogeno con il processo di produzione di *gas da coke*.

Ci sono diversi processi di gassificazione: metodo Lurgi, Winkler e Koppers-Totzek o loro modifiche. Le tecniche sono simili in quanto usano tutte vapore e ossigeno e trasformano il carbone in H₂, CO e CO₂, e portano alla formazione di SO_x e NO_x, che è necessario eliminare.

Sostanzialmente i reattori di gassificazione sono riconducibili a tre tipi:

- a *letto mobile*, che producono a "basse" temperature (425-650 °C) un gas contenente metano, etano e idrocarburi, come nafta, catrame e oli che devono essere eliminati;
- a *flusso trascinato*, che producono gas ad alta temperatura (> 1250 °C) essenzialmente privo di molti dei prodotti indesiderati, e consentono di ottenere

un prodotto composto quasi interamente da idrogeno, monossido di carbonio e biossido di carbonio;

- *a letto fluido*, che producono dei prodotti intermedi nella composizione, rispetto ai due precedenti, e agiscono a temperature intermedie (925-1040 °C).

Il calore necessario per la gassificazione è fornito principalmente dall'ossidazione parziale del carbone. La temperatura, e quindi la composizione del gas prodotto, dipendono dalla quantità dell'agente ossidante e del vapore, nonché dal tipo di reattore utilizzato nell'impianto.

La tecnologia di gassificazione del carbone è matura e attualmente prevede l'impiego di gassificatori a letto mobile o fluido (Texaco, Foster Wheeler). Nonostante la percentuale di idrogeno nel gas ottenuto non sia molto elevata, la gassificazione del carbone con ossigeno e vapore è usata per produrre circa il 18% dell'idrogeno al mondo.

Il costo dell'idrogeno prodotto attraverso questi processi è compreso tra 10 e 12 \$/GJ con impianti di capacità produttiva dell'ordine di 100.000–200.000 Nm³/h di H₂.

La tecnologia della gassificazione è particolarmente interessante, dal momento che ben si integra con impianti a ciclo combinato (impianti IGCC, *Integrated Gasification Combined Cycle*). Il combustibile prodotto, ricco di H₂ e CO, può essere bruciato direttamente in una turbina a gas oppure sottoposto a purificazione per ottenere idrogeno da inviare ad impianti con celle a combustibile.

Le tecnologie di separazione

La produzione di H₂ potrebbe essere considerata "pulita", ovvero virtualmente esente da emissione di CO₂, se al suo processo produttivo venissero associate

misure di confinamento, o come suol dirsi di sequestro, dell'anidride carbonica prodotta in depositi opportuni (si pensa oggi ai depositi di petrolio esausti o agli acquiferi salini profondi).

In prospettiva, la produzione potrà utilizzare l'energia nucleare e le energie rinnovabili, a partire dall'acqua e dalle biomasse, ma i combustibili fossili rappresentano la soluzione oggi più vicina e quella su cui puntare per il medio termine.

Quindi, gli sforzi maggiori in questo campo vanno dedicati alla separazione e al confinamento della CO₂, prodotta insieme all'idrogeno. È necessario a tal fine sviluppare soluzioni economiche e affidabili per il confinamento della CO₂, ottimizzando le attuali tecnologie di separazione (membrane, processi di assorbimento o di assorbimento, processi criogenici) o sviluppando tecnologie innovative, ma soprattutto affrontando le problematiche del trasporto della CO₂, del suo confinamento a lungo termine (giacimenti esauriti di metano o petrolio, oceani, acquiferi) e incrementando i processi di fissazione biologica.

Per quanto riguarda la situazione italiana il combustibile di riferimento è il gas naturale, anche se vanno considerati altri combustibili, come i residui petroliferi pesanti e i processi di gassificazione degli stessi. In particolare, per il gas naturale occorrerà seguire con attenzione anche lo sviluppo di processi alternativi allo steam reforming e alla ossidazione parziale, come quelli di pirolisi, che portano alla separazione diretta del carbonio senza produzione di CO₂.

Questo "uso pulito" dei combustibili fossili costituisce l'alternativa principale ai sistemi energetici tradizionali almeno per i prossimi decenni: una sorta di "ponte tecnologico" che consenta una transizio-

ne graduale verso la maturazione dei processi di produzione di idrogeno da fonti rinnovabili, nell'ottica di uno sviluppo meglio sostenibile in termini globali e molto più rispettoso dell'ambiente su scala locale.

Produzione di idrogeno da fonti rinnovabili

L'idrogeno è in assoluto il combustibile più pulito quando è prodotto da fonti rinnovabili attraverso:

- elettrolisi, vale a dire scissione dell'acqua in idrogeno e ossigeno grazie all'elettricità da fotovoltaico, eolico, ecc., oppure termolisi, ovvero scissione diretta dell'acqua in idrogeno e ossigeno ad alte temperature, raggiunte ad es. mediante solare termodinamico;
- processi termochimici (attraverso energia solare);
- processi bio/termochimici (estrazione di idrogeno dalle biomasse).

Elettrolisi

La produzione di idrogeno per elettrolisi dell'acqua è un processo abbastanza consolidato, che consente di ottenere idrogeno praticamente puro, ad un costo che può diventare economicamente accettabile nel medio termine, solo se l'energia elettrica necessaria viene generata ad un costo estremamente basso (da impianti idroelettrici, da nucleare, da fonti rinnovabili).

La scissione elettrolitica dell'acqua avviene secondo la seguente reazione:



Fornendo energia elettrica tramite corrente continua fra due elettrodi immersi in una opportuna soluzione acquosa, si ottiene la decomposizione dell'acqua nei suoi costituenti, cioè idrogeno e ossige-

no. Se l'energia elettrica che alimenta le celle elettrolitiche provenisse da fonti rinnovabili questo processo produttivo sarebbe completamente pulito.

È possibile accoppiare la scissione elettrolitica a centrali fotovoltaiche, eoliche e idroelettriche, permettendo così la conversione di fonti rinnovabili in idrogeno. Tale applicazione risulta interessante al fine di accumulare in idrogeno energie rinnovabili come quella solare, eolica o idroelettrica quando se ne ha una bassa richiesta sulla rete elettrica.

Si osservi che l'utilizzo di fonti rinnovabili comporta un aumento del costo dell'energia elettrica prodotta e di conseguenza un aumento del costo dell'idrogeno prodotto attraverso elettrolisi.

Si stima che l'idrogeno prodotto da elettrolisi costi indicativamente 25-35 €/GJ, a seconda del costo dell'energia elettrica, compreso fra 0,03 e 0,05 €/kWh.

Questo processo, per il quale l'elettricità ha attualmente un costo fino a tre o quattro volte superiore a quello del metano impiegato per lo steam reforming, può diventare economicamente accettabile in prospettiva, in seguito ad innovazioni tecnologiche e in condizioni di costo estremamente basso dell'energia elettrica, se prodotta da fonti rinnovabili (solare, geotermica, eolica, ecc..) o nucleare.

L'elettrolisi dell'acqua, che utilizza 4-5 kWh di energia elettrica per ogni metro cubo di idrogeno prodotto, è un metodo oggi utilizzato in alcuni grandi impianti sorti in vicinanza di centrali idroelettriche, che producono elettricità a basso costo e in modo continuativo utilizzando le ore di basso consumo (per esempio notturne), ottimizzando così il rendimento.

Nel caso di un impianto eolico, generalmente il più economico fra i sistemi ad energia rinnovabile, il costo dell'idrogeno

prodotto è compreso fra 25 e 50 €/GJ, in stretta relazione al costo del kWh prodotto di energia elettrica.

La scissione dell'acqua ad alta temperatura (termolisi) può essere effettuata in linea di principio utilizzando fonti di calore diverse (solare, nucleare) e diversi processi (ad es. reazioni chimiche invertibili), ma la sua fattibilità industriale è ancora da dimostrare.

Processi termochimici

Esiste una categoria di processi chimici che consente di ottenere idrogeno per dissociazione della molecola dell'acqua. Si tratta di una serie di reazioni chimiche "a ciclo chiuso" nelle quali, cioè, alla fine del ciclo si ottengono gli stessi elementi di partenza nelle stesse quantità (ad eccezione dell'acqua).

L'uso della catena di reazioni consente di ottenere la decomposizione della molecola di acqua a temperature molto inferiori a quelle di naturale dissociazione, scendendo a valori compresi nell'intervallo 500-800 °C.

A partire dai primi studi, intorno alla metà degli anni sessanta, fino ad oggi, sono stati analizzati oltre 100 processi termochimici ed è quindi impossibile una trattazione completa. I più promettenti appaiono, oltre al processo Zolfo-Iodio, l'UT3 e lo ZnO-Zn.

In generale occorre osservare che questi metodi di produzione di idrogeno sono adatti all'utilizzo in quei casi dove sia disponibile una sorgente di calore ad alta temperatura e dove non risulti conveniente il ricorrere alla gassificazione od al *reforming* del combustibile.

Un'applicazione interessante potrebbe essere la generazione di idrogeno a partire dall'energia solare con sistemi a concentrazione, dove le temperature neces-

sarie al processo si possono raggiungere a partire da una sorgente rinnovabile.

Tuttavia, l'uso di questo metodo di produzione di idrogeno è ancora da considerarsi in fase di sviluppo.

Processi biochimici

I processi biochimici possono produrre idrogeno, più o meno direttamente, a partire da biomasse o acqua. Solitamente tali processi sono condotti a temperature modeste in reattori che operano in condizioni anaerobiche o microaerofile.

Le biomasse vanno opportunamente condizionate per il tipo di processo e il bioderivato è di norma un combustibile liquido o gassoso che dovrà poi essere ulteriormente processato per produrre idrogeno.

Diversi sono i processi biologici in studio per il recupero energetico di biomasse, dei quali certamente la digestione anaerobica risulta quello più conosciuto e diffuso.

Questo processo è costituito da una serie di reazioni biochimiche operate da un folto e eterogeneo gruppo di microorganismi, in assenza di aria. Tali reazioni promuovono la demolizione della sostanza organica in sostanze gassose semplici, quali principalmente metano e anidride carbonica, e in energia utilizzata dai batteri per vivere e moltiplicarsi.

Dal punto di vista tecnico l'impianto è costituito da un reattore, generalmente riscaldato (35-55 °C), dove avvengono le reazioni biochimiche e dal quale viene prelevato il biogas. La percentuale di metano nel biogas varia a secondo del tipo di sostanza organica digerita e delle condizioni di processo, da un minimo del 50% fino all'80% in volume.

La fermentazione anaerobica consente il recupero energetico di biomassa ad ele-

vato contenuto di acqua (80-95% in peso) a seconda della tipologia di residui organici, per la quale sono difficilmente applicabili altre tecnologie di recupero energetico e anzi richiede processi di smaltimento costosi sia in termini economici che energetici. La tipologia di biomassa utilizzabile può variare dalla frazione organica di rifiuti solidi urbani, a deiezioni zootecniche o residui ortofrutticoli o dell'industria agroalimentare.

La produzione di idrogeno può avvenire tramite la conversione del metano contenuto nel biogas, attraverso un tradizionale processo di steam-reforming, ma sono anche in fase di studio processi di fermentazione per la conversione diretta di biomassa in gas ricco in idrogeno, invece che in metano, grazie all'utilizzo di opportuni batteri e di adeguate condizioni di processo. Tali innovativi sistemi potrebbero risultare economicamente competitivi con la tecnologia della gassificazione, consentendo così una differenziazione delle tipologie di biomasse recuperabili, più secche tramite gassificazione e più umide tramite fermentazione, ampliando quindi la potenzialità delle biomasse come fonte di energia rinnovabile, anche per la produzione di idrogeno.

[13.4]

Le tecnologie per l'accumulo e il trasporto dell'idrogeno

Tecnologie di accumulo

Da vari decenni l'idrogeno viene stoccato con sicurezza in grandi contenitori industriali; può essere immagazzinato in caverne sotterranee o in recipienti ad alta pressione.

Le differenti tecnologie di accumulo dell'idrogeno, che può essere conservato in

forma gassosa, liquida oppure assorbito su materiali speciali, devono tutte rispondere a requisiti di efficienza, praticità e economicità; la scelta tra l'una o l'altra opzione sarà determinata, a seconda dell'applicazione considerata, da specifiche analisi tecnico-economiche. Ad esempio, una grande difficoltà nelle applicazioni per autoveicoli sta nel garantire una sufficiente capacità del serbatoio di stoccaggio, così da ottenere un buon equilibrio tra autonomia di guida e ingombro a bordo. Di seguito vengono descritte brevemente le tecnologie più promettenti:

- idrogeno compresso,
- idrogeno liquido,
- idruri metallici,
- nanostrutture di carbonio.

Idrogeno compresso

Il modo più semplice e economico per accumulare idrogeno a bordo di un veicolo è quello di utilizzarlo sotto forma di gas compresso a pressione di 200-250 bar.

La tecnologia risulta tuttavia non proponibile per uso a bordo di auto tradizionali, a causa del peso e ingombro dei serbatoi attualmente utilizzati, che rappresentano un limite all'autonomia e capacità di carico del veicolo.

Di recente notevoli progressi sono stati fatti con l'introduzione di serbatoi con liner metallico o termoplastico rinforzati con fibre di carbonio, di vetro e aramidiche, che presentano un peso 3-4 volte inferiore a quello dei comuni serbatoi, e che consentono quindi di superare in parte le restrizioni connesse all'uso delle bombole di tipo tradizionale. Questi serbatoi sono in grado di operare a pressioni più elevate (fino a 700 bar) e consentono quindi di ottenere densità di accumulo di idrogeno adeguate all'uso a bordo di veicoli.

Idrogeno liquido

L'idrogeno può essere stoccato a bordo del veicolo in forma liquida ad una temperatura di -253 °C . Per mantenere queste temperature sono stati messi a punto serbatoi a doppia parete, con una intercapedine ove viene fatto il vuoto (serbatoi tipo *dewar*). Questa tecnologia è ormai consolidata in Germania, dove la BMW la utilizza da oltre 15 anni su auto ad idrogeno funzionanti con motori a combustione interna. L'accumulo in forma liquida è forse la tecnologia che meglio soddisfa le esigenze dell'autotrazione, pur presentando dei limiti.

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

Nel quadro delle attività del Progetto H2MUC è stata realizzata, presso l'aeroporto di Monaco di Baviera, la prima stazione di servizio pubblica in grado di fornire idrogeno liquido.

Idruri metallici

L'idrogeno può legarsi chimicamente con diversi metalli e leghe metalliche, formando idruri. Questi composti sono in grado di intrappolare idrogeno, a pressioni relativamente basse.

L'idrogeno penetra all'interno del reticolo cristallino del metallo, andando ad occupare i siti interstiziali. Si raggiungono, a basse pressioni, densità energetiche maggiori di quelle dell'idrogeno compresso e paragonabili (secondo alcune referenze, anche maggiori) a quelle del-

l'idrogeno liquido. Il volume di stoccaggio si riduce di 3-4 volte, rendendo possibile l'uso di questi sistemi nelle autovetture, mentre l'energia specifica dipende anche dal peso specifico del metallo di base.

Le percentuali, in peso, di idrogeno sul peso totale che si raggiungono vanno dall'1% al 12,7% (LiH), per confronto ricordiamo che per le comuni bombole tale percentuale è di poco superiore all'1%, e quindi tali sistemi di stoccaggio sono potenzialmente molto promettenti.

Un punto debole della tecnologia è rappresentato dal peso di questi sistemi di accumulo: a parità di peso il veicolo presenta una autonomia tre volte inferiore a quella ottenibile con idrogeno liquido o idrogeno compresso con serbatoi di tipo avanzato. Sono invece indubbi i vantaggi in termini di convenienza, compattezza, stabilità dello stoccaggio, sicurezza intrinseca.

Le nanostrutture di carbonio

Una tecnologia molto recente e ancora sperimentale riguarda l'utilizzo di nanostrutture di carbonio (nanotubi e nanofibre di carbonio) scoperte all'inizio degli anni novanta, che stanno dimostrando ottime capacità di assorbimento dell'idrogeno, con risultati in alcuni casi sorprendenti e inspiegabili.

Su questa nuova tecnologia sono in corso ricerche da parte di numerosi gruppi di lavoro, ma i risultati sono il più delle volte non confrontabili in quanto riferiti a campioni di materiali di diverso tipo, provati in condizioni di pressione e temperature molto diverse. Il campo di variazione della pressione va da pochi bar ad alcune centinaia di bar, la temperatura da 80 °K a 800 °K , le percentuali di assorbimento in peso variano da valori inferiori all'1% ad un incredibile 60%.

Il trasporto dell'idrogeno

L'idrogeno può essere trasportato in forma gassosa, liquida oppure assorbito su materiali speciali e trasportato per mezzo di autocisterne o con idrogenodotti. Aspettative confortanti vengono dall'esperienza storica: gasdotti/idrogenodotti di grandi dimensioni sono state utilizzate nella Ruhr tedesca per il trasporto dai produttori ai consumatori sin dal 1938 senza particolari problemi di sicurezza; anche in Italia, d'altra parte, per più di 70 anni si è distribuito senza particolari problemi il "gas d'acqua", costituito da miscele di idrogeno (50%) e CO (50%).

L'idrogeno per poter essere utilizzato necessita di particolari infrastrutture che ne consentano la distribuzione e il trasporto.

Per la distribuzione sono possibili diverse soluzioni:

- idrogenodotti;
- trasporto via terra con autocisterne, carri bombolai (*trailer*);
- trasporto via mare con navi cisterne.

La scelta dell'una o dell'altra modalità è determinata da fattori quali la quantità da

trasportare, la distanza cui trasportarlo e l'utilizzo finale.

Il trasporto di idrogeno gassoso

L'idrogeno compresso è distribuito, dalle aziende produttrici ai consumatori, in serbatoi mobili usando autotreni o treni.

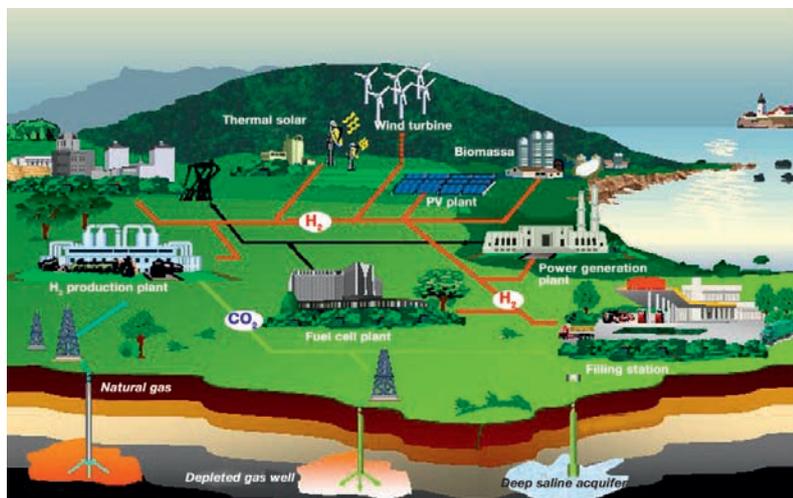
Attualmente l'opzione più rapida e conveniente per il trasporto di ingenti quantità di idrogeno è quella di adattare parte delle infrastrutture usate per il gas naturale, per ospitare l'idrogeno. Occorre in questo caso tenere conto di taluni aspetti, ad esempio: il contatto dell'idrogeno con acciai speciali provoca un loro deterioramento; sono necessari sistemi visivi e olfattivi per l'individuazione di eventuali fughe.

Inoltre sono da considerare necessarie le ovvie precauzioni per evitare inneschi di combustione (materiali e sistemi a sicurezza intrinseca) dati i caratteri chimico-fisici di facile innesco a combustione di questo gas. La modifica di condutture che trasportano gas naturale per trasportare una miscela di gas naturale e di idrogeno (fino al 20% circa idrogeno) può comportare interventi modesti alla condotta stessa; modificare le attuali condutture di gas naturale per distribuire idrogeno puro può richiedere modifiche più sostanziali. Attuali ricerche e analisi stanno sperimentando entrambe le strategie.

Il trasporto di idrogeno liquido

Il trasporto in forma liquida presenta problematiche più complesse e sembra, in prospettiva, conveniente solo per grandi quantità e percorrenze elevate.

La distribuzione dell'idrogeno presso gli utenti, nel caso di una ampia diffusione del suo impiego (ad es. nel settore del trasporto), pone in prospettiva il problema di una rete adeguata e degli enormi investi-



menti necessari per la sua realizzazione. I procedimenti tradizionali di trasporto via terra con autocisterne possono essere migliorati divenendo più resistenti, leggeri e economici.

Recentemente si è anche ipotizzato il trasporto aereo dell'idrogeno per coprire lunghe distanze in tempi brevi e ridurre così le perdite per evaporazione.

Distribuzione e sicurezza

In Europa è già presente, seppure in dimensioni limitate, una rete per la distribuzione dell'idrogeno associata all'industria petrolchimica. Tuttavia, per generalizzare tale distribuzione occorreranno notevoli investimenti in infrastrutture. Nel settore dei trasporti, per esempio, serviranno anche speciali strutture per il rifornimento. Così come per ogni altro combustibile, la sicurezza è un aspetto della massima importanza. Bisognerà definire codici, standard per le attrezzature, linee guida operative e regolamenti accettati da tutti, garantire alti livelli di formazione al personale addetto alla manutenzione e predisporre esaurienti campagne informative e educative per i cittadini.

Stazioni di rifornimento

Per la realizzazione delle stazioni di rifornimento sono possibili diverse opzioni, in relazione alle tecnologie già industrialmente disponibili:

- produzione locale per via elettrolitica e stoccaggio in diverse forme (idruri, idrogeno gassoso);
- stoccaggio locale in forma gassosa e rifornimento tramite camion (come per i combustibili tradizionali);
- stoccaggio locale in forma liquida e rifornimento tramite camion (come per i combustibili tradizionali);
- produzione locale a partire da gas

metano e stoccaggio in diverse forme (idruri, idrogeno gassoso);

- alimentazione tramite tubazioni e stazioni di compressione locale (come per il gas naturale per trazione).

[13.5]

Le applicazioni

Oltre al suo attuale impiego come materiale per processi chimici, l'idrogeno può in prospettiva essere utilizzato come combustibile per la generazione di energia elettrica in cogenerazione (cicli termici, celle a combustibile) e per il trasporto (motori a combustione interna, celle a combustibile), con notevoli benefici sia in termini di efficienza che di riduzione dell'impatto ambientale.

Anche in questo caso, le tecnologie necessarie, pur oggetto finora di notevoli sforzi di ricerca e sviluppo, richiedono ancora un impegno notevole per giungere alla disponibilità di prodotti competitivi. Le celle a combustibile sono in una fase precoce di commercializzazione e garantiscono un uso più efficace dell'idrogeno. I motori a combustione interna installati a bordo dei veicoli, alimentati con idrogeno, possono costituire un modo adatto per introdurre questo tipo di energia, in attesa che altre tecnologie siano messe a punto, come i gruppi motopropulsori elettrici a celle a combustibile.

Motori a combustione interna

I motori a combustione interna ad idrogeno (o a miscele gas naturale-idrogeno) sono ormai disponibili con rendimenti sensibilmente più elevati e emissioni ridotte rispetto a quelli utilizzando combustibili convenzionali. Le diverse caratteristiche di combustione dell'idrogeno (velo-

cià, temperatura) pongono in questo caso, come in quello delle turbine, problemi di alimentazione e di materiali che vanno ulteriormente studiati. Si ritiene che il rendimento di un motore a idrogeno possa risultare superiore al rendimento di un motore a benzina di un fattore compreso tra 1,5 e 2. Le attuali applicazioni per l'utilizzo dell'idrogeno in motori a combustione interna sono state fatte su dei motori standard opportunamente adattati con risultati nettamente inferiori. Esistono anche prototipi di motori alternativi a combustione interna che fanno uso di idrogeno combinato a combustibili tradizionali (benzina, GPL e metano). Solitamente, in tali motori, l'idrogeno è il combustibile secondario ed è presente in percentuali comprese tra il 10% e il 35%.

Celle a combustibile

L'idrogeno è il combustibile ideale per le celle e quello che può consentire a questa tecnologia di esprimere tutte le sue potenzialità in termini energetici e ambientali. Problemi da affrontare e risolvere, sia a livello di cella che di sistema, restano sia per le applicazioni alla trazione (con celle a membrana polimerica) che per quelle stazionarie (soprattutto celle ad alta temperatura).

Centrali termoelettriche a idrogeno

Analisi e valutazioni industriali indicano la fattibilità tecnica della realizzazione di centrali termoelettriche alimentate ad idrogeno, utilizzando tecnologie esistenti e già commercialmente mature (dall'impiantistica di produzione dell'idrogeno con reforming catalitico o con ossidazione parziale di idrocarburi, al ciclo combinato turbina a gas/turbina a vapore per la generazione di elettricità), fino a taglie di diverse centinaia di MW.

[13.6]

Celle a combustibile

Caratteristiche

Le celle a combustibile sono sistemi elettrochimici capaci di convertire l'energia chimica di un combustibile (in genere idrogeno) direttamente in energia elettrica, senza l'intervento intermedio di un ciclo termico, ottenendo pertanto rendimenti di conversione più elevati rispetto a quelli delle macchine termiche convenzionali.

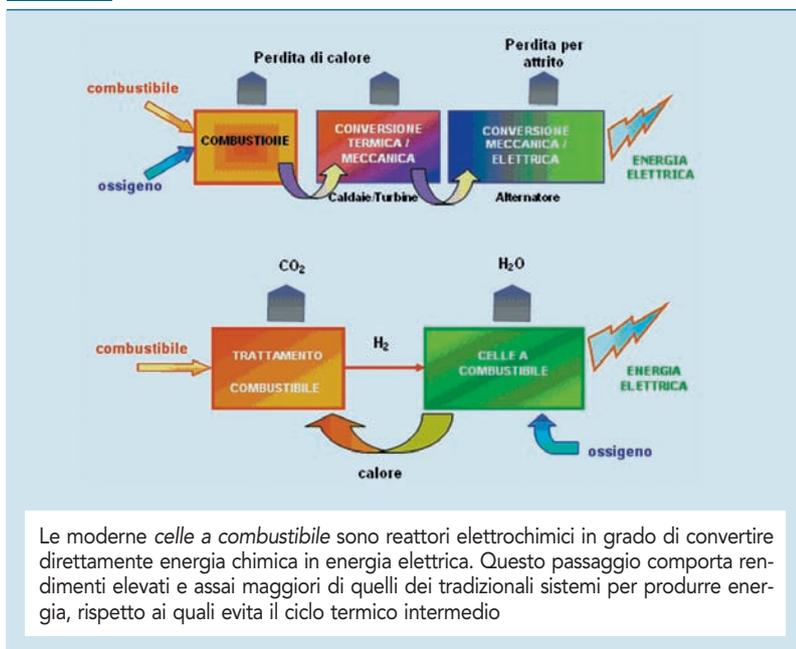
Una cella a combustibile funziona in modo analogo ad una batteria, in quanto produce energia elettrica attraverso un processo elettrochimico; tuttavia, a differenza di quest'ultima, consuma sostanze provenienti dall'esterno ed è quindi in grado di funzionare senza interruzioni, finché al sistema viene fornito combustibile (idrogeno) e ossidante (ossigeno o aria). La cella è composta da:

- due *elettrodi* (un anodo e un catodo) in materiale poroso che fungono da siti catalitici per le reazioni di cella; le reazioni consumano fondamentalmente idrogeno e ossigeno, con produzione di acqua e passaggio di corrente elettrica nel circuito esterno;
- un *elettrolita*, che ha la funzione di condurre gli ioni prodotti da una reazione e consumati dall'altra, chiudendo il circuito elettrico all'interno della cella. La trasformazione elettrochimica è accompagnata da produzione di calore, che è necessario estrarre per mantenere costante la temperatura di funzionamento della cella).

Una singola cella produce normalmente una tensione di circa 0,7 V e correnti comprese tra 300 e 800 mA/cm², quindi per ottenere la potenza e il voltaggio desiderato più celle sono disposte in serie, a

Fig. 13.1

Energia e celle a combustibile

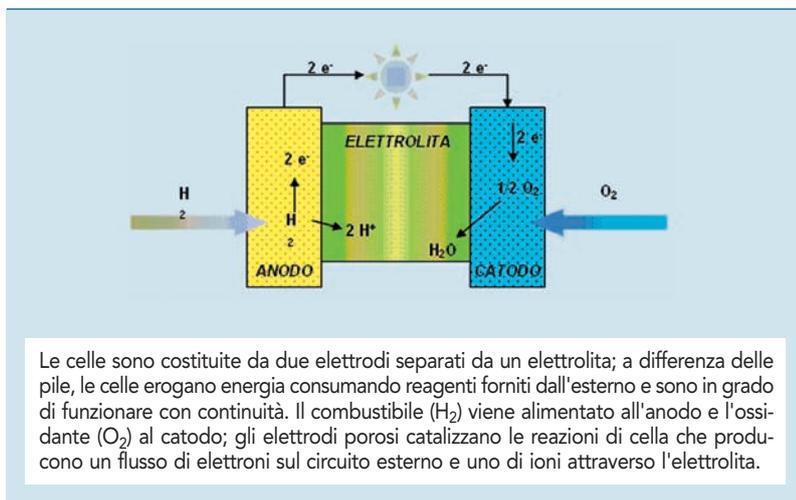


mezzo di piatti bipolari, a formare il cosiddetto "stack".

Gli stack a loro volta sono assemblati in moduli, per ottenere generatori della potenza richiesta.

Fig. 13.2

Elettrochimica delle celle a combustibile



Classificazione delle celle a combustibile

Esistono diverse tecnologie di cella, con diverse caratteristiche e diverso grado di sviluppo. Normalmente le celle vengono classificate sulla base dell'elettrolita utilizzato (celle alcaline, ad elettrolita polimerico, ad acido fosforico, a carbonati fusi, ad ossidi solidi) o alla temperatura di funzionamento (celle a bassa e alta temperatura).

L'elettrolita determina o condiziona fortemente:

- il campo di temperatura operativo;
- il tipo di ioni e la direzione in cui diffondono attraverso la cella;
- la natura dei materiali costruttivi;
- la composizione dei gas reagenti;
- le modalità di smaltimento dei prodotti di reazione;
- le caratteristiche di resistenza meccanica e di utilizzo;
- la vita della cella.

Tipi di celle a combustibile

■ *Celle alcaline* o AFC (*Alkaline Fuel Cell*), che usano un elettrolita costituito da idrossido di potassio e operano a temperature intorno a 120 °C. Hanno raggiunto un buon grado di maturità tecnologica soprattutto per usi speciali (applicazioni militari e spaziali). Le loro caratteristiche (richiedono gas di alimentazione estremamente puri) ne hanno limitato fortemente la diffusione, tanto che oggi non vi sono programmi di sviluppo in corso.

■ *Celle ad elettrolita polimerico* o PEFC (*Polymer Electrolyte Fuel Cell*), che usano come elettrolita una membrana polimerica ad elevata conducibilità protonica e funzionano a temperature comprese tra 70 e 100 °C; sono sviluppate soprattutto per la trazione e la generazione/cogenerazione di piccola taglia (1-250 kW).

- *Celle ad acido fosforico* o *PAFC* (*Phosphoric Acid Fuel Cell*), che operano a temperature prossime ai 200 °C con un elettrolita costituito da una soluzione concentrata di acido fosforico; rappresentano la tecnologia più matura per gli usi stazionari, con commercializzazione già avviata per le applicazioni di cogenerazione nei settori residenziale e terziario (100-200 kW).
- *Celle a carbonati fusi* o *MCFC* (*Molten Carbonate Fuel Cell*), che usano come elettrolita una soluzione di carbonati alcalini fusa alla temperatura di funzionamento della cella (650 °C) e contenuta in una matrice ceramica porosa; sono promettenti soprattutto per la generazione di energia elettrica e la cogenerazione, da qualche centinaio di kW ad alcune decine di MW.
- *Celle ad ossidi solidi* o *SOFC* (*Solid Oxide Fuel Cell*), che funzionano a temperatura elevata (circa 900-1000 °C) per assicurare una conducibilità sufficiente all'elettrolita, costituito da materiale ceramico (ossido di zirconio drogato con ossido di ittrio); come le celle a carbonati, sono promettenti soprattutto per la generazione di energia elettrica e la cogenerazione, da qualche kW ad alcune decine di MW.
- *Celle a metanolo diretto* o *DMFC* (*Direct Methanol Fuel Cell*), che operano a temperature tra 70 e 120 °C e come le PEFC utilizzano come elettrolita una membrana polimerica. Sono ancora nello stadio di ricerca di laboratorio.

Gli Impianti

Gli impianti con celle a combustibile sono costituiti da 3 sezioni principali:

- una *sezione di trattamento del combustibile* (gas naturale, metanolo, gas di sintesi prodotti dalla gassificazione del carbone, biogas), che converte lo stes-

so in un gas di sintesi contenente idrogeno, purificato secondo le necessità imposte dal tipo di cella.

- una *sezione elettrochimica*, costituita dalle celle che producono energia elettrica per via elettrochimica attraverso una reazione tra l'idrogeno alimentato all'anodo e l'ossigeno alimentato al catodo; la trasformazione elettrochimica è accompagnata da produzione di calore.
- un *sistema di condizionamento della potenza elettrica*, che trasforma l'energia, prodotta sotto forma di corrente elettrica continua, in corrente alternata di opportune caratteristiche.

Completano l'impianto un sistema di regolazione e di recupero del calore, che può essere utilizzato sia all'interno dell'impianto (ad es. per il reattore di conversione del combustibile), che per utenze esterne di cogenerazione, e un sistema di controllo che assicura il coordinamento delle diverse sezioni dell'impianto.

Produzione di energia elettrica

Le celle a combustibile rivestono un notevole interesse al fine della produzione di energia elettrica, in quanto presentano caratteristiche energetiche e ambientali tali da renderne potenzialmente vantaggiosa l'adozione.

Gli impianti sono caratterizzati da:

- *rendimento elettrico elevato*, con valori che vanno dal 40-48% (riferito al potere calorico inferiore del combustibile) per gli impianti con celle a bassa temperatura, fino a raggiungere oltre il 60% per quelli con celle ad alta temperatura utilizzate in cicli combinati;
- *possibilità di utilizzo di un'ampia gamma di combustibili* come metano, metanolo, gas naturale, gas di sintesi (prodotto da combustibili liquidi, gassificazione del carbone, biomasse);

- *modularità*, che permette di accrescere la potenza installata via via che cresce la domanda di energia elettrica, con notevoli risparmi sul piano economico e con tempi di costruzione che possono risultare notevolmente ridotti;
- *efficienza indipendente dal carico e dalle dimensioni dell'impianto* in quanto il rendimento delle celle è poco sensibile alle variazioni del carico elettrico, diversamente da quanto avviene con gli impianti convenzionali; in pratica una cella può operare tra il 30 e il 100% di carico, senza perdite consistenti di efficienza; il rendimento è inoltre indipendente dalla potenza installata entro un ampio intervallo di potenza, mentre negli impianti tradizionali il rendimento diminuisce al decrescere della taglia dell'impianto;
- *ridottissimo impatto ambientale*, sia dal punto di vista delle emissioni gassose che di quelle acustiche; questo che consente di collocare gli impianti anche in aree residenziali, rendendo il sistema particolarmente adatto alla produzione di energia elettrica distribuita;
- *possibilità di cogenerazione*, con calore reso disponibile a diversa temperatura, in forma di vapore o acqua calda, e impiegato per usi sanitari, condizionamento di ambienti, ecc.

Aree di applicazione

Le celle a combustibile presentano proprietà tali da renderne molto interessante l'impiego nel campo della produzione di energia elettrica, in quanto rispondono perfettamente agli obiettivi che si perseguono nel settore elettrico, e cioè:

- miglioramento dell'efficienza di conversione delle fonti primarie;
- flessibilità nell'uso dei combustibili;
- riduzione delle emissioni di inquinanti nell'atmosfera.

Le principali aree di applicazione sono:

- applicazioni stazionarie;
- trasporto.

Applicazioni stazionarie

La diffusione dei sistemi con celle a combustibile richiede il superamento delle barriere che ancora limitano lo sviluppo delle varie tecnologie, e che vengano messi a punto prodotti in grado di competere, per affidabilità, durata e costi con gli altri sistemi di generazione di potenza disponibili sul mercato, come turbine a gas e a vapore (semplici o a ciclo combinato). Questi a loro volta negli ultimi anni hanno fatto registrare notevoli miglioramenti dal punto di vista dell'efficienza, ma non hanno tuttavia ancora dimostrato quel livello di accettabilità ambientale che è proprio delle celle a combustibile.

Le celle a combustibile risultano particolarmente adatte alla generazione di potenza distribuita.

Un impianto a celle a combustibile presenta una efficienza energetica sensibilmente superiore a quella dei sistemi convenzionali, anche nelle loro configurazioni più avanzate. Da ciò deriva una significativa riduzione della quantità di CO₂ emessa, a parità di energia elettrica e calore prodotti.

Prendendo come esempio un impianto da 200 kW (emissioni CO₂ pari a circa 190 kg/MWh), si stima che l'utilizzo delle celle a combustibile, per le quali si assume un rendimento del 40%, porta, rispetto ad un motore a gas della stessa taglia (rendimento 30%), ad un risparmio in termini di emissioni di CO₂ di circa 1.000 t/anno, considerando un utilizzo medio di 7.000 ore/anno. Le ridotte emissioni di inquinanti atmosferici locali sono abbinate ad un livello di rumorosità estremamente basso (inferiore ai 60 dBA a 10 metri), non essendo presenti grossi organi in movimento.

Il settore dei trasporti

Pur se negli ultimi anni la tecnologia dei veicoli è notevolmente migliorata con diminuzione dei consumi e aumento di prestazioni, comfort e sicurezza, ciò non ha portato ad una riduzione globale del contributo del settore alle emissioni e ai consumi di energia.

I livelli di inquinamento atmosferico stanno assumendo, soprattutto nei grandi centri urbani, dimensioni preoccupanti. Le emissioni di CO₂ dal settore trasporti nel 2000 già ammontavano a 137,5 Mt e il trasporto su strada vi contribuiva per oltre il 93% e, nonostante i provvedimenti adottati in sede governativa o locale, le emissioni dovute alla mobilità di persone su strada rimane una delle principali sorgenti di inquinamento dell'aria nei centri urbani. Nel 2000 il consumo finale di energia dovuto al traffico urbano era risultato pari a circa il 40% del consumo finale di energia del settore trasporto.

Nell'ottica di una mobilità sostenibile, occorre quindi adottare specifiche strategie di intervento, che consentano di:

- ridurre le emissioni di CO₂, anche attraverso una riduzione dei consumi energetici del settore, per ridurre il rischio di cambiamenti climatici;
- contenere, nelle aree urbane, i livelli di concentrazione di inquinanti atmosferici, con particolare riferimento a componenti, attualmente oggetto di maggiore attenzione come benzene o polveri fini;
- ridurre i livelli di inquinamento acustico.

Si stima, tuttavia, che l'evoluzione tecnologica in atto sarebbe ancora insufficiente e che per portare le emissioni di gas serra ai limiti post-Kyoto occorrerebbe avviare una serie di iniziative diversificate, indirizzate non solo a migliorare l'efficienza del parco veicolare esistente, ma a sostenere lo sviluppo di sistemi di trazio-

ne innovativi e l'uso di carburanti alternativi. Azioni queste da svolgere in un approccio sistemico di interventi, che abbracciano la gestione e controllo del traffico e la manutenzione degli autoveicoli circolanti. L'industria automobilista sembra oggi in grado di proporre mezzi dai consumi bassissimi e con un minor impatto ambientale rispetto al passato, ma questa offerta non è ancora in grado di rispondere alla richiesta di "veicoli a zero emissioni" per un mercato sempre più vincolato ai problemi legati all'inquinamento. A livello internazionale si guarda alla propulsione elettrica come una soluzione ideale.

Quindi, l'impiego di sistemi di propulsione veicolare con celle a combustibile rappresenta una delle alternative più promettenti per il medio-lungo termine: la loro potenzialità in termini di bassi consumi e emissioni nulle, o quasi, ne promuove la candidatura come elemento fondamentale della propulsione veicolare per il trasporto del prossimo futuro.

Le celle a combustibile possono consentire di realizzare veicoli che uniscono ai vantaggi di silenziosità e assenza di inquinamento tipici dei veicoli elettrici a batteria, caratteristiche d'uso simili a quelle dei veicoli convenzionali in termini di autonomia e tempi di rifornimento.

Grazie all'elevata efficienza della cella, i rendimenti previsti per veicoli con celle a combustibile sono sensibilmente superiori a quelli dei motori a combustione interna. Si raggiungono, a seconda del combustibile utilizzato, valori compresi tra il 27% e il 41%, contro rendimenti medi del 16-18% e del 20-24% misurati rispettivamente per i veicoli a benzina e diesel, nel ciclo urbano.

Qualora alimentate ad idrogeno e aria, le celle a combustibile presentano efficienze ineguagliabili da altri sistemi di gene-

razione, per di più costanti con il variare del carico, e una dinamica rapidissima, paragonabile a quella di un accumulatore tradizionale. Tali efficienze si riducono parzialmente se si considera l'intero ciclo del combustibile, dalla fase di produzione alla sua distribuzione. Da notare che efficienze maggiori si traducono, a parità di energia prodotta, in una riduzione della quantità di anidride carbonica emessa, anche con idrogeno prodotto a partire da combustibili fossili.

Le emissioni di sostanze inquinanti nel punto di utilizzo di un veicolo con celle a combustibile sono praticamente nulle con idrogeno e si mantengono estremamente basse con altri combustibili riformati a bordo (fino al 90% in meno rispetto ai motori termici).

I veicoli alimentati con celle a combustibile presentano inoltre una bassa rumorosità, poiché la sola sorgente di rumore è quella costituita dall'unità di compressione dell'aria utilizzata per l'alimentazione dello stack.

Per generare energia, l'unità costituita dalle celle a combustibile deve essere integrata in un sistema completo che comprende una sezione di trattamento del combustibile, la sezione di compressione dell'aria, un sistema di condizionamento della potenza elettrica, un sistema di recupero del calore sviluppato e infine una sezione di regolazione e controllo. L'energia prodotta dalle celle farà muovere un motore elettrico, il quale darà la propulsione necessaria agli organi di trasmissione del veicolo.

Costi

Il principale ostacolo alla penetrazione nel mercato degli impianti con celle a combustibile è rappresentato dal costo di produzione elevato. Gli attuali volumi di pro-

duzione non sono infatti tali da permettere economie di scala. Per arrivare ad una condizione di concorrenza con le tecnologie tradizionali, sono necessarie riduzioni di costo con fattori che vanno da 3 a 10 volte. L'ipotesi di penetrazione fatta richiede che i costi degli impianti raggiungano valori compresi tra 1.000 e 1.500 €/kW (con valori maggiori per le piccole taglie) nella fase iniziale della introduzione nel mercato, passando poi a regime a valori di 600-750 €/kW.

L'inserimento nel mercato di una tecnologia innovativa come quella delle celle a combustibile richiede poi che si creino gradualmente le condizioni perché la stessa possa competere alla pari con le tecnologie convenzionali, superando le barriere di carattere "ambientale" (conoscenza della tecnologia, normative specifiche, clausole di manutenzione, ecc.) che possono penalizzarla nella fase iniziale della commercializzazione.

È chiaro che ci sarà maggiore spazio per le celle a combustibile se gli utenti troveranno semplice e conveniente l'autoproduzione di energia elettrica e calore con impianti di piccola taglia. Questo comporterebbe semplicità nelle procedure per l'installazione e avviamento degli impianti, nonché facilitazioni dei rapporti con la rete elettrica (cessione di energia alla rete, ecc.).

L'introduzione delle celle a combustibile richiede, oltre allo sviluppo di un contesto favorevole alla generazione/cogenerazione distribuita, che gli utenti prendano confidenza con la tecnologia, superando le preoccupazioni connesse con la novità della stessa in termini di sicurezza (ad es. presenza di idrogeno), modalità e costi di gestione, affidabilità, manutenzione, ecc., e si sentano garantiti circa la continuità e qualità del servizio reso dall'impianto.



Allegati

Un mondo di energia più sostenibile

Sfide globali

I governi consumatori devono affrontare le implicazioni, comprese le nuove vulnerabilità, del ricorso a grossi rifornimenti dai Paesi MENA. Devono inoltre identificare le politiche e le misure rivolte a ridurre il rischio di catastrofi naturali o dinamiche geopolitiche che possano rendere i prezzi più elevati.

L'approfondimento del dialogo politico con i paesi produttori, specialmente nel quadro del dibattito internazionale sull'energia, ha contribuito a richiamare le preoccupazioni a breve termine riguardanti la sicurezza, così come a facilitare i movimenti di fondi a lungo termine che sono stati necessari per sviluppare le risorse energetiche dell'area MENA.

Paesi dell'area M.E.N.A.
Medio Oriente Nord Africa

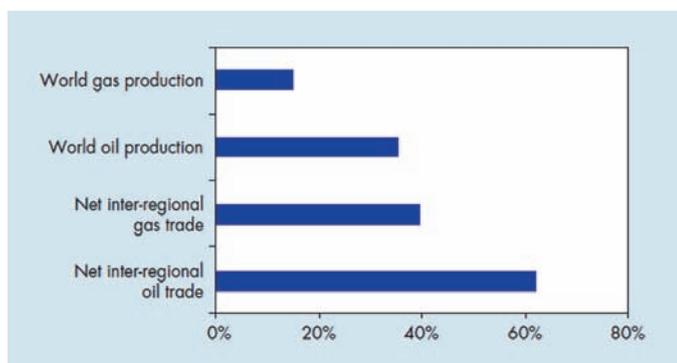


I governi dei paesi consumatori, infine, devono considerare delle politiche a lungo termine che promuovano ulteriori differenziazioni delle loro disponibilità di energia, come mezzi sia di abbassamento della loro vulnerabilità alle catastrofi, che di richiamo dei problemi ambientali, includenti il problema dell'aumento delle emissioni di gas-serra. La riduzione della dipendenza da petrolio e da gas, attraverso una differenziazione dei combustibili e delle loro fonti geografiche e l'uso più efficiente dell'energia, deve essere al centro delle politiche a lungo termine puntate sull'aumento della sicurezza dell'energia.

La vulnerabilità ad uno shock petrolifero di ogni paese consumatore è direttamente collegata alla quantità di gas e di petrolio necessaria al paese stesso. La sfida è resa più urgente dalle sempre minori possibilità a breve termine di poter sostituire il petrolio e il gas provenienti dall'area MENA.

Non è la dipendenza da un determinato tipo del combustibile che conta, ma la scarsità di risorse alternative a quel combustibile e la possibilità di ricorrere ad altri combustibili in caso di crisi. Rispetto a questo, le prospettive per i paesi consumatori stanno peggiorando. I combustibili derivati dal petrolio non possono essere sostituiti nei mezzi di trasporto, e la crescita di domanda in questo settore renderà il petrolio ancor meno sostituibile. Queste sfide richiedono delle risposte collettive. Le conseguenze di una sospensione dei rifornimenti per un paese importatore di petrolio, dipendono dall'entità della variazione del prezzo e dal grado di dipendenza dell'importazione.

Quote dei Paesi MENA nell'offerta di gas e petrolio



Il petrolio, sia in forma grezza che in forma raffinata, è un bene comune globale ed un deficit nella fornitura ad un paese importatore interessa tutti i paesi consumatori, a prescindere se i loro rifornimenti ne sono direttamente influenzati, oppure no.

Questo discorso vale anche per il gas: in caso d'interruzione del rifornimento non sempre si può compensare ricorrendo ad altre fonti. Per cui i paesi consumatori devono differenziare le loro fonti.

Il rifornimento del GNL (*Gas Naturale Liquefatto*) è, in linea di principio, più flessibile, poiché la perdita di rifornimento da un produttore potrebbe in teoria essere sostituita dall'emissione di un altro produttore. La crescita della domanda di GNL dovrebbe, quindi, contribuire a più flessibilità nell'approvvigionamento di gas. Ma, in pratica, potrebbe non esserci disponibilità sufficiente a compensare grandi riduzioni dell'offerta.

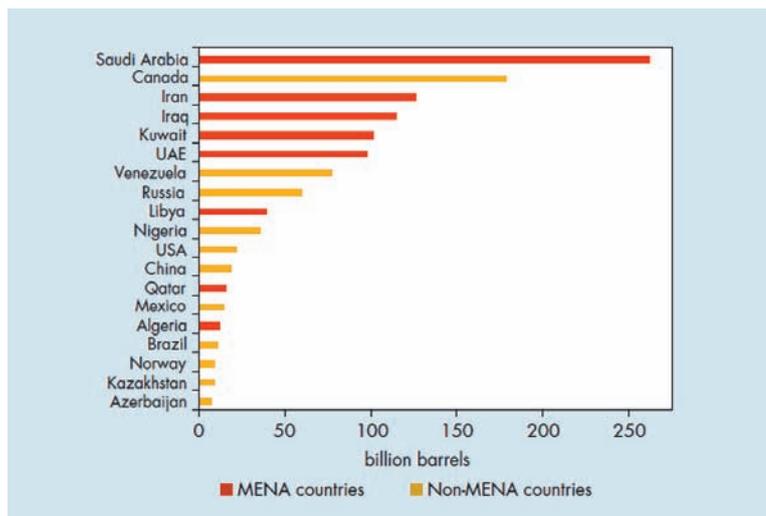
L'esigenza di un mondo di energia più sostenibile

La sicurezza dell'energia

Il ruolo dell'area MENA nella disponibilità di energia globale ha implicazioni importanti e complesse per la sicurezza dell'energia dei paesi consumatori. L'aumento del com-

mercio internazionale di petrolio e gas può portare benefici alle nazioni esportatrici ed importatrici. Ma poiché l'offerta è concentrata in pochi paesi, aumenta la possibilità di interruzioni delle forniture, come è già successo in passato, e il rischio che quei paesi ad un certo punto cerchino di usare la loro posizione dominante nel mercato per alzare i prezzi.

Paesi per riserve provate di petrolio



Molte circostanze possono influire sul prezzo del petrolio, compresa la perdita improvvisa (anche attesa) dei rifornimenti, la mancanza di alternative nel rifornimento, il trattenerne intenzionalmente i rifornimenti per motivi politici e le riduzioni coordinate di produzione. Il crescente dominio dell'area MENA nei mercati globali intensifica questi rischi. In pratica, la vulnerabilità dipende non solo dal rischio e dalla durata di un'interruzione e dalle conseguenze sui prezzi, ma anche dalla flessibilità e dalla capacità dell'economia di sostenere i prezzi più elevati.

Quanto maggiore sarà il bisogno di petrolio e scarsa la possibilità di sostituzione di esso, tanto maggiore sarà la vulnerabilità di un paese.

L'esperienza mostra che la perdita improvvisa persino di un volume modesto di petrolio, conduce ad aumenti netti dei prezzi, specialmente se connesso ad una capacità di ricambio limitata od a crescenti tensioni geopolitiche.

L'inelasticità crescente della domanda di petrolio sta aumentando la vulnerabilità dei paesi importatori. La quantità richiesta di combustibili derivati dal petrolio nel settore dei trasporti risponde pochissimo ai cambiamenti dei prezzi a breve termine. Questi combustibili non possono essere sostituiti nei veicoli attuali e, poiché il costo del combustibile rappresenta soltanto una piccola parte dei costi complessivi di un veicolo, esso influisce in misura limitata sulla scelta di un veicolo. Di conseguenza, la richiesta di combustibile tende a cambiare pochissimo al variare dei prezzi, specialmente a breve termine. Ad ogni riduzione dell'offerta, il nuovo prezzo di equilibrio, in corrispondenza

del qual la domanda dovrebbe diminuire, ci si aspetta che aumenti, aggravando il costo ai paesi di importazione.

Nel lungo termine la sicurezza energetica dei paesi importatori dipenderà da investimenti che garantiscano la soddisfazione delle esigenze energetiche nel mondo ad un costo accettabile; investimenti che aumenterebbero anche la sicurezza nel breve termine, nella misura in cui potranno permettere la piena sostituibilità dei combustibili, in modo da ridurre il rischio di deficit di rifornimento e di shock dei prezzi.

Vulnerabilità agli shocks

La preoccupazione per la minaccia di interruzioni dei rifornimenti di energia dall'area MENA deriva dall'esperienza avuta nelle ultime decadi, in cui si sono verificate, in quei Paesi, la maggior parte degli stop globalmente significativi di rifornimento di prodotti petroliferi. Dal 1970 ce ne sono state 17 serie, che hanno provocato una perdita iniziale di almeno 0,5 milioni di barili al giorno (mb/d) di petrolio grezzo.

Tre di esse sono state collegate agli eventi sopravvenuti nei paesi nord africani o in quelli medio-orientali. Le quattro crisi più importanti (la guerra Arabo-Israeliana nel 1973, la rivoluzione iraniana nel 1978-1979, la guerra tra Iran e Iraq nel periodo 1980-1988 e la guerra del Golfo nel 1990-1991) hanno comportato riduzioni iniziali comprese fra i 3 ed i 5,6 mb/d.

La più grande interruzione dagli anni novanta, è stata la perdita di 2,6 mb/d di produzione nel Venezuela tra la fine del 2002 e l'inizio del 2003 per uno sciopero nella compagnia petrolifera nazionale. A questa è seguita nel marzo 2003 la perdita della maggior parte dei rifornimenti in Iraq, come conseguenza dell'invasione; e ad oggi non si è ancora tornati al livello di produzione precedente al conflitto. Queste perdite si sono unite alla perdita di 800 kb/d di petrolio nigeriano, dovuta ad uno sciopero nell'industria petrolifera.

Anche se la sicurezza dei mezzi per la produzione di petrolio in tutti i paesi produttori è andata crescendo negli ultimi anni in risposta alla minaccia incombente del terrorismo, persistono varie forme di minaccia nella produzione e trasporto di energia nell'area MENA, quali gli attacchi ai mezzi di produzione del petrolio, ai giacimenti ed alle autocisterne (ad esempio in Iraq).

Le interruzioni dei rifornimenti possono anche derivare da atti politici intenzionali del governo del paese produttore.

Il commercio lega i fornitori ed i clienti in un rapporto di dipendenza reciprocamente favorevole, ma il commercio inter-regionale del gas e del petrolio è soggetto a subire interruzioni e minacce.

Un tema di inquietudine particolare a tale riguardo è il ricorso crescente alle esportazioni dall'area MENA attraverso poche reti strategiche di trasporto. La maggior parte del petrolio e del gas esportati dai paesi del Medio Oriente passano attraverso appena tre canali, e ciascuno di questi è suscettibile a chiusura improvvisa come conseguenza di incidenti, pirateria, attacchi terroristici o guerra:

- lo stretto di Hormuz, alla bocca del Golfo Persico;
- il passaggio di Bab El-Mandab, che collega il golfo di Aden con il Mar Rosso;

- il canale di Suez e la condotta di Sumed, che collegano il Mar Rosso al Mediterraneo.

Capacità di risposta alle emergenze

Nel 1974 l'IEA formulò l'International Energy Programma (IEP), un accordo tra paesi OCSE per cooperare e ridurre la dipendenza dal petrolio, attraverso programmi di risparmio energetico e lo sviluppo di fonti energetiche alternative.

Questo programma comprende un piano di emergenza che prevede la conservazione di scorte strategiche di petrolio (equivalenti a 90 giorni delle importazioni nette di petrolio) da ripartire tra i paesi membri, per fronteggiare un eventuale blocco degli approvvigionamenti.

Uragano Katrina
28 Agosto 2005



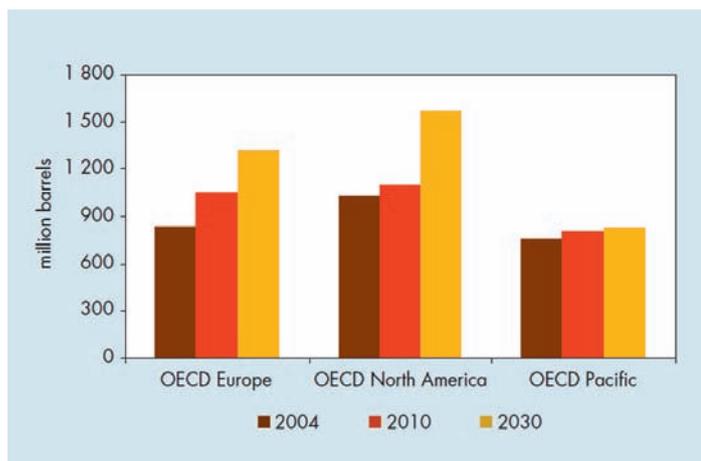
Nel settembre 2005, i paesi dello IEA hanno dimostrato la prontezza e l'efficacia di questo programma acconsentendo subito a mettere a disposizione del mercato l'equivalente di 2 mb/d del petrolio delle scorte strategiche per un periodo iniziale di 30 giorni per aiutare a bilanciare la perdita di 1,5 mb/d di produzione di petrolio greggio e di 2 mb/d di petrolio raffinato, derivata dai danni dell'uragano Katrina negli Stati Uniti. Per mantenere il livello di copertura di emergenza, in una situazione di crescente dipendenza dall'importazione di petrolio, il periodo 2003-2030 richiederà grandi aumenti nel volume delle scorte strategiche di petrolio. Per l'OCSE, le scorte di petrolio totale dovrebbero aumentare di circa 3 miliardi di barili nel 2010 e di 3,7 miliardi di barili nel 2030, affinché le riserve siano pari a 90 giorni di importazioni nette.

I costi per lo stoccaggio del petrolio variano significativamente: sono più bassi, circa 3,50 dollari per barile, per le attrezzature sotterranee, come le caverne che contengono le riserve strategiche di petrolio degli Stati Uniti, diventano più alti per le cisterne, fra i 15 ed i 20 dollari per barile. A questi va aggiunto un costo addizionale di 0,20 dollari per barile.

Cina ed India hanno iniziato a sviluppare metodi per lo stoccaggio di scorte strategiche di petrolio. Anche se i loro programmi a lungo termine sono ancora incerti, si stima che la loro spesa complessiva fino al 2030 potrebbe arrivare a 28 miliardi di dollari, supponendo che l'India immagazzini riserve equivalenti a 45 giorni di importazioni nette e la Cina riserve per 30 giorni.

Volume di petrolio necessario a garantire 90 giorni di importazioni nette nelle regioni OCSE nello Scenario di Riferimento

Fonte: IEA



La Cina attualmente sta sviluppando quattro complessi per un volume complessivo pari a 102 milioni di barili, che saranno in funzione entro il 2008. I costi sono alti, circa 19 dollari per barile, e sono negativamente influenzati dai recenti rialzi del prezzo di acciaio e cemento.

L'espansione futura del programma di immagazzinaggio della Cina probabilmente comprenderà anche la costruzione di strutture sotterranee per il petrolio.

L'India ha in programma di sviluppare entro il 2007 delle strutture che contengano circa 35 milioni di barili di petrolio, corrispondenti a circa 19 giorni di importazioni nette. Il Ministero Indiano per il Petrolio ed il Gas Naturale sta selezionando alcuni luoghi per l'immagazzinaggio di petrolio, come caverne di roccia, che si pensa comportino costi minori, intorno ai 10 dollari per barile.

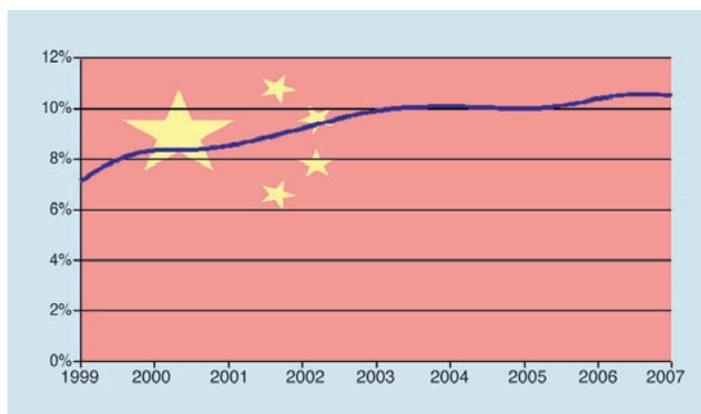
Motivazione e situazioni di mercato che influenzano e determinano gli scenari energetici futuri

La crescita economica di Cina ed India inciderà sempre di più sulla domanda di combustibili. Questo trend è iniziato lo scorso decennio, durante il quale, a fronte di un aumento congiunto del 35% nel consumo di petrolio fra il 1990 ed il 2003, le due Nazioni hanno contribuito soltanto per il 15% alla produzione mondiale.

Sviluppo economico della Cina

Negli ultimi anni il Prodotto Interno Lordo (P.I.L.) cinese è cresciuto ad un tasso del 9,5% annuo. La domanda di energia del paese è cresciuta, nel 2004, del 15% annualmente, fino a 6,37 mb/d, circa un terzo del fabbisogno statunitense, rendendo la Cina il secondo consumatore di energia, dopo gli Stati Uniti e prima del Giappone.

Crescita percentuale del P.I.L. cinese, 1999-2007
Per il 2007 si tratta del risultato atteso



Attualmente le importazioni coprono circa il 40% della domanda di petrolio, che viene in larga parte utilizzato per la produzione di elettricità, sebbene sia previsto che la domanda del prezioso combustibile crescerà ancora, a causa dell'aumento del numero di automobili in circolazione e dell'industria petrolchimica.

Per fronteggiare la carenza di elettricità iniziano ad essere costruite nuove centrali a carbone, gas naturale, idroelettriche e nucleari.

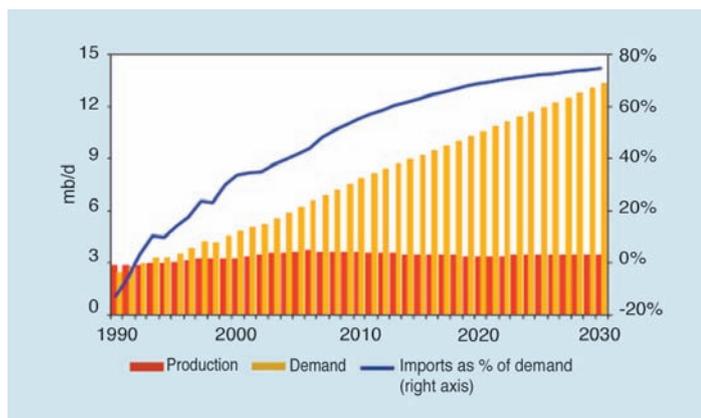
Le compagnie petrolifere di Stato hanno deciso, per questioni di sicurezza, di diversificare i fornitori e di costruire riserve strategiche, mentre il governo inizia ad elaborare nuove politiche che abbassino la richiesta di petrolio.

Con il decimo piano quinquennale (2001-2005) è iniziata la costruzione dei quattro siti

che conterranno le riserve strategiche: già alla fine del 2008 saranno stoccati circa 100 milioni di barili, pari a 35 giorni di importazioni nette.

Per diminuire la domanda di combustibile del settore dei trasporti, che nel medio e lungo termine sarà il comparto a maggior richiesta di petrolio, già dal 2004 sono stati promossi standard di efficienza per le automobili, mentre si pensa d'introdurre tasse sulla benzina, che aumenteranno il prezzo dai 1,6 \$ per gallone, a 2-3 \$ per gallone (pari a 3,78 litri).

Produzione e domanda di petrolio in Cina



Sino al 1993 le importazioni cinesi venivano quasi esclusivamente dall'Indonesia, dall'Oman e dallo Yemen, mentre oggi l'Arabia Saudita, che garantisce il 14% delle importazioni, è il principale fornitore, e circa il 60% viene importato da: Oman, Angola, Iran, Russia, Vietnam, Yemen, oltre che dal Sudan, Congo e Guinea Equatoriale.

È evidente che il *Dragone Rosso* vuole rafforzare la sua presenza in Africa, in modo da ottenere un ruolo chiave nelle prossime attività di ricerca di giacimenti petroliferi.

Nel complesso, la Cina continuerà ad essere forte importatrice di combustibili fossili: è probabile che in futuro acquisterà il 75% dei combustibili necessari al suo fabbisogno energetico, arrivando ad importare, nel 2030, una quantità di petrolio pari a quella odierna degli Stati Uniti.

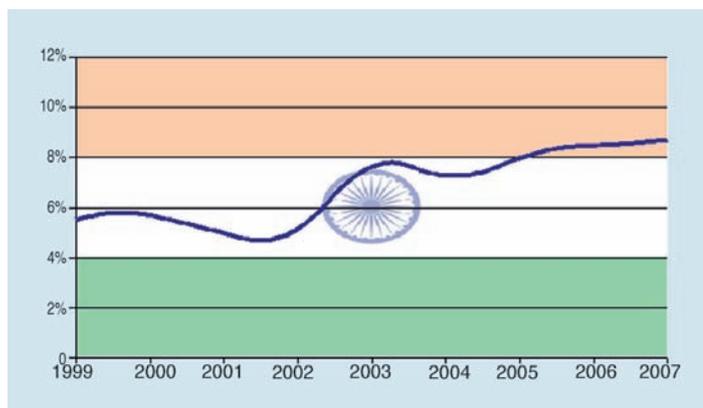
Sviluppo economico dell'India

L'India è un paese in continua crescita: l'incremento annuo del P.I.L. è passato dal 4,3% nel 2002, all'8,5% del 2006.

Il consumo totale di energia è soddisfatto per il 30% dal petrolio, il cui impiego dovrebbe aumentare rapidamente, dai 2,2 mb/d del 2003 (dei quali il 63% sono stati importati) fino ai 2,8 mb/d nel 2010.

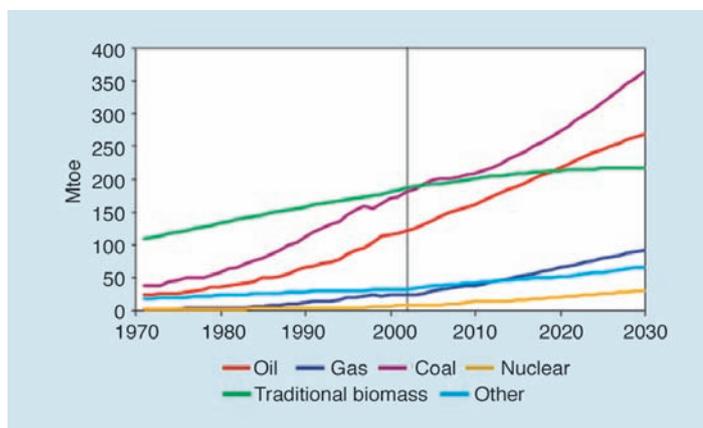
Per limitare la dipendenza del Paese si cerca di espandere l'esplorazione e la produzione nazionale: dal 1997 il governo, con la NELP (*New Exploration Licensing Policy*) permette nuove ricerche, ammettendo, per la prima volta, la partecipazione straniera. Attualmente il livello di importazioni di greggio è del 70% (solo nel 2004 è aumentato

Crescita percentuale del P.I.L. indiano, 1999-2007
Per il 2007 si tratta del risultato atteso



del 7,3%), e si ritiene che nei prossimi 10-15 anni arriverà all'85%. Questo indica una vulnerabilità dell'economia indiana alle importazioni, alla quale il governo ha deciso di rispondere con la costruzione di riserve strategiche in varie località del paese, ed introducendo misure per promuovere il risparmio di petrolio nei settori del trasporto, industriale, agricolo.

Composizione della domanda di energia primaria in India
(Millions of tons of oil equivalent)



Si tratta quindi di una strategia opposta a quella cinese: mentre la Cina cerca di ottenere un ruolo chiave nelle zone produttive più importanti (l'Africa), l'India cerca di ridurre il divario fra la domanda di greggio e la produzione nazionale.

Politiche energetiche negli Stati Uniti

Gli U.S.A. Sono i maggiori produttori, consumatori ed importatori netti di energia. Al primo gennaio 2005 la loro riserva provata di petrolio, costituita da 21,9 miliardi di barili, era l'undicesima del pianeta. Nel 2003 sono stati prodotti 7,8 mb/d, dei quali 5,7 milioni erano greggio, mentre il resto, in larga parte, gas naturale liquido. Le importa-

zioni sono il 60% della domanda, e provengono in larga parte dal Medio Oriente. Stando alle previsioni dell'IEA, in futuro la produzione di petrolio dovrebbe diminuire leggermente (è già successo nel 2003 e 2005), mentre il consumo continuerà a crescere fino a doppiare, nel 2025, le importazioni nette.

Nel settembre 2004 l'uragano Ivan ha causato una perdita di 29 milioni di barili di petrolio, e gli uragani del 2005 (Katrina, Rita, Stan) hanno contribuito alla riduzione della produzione. Questo ha portato all'elaborazione di una Politica Energetica Nazionale (NEP), il cui scopo principale è quello di limitare le importazioni ed i consumi, ed alla costituzione del NEDC (*National Resources Defence Council*), che ha invece il compito di elaborare proposte per ridurre il consumo di petrolio.

Anche negli Stati Uniti, per ridurre l'incertezza dell'offerta, già in seguito alle crisi del 1973-1974, sono state costruite delle riserve strategiche di petrolio, da utilizzare in caso di interruzioni di rifornimenti.

Il progresso tecnologico indotto dai prezzi dell'energia

L'aumento costante dei prezzi, che contribuisce ad una variazione nel comportamento dei consumatori e nelle aspettative sui prezzi futuri del produttore, hanno un impatto particolarmente forte sul mix dei combustibili e sul cambiamento tecnologico.

Lo sviluppo e la diffusione di tecnologie energetiche più efficienti, sia per l'offerta che per la domanda, sono accelerate dopo le due crisi petrolifere degli anni settanta. Questo ha contribuito a dimezzare, nelle due decadi successive, l'indice di *oil intensity* (consumo di petrolio per unità di attività) nei paesi IEA.

Prezzi dei combustibili convenzionali più alti rendono le fonti di energia alternative più convenienti. Chi si occupa di queste tecnologie riceve incentivi per allocare più risorse al loro sviluppo: l'energia nucleare, eolica, solare, il carbone, la gassificazione, hanno avuto una crescita significativa dopo le crisi petrolifere.

Uno dei motivi sta nella crescita, nei settori pubblico e privato, della diffusione della ricerca e dello sviluppo (R&S).

I governi dei paesi IEA hanno raddoppiato la loro spesa in R&S in termini reali durante gli anni settanta, con un picco nei primi anni ottanta. Da allora, la spesa di R&S ha più o meno seguito i prezzi di petrolio, declinando negli anni ottanta e con una stabilizzazione negli anni novanta.

I prezzi dell'energia influenzano anche la domanda relativa alla tecnologia. Con l'aumento dei prezzi, i consumatori tendono a scegliere gli apparecchi a maggior efficienza energetica. Le imprese industriali e commerciali cominceranno ad introdurre apparecchiature con consumi ridotti di energia nei loro stabilimenti ed uffici.

La crisi petrolifera degli anni settanta, insieme alle politiche dei governi, ha portato a significativi risparmi di energia in tutti i settori. L'indice di *energy intensity* (consumo di energia per unità di attività) è diminuito drasticamente dopo il crollo del prezzo del petrolio nel 1986.

Con il recente aumento dei prezzi, i risparmi di energia potrebbero ricominciare ad accelerare, poiché consumatori ed imprese dovrebbero ricominciare a prendere in considerazione, per i loro acquisti, l'efficacia energetica.

Prezzi elevati non richiedono incentivi statali per l'introduzione di nuove tecnologie sul mercato, perché si riduce la necessità di ridurre i costi

Dopo un lungo periodo di miglioramenti modesti nei consumi delle automobili nei paesi dello IEA, l'industria automobilistica sta iniziando ad accelerare lo sviluppo di tecnologie più efficienti, come i motori ibridi.

Negli ultimi due anni, General Motors ha aumentato le spese annuali di R&S di \$ 500 milioni e Toyota di quasi \$ 1 miliardo.

Analisi empiriche hanno dimostrato una relazione positiva fra prezzi energetici ed innovazione tecnologica. Le aspettative di prezzi futuri più alti potrebbero stimolare nei prossimi anni lo sviluppo di migliori tecnologie sia per la domanda che per l'offerta.



Unità di misura dell'energia

Diverse sono le unità di misura dell'energia, a seconda del tipo di energia prodotta o convertita; esistono comunque relazioni di equivalenza fra le unità.

Le unità di misura più usate sono: il Joule (J), la kilocaloria (kcal), il British Thermal Unit (BTU), il chilowattora (kWh), e i loro multipli.

I fattori di conversione più utili agli scopi del testo sono riportati nelle tabelle seguenti. Ogni combustibile ha un proprio "valore energetico", misurabile dall'energia ricavabile dalla sua combustione; per darne una misura ci si riferisce convenzionalmente alla quantità di energia ricavabile dalla combustione di 1 kg (o di un m³), espressa in chilocalorie o megajoule, a cui si dà la denominazione di "potere calorifico".

Per fare, quindi, dei bilanci energetici che tengano conto dell'apporto delle diverse fonti o combustibili, ognuna di esse, mediante un calcolo di equivalenza a partire dai diversi poteri calorifici inferiori (p.c.i.), viene convertita in una unità di misura, commerciale, di uso generale: la tonnellata equivalente petrolio (tep) ed il suo multiplo milioni di tep (Mtep).

Considerato che il potere calorifico del petrolio è di 10.000 kcal/kg, risulterà che 1 kg di carbone (pci = 7.000 kcal/kg) equivale a 0,7 kg di petrolio ed 1 m³ di gas naturale (pci = 8.250 kcal/m³) "vale" 0,825 kg di petrolio. La densità di riferimento del petrolio è assunta pari a 0,8636 kg/litro.

Tabella 1
Unità di misura dell'energia
e fattori di conversione

1 kilocaloria (kcal)	= 3,968 Btu = 4,187 kJ
1 British thermal unit (Btu)	= 0,252 kcal = 1,055 kJ
1 kilojoule (kJ)	= 0,948 Btu = 0,239 kcal
1 barile di petrolio equivalente (bep)	= 5,4 · 10 ⁶ Btu
1 t di petrolio equivalente (tep)	= 10 · 10 ⁶ kcal
1 t di carbone equivalente (tec)	= 7 · 10 ⁶ kcal
1 kWh	= 3.600 kJ = 3.412 Btu

Tabella 2
Fattori di conversione
tra alcune unità di misura
commerciali dell'energia

		tec	tep	bep	Nm ³ NG
1 t di carbone equivalente	(tec)	1	0,700	5,098	848
1 t di petrolio equivalente	(tep)	1,429	1	7,283	1212
1 barile di petrolio equivalente	(bep)	0,196	0,137	1	166
1 metro cubo di gas naturale equivalente	(Nm ³ NG)	1,18·10 ⁻³	8,25·10 ⁻⁴	6,0·10 ⁻³	1

Tabella 3
Fattori di conversione
tra alcune unità di misura
del volume

	gal USA	gal UK	bbbl	ft ³	l	m ³
Gallone (gal) USA	1	0,8327	0,02381	0,1337	3,785	0,0038
Gallone (gal) UK	1,201	1	0,02859	0,1605	4,546	0,0045
Barile (bbbl)	42,0	34,97	1	5,615	159,0	0,159
Piede cubico (ft ³)	7,48	6,229	0,1781	1	28,3	0,0283
Litro (l)	0,2642	0,220	0,0063	0,0353	1	0,001
Metro cubico (m ³)	264,2	220,0	6,289	35,3147	1000,0	1

BIBLIOGRAFIA

- Il Programma ENEA sull'energia solare a concentrazione ad alta temperatura*, ENEA, 2004.
- Lo sviluppo delle Rinnovabili in Italia - Le Fonti Rinnovabili 2005*, ENEA, 2005.
- Idrogeno Energia del Futuro*, Collana Sviluppo Sostenibile, ENEA, 2004.
- Rapporto Energia Ambiente 2005*, ENEA, 2005.
- Energia Ambiente e Innovazione*, ENEA, 2007.
- LORENZONI ARTURO, "Contraddizioni e opportunità dalle fonti rinnovabili", in *Lo sviluppo delle Rinnovabili in Italia - Le Fonti Rinnovabili 2005*, ENEA, 2005.
- VIVOLI FRANCESCO. P., *Le Fonti Rinnovabili*, Ministero dell'Ambiente e della tutela del Territorio – ENEA, 2004.
- VIVOLI F.P., *Dalle Fonti Rinnovabili allo Sviluppo Sostenibile*, ENEA, 2005.
- VIVOLI F.P., *Energia dal Sole: Le Fonti Rinnovabili*, ENEA, 2004.
- GRACCEVA F., CONTALDI M., *Scenari energetici Italiani, valutazione di misure di politica energetica*, ENEA, 2004.
- ANSELMI G., VIVOLI F. P., LA MENDOLA P., MOCCI C., GRACCEVA F., MANNA C., *Corso e-learning*, UNESCO, 2006.
- CITTERIO M., FRATINI N., *Cenni sulle applicazioni solari a bassa/media temperatura per riscaldamento, raffrescamento e acqua calda sanitaria*, ENEA, 2006.
- CUCUMO M. A., MARINELLI V., OLIVETI G., *Ingegneria solare principi e applicazioni*, Pitagora Editrice, Bologna, 1994.
- Duffie J.A., Beckman W.A., *Solar Engineering of Thermal Process*, II Edition, John Wiley and Sons, New York, 1991.
- Calore ad alta temperatura dall'energia solare. Una tecnologia innovativa per un'energia pulita, disponibile con continuità e ad un costo competitivo*, ENEA, Roma 2004.
- RUBINI L. (a cura di), *Energia termica dal Sole. Le applicazioni a bassa temperatura*, ISES Italia, Roma, 1998.
- Marano D., Sabatelli V., *L'impianto solare termico: tecnologia, componenti e criteri di dimensionamento*, ENEA, 2007.
- MIZZONI G., SERRECCHIA B., *Impianti solari termici. progettazione e installazione*, ENEA, 2004.
- L'Energia eolica*, opuscolo n° 19 della collana "Sviluppo sostenibile", ENEA.
- Idrogeno energia del futuro*, opuscolo n° 23 della collana "Sviluppo sostenibile", ENEA.
- Libro bianco, Per la valorizzazione energetica delle fonti rinnovabili*, ENEA, 1999.
- Libro bianco Unione Europea, Energia per il futuro, le fonti energetiche rinnovabili*, UE, 1997.
- La cooperazione energetica con i paesi in via di sviluppo*, Commissione delle Comunità Europee, COM(2002) 408 definitivo, 2002.
- World Energy Outlook*, IEA, 2005.
- World Energy Outlook*, IEA, 2006.
- Oil Market Report*, IEA, 10 December 2004.
- Oil Market Report*, IEA, 11 October 2005.
- Key World Energy Statistics*, IEA, 2005.
- Renewables Information*, IEA, 2005.
- Renewables in Global Energy Supply*, IEA, 2007.
- Guidance in Preparing a National Sustainable Development Strategy*, ONU, Department of Economic And Social Affairs, 2002.

Edito dall'ENEA

Unità Comunicazione

Lungotevere Thaon di Revel, 76 - Roma

www.enea.it

Edizione del volume a cura di Antonino Dattola

Finito di stampare nel mese di Ottobre 2008
da Fabiano Group Srl – Canelli (AT).

