





*Titolo*

Energia e salute della Terra

*Autori*

Giulio De Leo, Giulia Fiorese, Giorgio Guariso

*Volume edito a cura della*

FONDAZIONE ACHILLE E GIULIA BOROLI

*Progetto grafico*

Studio CREE – Milano

*Realizzazione editoriale*

REDINT Studio s.r.l.

Nessuna parte di questo libro può essere riprodotta o trasmessa in qualsiasi forma o con qualsiasi mezzo elettronico, meccanico o altro senza l'autorizzazione scritta dei proprietari dei diritti e dell'editore

**[info@fondazioneaegboroli.com](mailto:info@fondazioneaegboroli.com)**

**[www.fondazioneaegboroli.it](http://www.fondazioneaegboroli.it)**

On line i libri della collana Homo Sapiens

© 2009 Fondazione Achille e Giulia Boroli

Finito di stampare nel mese di novembre 2009  
a cura di DEAPRINTING – Novara

Edizione fuori commercio





**HOMO** SAPIENS

GIULIO DE LEO, GIULIA FIORESE,  
GIORGIO GUARISO  
ENERGIA  
E SALUTE DELLA TERRA



FONDAZIONE ACHILLE E GIULIA BOROLI







## LA FONDAZIONE ACHILLE E GIULIA BOROLI

Nel 1998 Achille Boroli, oggi presidente onorario di De Agostini Editore Spa, ha fondato l'ente che porta il suo nome e quello della moglie Giulia e lo ha dotato di un importante fondo con capitali personali; in questa iniziativa si manifesta la precisa volontà del fondatore di continuare a essere concretamente presente all'interno della società civile con attività di supporto a enti pubblici e privati, laici e religiosi, già operanti nel campo della ricerca scientifica, della charity e della cultura nel senso più ampio del termine. In questo ambito, e più precisamente in conformità con uno degli obiettivi statutari, è nata questa iniziativa editoriale che esprime la volontà di supportare la conoscenza e l'approfondimento dei grandi temi dell'attualità da parte delle più giovani classi di età, al fine di favorire la comprensione del mondo sempre più complesso e problematico in cui viviamo.

Questa iniziativa si affianca a un'altra attività ormai tradizionale della Fondazione, che assegna borse di studio in favore degli studenti meritevoli per favorirne l'iscrizione all'Università.

Editore di successo, animato da una fede intatta nei valori della cultura e della lettura come strumento insuperato di comunicazione, Achille Boroli ha fortemente voluto che la Fondazione realizzasse la collana di libri che oggi presentiamo ai giovani, fiduciosi che l'informazione, la libera riflessione e il pensiero contribuiranno alla formazione dei cittadini del futuro.





# SOMMARIO

## Premessa

### Misurare l'energia e le fonti energetiche

- 16 1. Forme e trasformazione dell'energia
- 19 2. L'efficienza dei processi di trasformazione
- 24 3. Classificazione delle fonti energetiche
- 24 3.1 *Le fonti primarie*
- 27 3.2 *Le fonti secondarie*
- 27 3.3 *Fonti rinnovabili e non rinnovabili*
- 28 4. Le unità di misura
- 30 5. I criteri di valutazione delle fonti energetiche
- 31 5.1 *La densità energetica*
- 33 5.2 *I punti di forza e di debolezza delle fonti d'energia*

### Storia dell'energia

- 38 1. Le trasformazioni energetiche alle origini della vita
- 40 2. L'uomo e la scoperta del fuoco
- 42 3. Energia dalle piante e dagli animali e i primi problemi di deforestazione
- 45 4. Lo sfruttamento della forza dell'acqua e del vento
- 47 5. La polvere da sparo e la forza distruttiva degli esplosivi
- 48 6. La macchina a vapore, il carbone (e l'origine dell'inquinamento)
- 51 7. I motori a combustione interna e l'inizio dell'era del petrolio
- 54 8. L'era dell'elettricità
- 57 9. Crisi energetiche, fonti alternative ed energia nucleare
- 58 9.1 *Il nucleare*
- 60 10. I nostri giorni: le reti informative e la crescita dei consumi

### Domanda e offerta di energia

- 63 1. L'energia primaria
- 64 2. Le fonti esauribili (o non rinnovabili)
- 65 3. Le riserve di combustibili fossili
- 66 3.1 *I differenti tipi di riserve di petrolio*
- 71 3.2 *Le riserve di gas naturale e di carbone*

- 72 4. Le fonti rinnovabili
- 74 5. Come usiamo l'energia primaria
- 75 6. La distribuzione dei consumi
- 76 7. La crescita della domanda energetica mondiale
- 78 8. Il contesto europeo
- 79 9. Il contesto italiano

### **Le tecnologie per la produzione di energia**

- 89 1. Le centrali termoelettriche e termonucleari
- 90 1.1 *Gli impianti a carbone*
- 92 1.2 *Le centrali a gas*
- 94 1.3 *Le centrali termonucleari*
- 94 2. Cogenerazione e teleriscaldamento
- 97 3. Le fonti rinnovabili
- 97 3.1 *L'energia idroelettrica*
- 100 3.2 *L'energia eolica*
- 101 3.3 *L'energia solare*
- 102 3.3.1 I pannelli fotovoltaici
- 104 3.3.2 Il solare termico
- 105 3.3.3 Il solare a concentrazione
- 107 3.4 *L'energia geotermica*
- 108 3.4.1 Le sonde geotermiche
- 110 3.5 *Biomasse per l'energia*
- 111 3.6 *I processi di conversione energetica delle biomasse*
- 115 4. Nuove tecnologie e prospettive
- 115 4.1 *L'energia dal mare*
- 116 4.2 *Trigenerazione e teleraffrescamento*
- 118 4.3 *Celle a combustibile*
- 119 4.4 *Sistemi di accumulo dell'energia*
- 121 4.5 *La produzione di energia distribuita e la rete di trasporto*
- 121 4.6 *Riduzione e livellamento del carico*

### **Gli effetti ambientali della produzione di energia: inquinamento locale**

- 131 1. I meccanismi di trasporto e diffusione
- 133 2. I principali inquinanti legati alla combustione
- 134 2.1 *Il particolato*
- 136 2.1.1 Effetti del particolato sull'organismo umano
- 138 2.1.2 Valutazioni epidemiologiche
- 141 2.2 *Ossidi di azoto*

143	2.3	<i>Ossidi di zolfo</i>
145	2.4	<i>Composti organici volatili</i>
146	2.5	<i>Monossido di carbonio</i>
147	2.6	<i>Ozono</i>
149	3.	Gli effetti delle deposizioni acide
150	4.	Come valutare gli effetti delle emissioni dei camini di una centrale
153	5.	L'inquinamento da idrocarburi
154	5.1	<i>I pericoli del trasporto via mare</i>
156	5.2	<i>L'inquinamento causato da oleodotti, pozzi, depositi e raffinerie</i>
157	6.	Altri impatti e strumenti per la valutazione
158	6.1	<i>La valutazione e la gestione degli impatti ambientali</i>

### **Energia, effetto serra e cambiamenti climatici**

166	1.	Il ciclo del carbonio
172	2.	L'effetto serra
174	3.	Le evidenze scientifiche del riscaldamento globale
174	3.1	<i>Le stime della temperatura sulla Terra</i>
177	3.2	<i>I "termometri naturali"</i>
177	3.3	<i>La correlazione biossido di carbonio-temperatura</i>
180	4.	Gli impatti dei cambiamenti climatici
180	4.1	<i>Su oceani e ghiacciai</i>
182	4.2	<i>Sulla meteorologia</i>
184	4.3	<i>Sugli ecosistemi</i>
186	4.4	<i>Le conseguenze sulla società</i>
186	5.	Scenari futuri
187	5.1	<i>Che cos'è e come funziona un modello matematico del clima?</i>
190	5.2	<i>Che cosa prevedono gli scenari dell'IPCC</i>

### **Risparmio energetico, usi finali e trasporti**

203	1.	Potenzialità del risparmio energetico
204	2.	Consumi finali
205	2.1	<i>Illuminazione</i>
207	2.2	<i>Elettrodomestici e apparecchiature elettroniche</i>
209	3.	La certificazione energetica degli edifici
214	4.	Uso del suolo e urbanizzazione
215	5.	Trasporti e mobilità
217	5.1	<i>Interventi sui combustibili</i>



- 220 5.2 *Interventi sui mezzi di trasporto*
- 221 5.3 *Interventi sulle abitudini*
- 222 6. Il ruolo del risparmio energetico

### **Le risposte istituzionali**

- 227 1. Lo sviluppo sostenibile
- 229 1.1 *L'Agenda 21*
- 230 2. Misurare la sostenibilità
- 231 2.1 *Il prodotto interno lordo*
- 231 2.2 *L'indice di progresso genuino*
- 232 2.3 *L'indice di sviluppo umano*
- 234 2.4 *L'impronta ecologica*
- 237 3. La sostenibilità in Italia
- 239 4. Valutazioni economiche degli impatti sulla salute e sull'ambiente
- 239 4.1 *I costi esterni*
- 243 5. Il Protocollo di Kyoto
- 245 5.1 *I meccanismi flessibili*
- 246 5.2 *Aspetti economici*
- 246 5.3 *L'attuazione del Protocollo di Kyoto in Italia*
- 248 6. Il Protocollo di Kyoto e le foreste
- 249 7. L'Unione Europea e il "Pacchetto 20-20-20"
- 251 8. Verso la COP15 di Copenhagen



### **Conclusioni: che cosa ci attende, che cosa possiamo fare**

- 260 1. Energia e tecnologie
- 261 1.1 *Problemi e possibilità delle energie rinnovabili*
- 263 1.2 *Prospettive nuove nel trasporto dell'energia*
- 264 2. Energia ed economia
- 266 3. Energia, società e ambiente
- 266 3.1 *Le strategie globali*
- 267 3.2 *L'azione locale*
- 269 3.3 *L'indipendenza energetica*
- 271 4. I nostri comportamenti e l'energia

### **273 Per approfondire**





## PREMESSA

*Non ti sia grave fermarti alcuna volta a vedere nella cenere del fuoco,  
o nuvole, o fanghi, o altri simili luoghi, nei quali tu troverai invenzioni:  
perché nelle cose confuse l'ingegno si desta.*  
Leonardo da Vinci

Questo non è soltanto un libro “da leggere”. È soprattutto un libro “da pensare” e “da fare”. Tanto meno lo si può sfogliare in fretta per vedere come va a finire. L'avvenire dell'energia e dell'ambiente nel quale viviamo sono così intimamente e profondamente legati a tutta la nostra vita economica e sociale che prevederne lo sviluppo, al di là di pochi anni in avanti, e anche questi con molte incertezze, richiederebbe una sfera di cristallo. O una comprensione completa di tutti i fenomeni fisici e umani che ancora siamo ben lontani dall'aver raggiunto.

Il libro si limita quindi a presentare in ogni capitolo una delle molte facce di questo complesso problema. Così, dopo aver definito nel primo capitolo la terminologia generale relativa all'energia e aver messo in luce alcuni aspetti di base sulle sue trasformazioni e i suoi utilizzi, il capitolo “Storia dell'energia” ricorda come essa abbia accompagnato lo sviluppo dell'umanità e come il suo utilizzo abbia subito una grandissima accelerazione negli ultimi decenni. Il capitolo “Domanda e offerta di energia” riassume alcune questioni geopolitiche relative alla disponibilità e all'utilizzo dei combustibili fossili. Nel successivo capitolo “Le tecnologie per la produzione di energia” sono presentati i sistemi di conversione più comuni, accanto alle fonti rinnovabili e ai più recenti sviluppi che fanno intravedere la probabile evoluzione dei prossimi anni. I capitoli “Gli effetti ambientali della produzione di energia: inquinamento locale” ed “Energia, effetto serra e cambiamenti climatici” analizzano i problemi locali e globali legati all'utilizzo dei combustibili tradizionali e presentano alcuni stru-





menti per prevedere e quantificare questi effetti. Nel capitolo “Risparmio energetico, usi finali e trasporti” sono riassunte alcune delle possibili strade per ridurre il consumo delle fonti primarie e i relativi impatti sull’ambiente nel settore residenziale e della mobilità. Il capitolo “Le risposte istituzionali” presenta quindi gli interventi normativi, gli accordi internazionali, le azioni politiche che sono state intraprese a vari livelli per salvaguardare la salute del pianeta. Ciò infine ci consente nell’ultimo capitolo di formulare alcune conclusioni su previsioni e prospettive future.

Ogni capitolo può quindi essere visto anche in modo indipendente, oltre che nella sequenza generale del libro, e cerca però di far capire come tutti gli aspetti siano collegati e quindi richiedano soluzioni complessive che non si limitino a considerare e risolvere una singola questione. Per giungere a queste soluzioni complete, occorre tener presente e integrare i risultati di molte discipline e quindi sono spesso richiamate nozioni di chimica, di fisica, di matematica, di biologia, di ecologia, di storia e perfino di inglese e di latino. Proprio perché riflette, com’è ovvio, le nostre competenze, il libro sottolinea soprattutto gli aspetti tecnico-scientifici rispetto a quelli più propriamente economici o sociali.

I capitoli centrali del libro sono poi corredati da tre tipi di schede. Quelle intitolate “Diamoci da fare” presentano alcuni esempi concreti di azioni e realizzazioni che sono state intraprese per affrontare le problematiche illustrate nel capitolo relativo. Sono esempi da proporre e da seguire anche in altre situazioni in cui ci possiamo trovare (sono quindi cose “da fare”). Le schede “Facciamo i conti” cercano invece di far capire che anche problemi di dimensioni globali (come quello di stabilire di quanto aumenterà la CO<sub>2</sub> dell’intera atmosfera se continueremo con le attuali emissioni) si possono in realtà risolvere abbastanza bene con la matematica che si studia alle superiori e quindi potrebbero fornire spunti per valutazioni quantitative magari ancora più complesse. Le schede “Documentiamoci” hanno infine lo scopo di stimolare a “proseguire per conto proprio”. Troppo spesso, infatti, ci si lascia influenzare da quanto si legge sui giornali o si vede alla tv, dove non sempre i problemi sono trattati in modo tecnicamente corretto. Ecco allora che possiamo sfruttare le grandi potenzialità di Internet per renderci conto di persona di come stanno le cose. Le schede riportano indirizzi di siti istituzionali nazionali e internazionali in cui si possono reperire dati ufficiali sui problemi dell’energia e dell’ambiente. Naturalmente, è solo una goc-



cia nel mare: se si cercano su Internet i documenti che contengono le parole *energy* e *environment* si è travolti da una valanga di più di 100 milioni di siti! Nelle schede ne sono elencati meno di dieci, ma servono per cominciare un'eventuale ricerca personale tramite dati validati e accettati (anche Internet, come il giornale o la tv, non garantisce a priori la correttezza delle informazioni fornite!).

Il libro suggerisce diverse cose da fare e speriamo che consenta anche di riflettere su alcune delle problematiche illustrate. Benché il problema dell'energia e dei suoi impatti sull'ambiente sia un problema globale, che riguarda l'intera umanità, la sua soluzione sarà certamente basata anche su piccoli e apparentemente insignificanti comportamenti individuali: come usiamo il motorino e il frigorifero, come mangiamo, come smaltiamo i nostri rifiuti. Ecco quindi che ogni capitolo potrebbe farci pensare a qual è o a quale potrebbe essere il nostro contributo individuale su uno specifico aspetto del problema, per assumere poi comportamenti coerenti anche nella vita quotidiana, nella società e nelle scelte politiche che compiamo.

Certamente il problema dell'energia e del suo impatto sull'ambiente è un problema di enorme complessità, che può anche apparire a tratti "confuso", per riprendere la citazione iniziale di Leonardo. Ma è proprio per questo che dobbiamo tenere desta la nostra attenzione e utilizzare tutto il nostro ingegno se vogliamo continuare a utilizzare appieno l'energia che ha reso così confortevole, lunga e ricca la nostra esistenza e contemporaneamente lasciare alle generazioni future un ambiente e un pianeta in condizioni simili a quelle in cui noi lo abbiamo trovato. In una parola, garantire a tutti gli uomini un futuro sostenibile.

Gli autori

*Milano - Monterey, CA, Agosto 2009*

La redazione di questo volume è stata possibile grazie alla collaborazione di tanti colleghi. Gli autori vogliono ringraziare particolarmente i proff. Antonio Ballarin Denti, Università di Brescia; Renato Casagrandi e Marino Gatto, Politecnico di Milano, per i suggerimenti, il supporto tecnico e l'amicizia.





## MISURARE L'ENERGIA E LE FONTI ENERGETICHE

Per gran parte della storia dell'umanità, energia ha significato crescita, progresso, benessere. Secondo uno dei miti più antichi del mondo occidentale, il furto del fuoco di Prometeo, il controllo dell'energia affranca l'uomo dai capricci della natura e permette la nascita della τέχνη (téchne), ovvero dei mestieri artigianali con cui l'uomo ha imparato a cuocere l'argilla e fare ceramica, a fondere metalli e costruire utensili per facilitare i lavori manuali, potenziare il lavoro nei campi e sfruttare le risorse naturali per migliorare la propria vita.

Nel mito di Prometeo le sconfinite capacità demiurgiche che derivano dal furto del fuoco si accompagnano, però, a un contrappasso che l'uomo deve pagare, quei malanni che, liberati dal vaso di Pandora, affliggono l'umanità.

Nel corso dei secoli e, in particolare, negli ultimi 150 anni il progresso tecnologico per lo sfruttamento dell'energia è stato impressionante. Oggi più che mai, nel pieno della globalizzazione e dello sviluppo dell'era digitale, l'energia sostiene pervasivamente (anche se spesso in modo poco evidente) buona parte del nostro benessere materiale come mobilità, trasporti di beni, servizi e informazione.

Purtroppo però, 2500 anni dopo la nascita del mito di Prometeo, anche la società moderna – la più avanzata tecnologicamente e con le aspettative di vita più alte e mai prima raggiunte – deve fare i conti con il proprio vaso di Pandora. Infatti, la produzione di energia, basata essenzialmente sull'uso di combustibili fossili, comporta pesanti “effetti collaterali”, come l'emissione di sostanze inquinanti che minacciano la salute dell'uomo e di gas che stanno modificando il clima del pianeta.

In questo libro tratteremo i principali aspetti del problema energetico con particolare attenzione a quelli tecnologici dei sistemi industriali di produzione dell'energia, a quelli di carattere ambientale, agli impatti sulla salute dell'uomo e degli ecosistemi, al-





le tecniche per stimarli e prevenirli, mantenendo comunque un occhio anche sulle problematiche economiche e sociali e illustrando le politiche per combattere i cambiamenti climatici e ridurre i consumi.

Prima di entrare nel vivo degli aspetti tecnologici e ambientali, è necessario però introdurre una serie di nozioni di base relative alle forme con cui si presenta l'energia, ai principali processi di trasformazione, ai modi con cui si misurano le fonti energetiche e ai criteri utilizzati per classificarle.

## 1. Forme e trasformazione dell'energia

Tutto quello che ci circonda è energia. La calda radiazione del sole in una giornata estiva, il fuoco di un caminetto, l'imponente massa d'acqua che scorre in un fiume in piena, la forza del vento che muove le pale di un generatore eolico, l'elettricità che alimenta il computer o muove la motrice di un treno, il tepore di un calorifero in inverno, oppure l'aria fredda emessa da un condizionatore in estate. L'energia è presente ovviamente anche nei legami chimici di petrolio, gas e carbone e in quelli nucleari dell'uranio e del plutonio.

L'energia si può quindi presentare sotto diverse forme e in molti casi è possibile trasformarla da una forma all'altra. Per esempio, l'acqua contenuta in un bacino idroelettrico di montagna possiede un' *energia potenziale* che è tanto più grande quanto maggiore è il volume (e quindi la massa, o il peso) dell'acqua invasata e quanto maggiore è il salto idrico fra il bacino e la turbina elettrica a valle. Quando le paratie della diga vengono aperte, l'acqua defluisce nella condotta forzata e, acquistando velocità, trasforma l'energia potenziale in *energia cinetica*. La massa d'acqua in movimento a un certo punto colpisce le pale della turbina facendola ruotare e trasformandosi così in *energia meccanica*. L'asse della turbina è collegato a un generatore grazie al quale l'energia meccanica viene trasformata in *energia elettrica*. L'energia elettrica viene generalmente prodotta anche (anzi, soprattutto) grazie alla trasformazione dell'*energia chimica* contenuta nei combustibili fossili in *energia termica* (calore) attraverso processi di combustione: il calore produce vapore ad alta pressione e temperatura utilizzato per mettere in moto turbine collegate a un generatore elettrico.





L'energia elettrica è una delle forme più duttili e flessibili in cui si presenta l'energia, sia per la facilità di trasportarla a basso costo a grande distanza (cosa che permette di consumarla in luoghi molto lontani da quelli di produzione) sia per la facilità di trasformarla in altre forme di energia estremamente utili per rendere più confortevole la nostra vita. Per esempio, può essere trasformata in *energia luminosa* tramite lampade a incandescenza o fluorescenti, oppure di nuovo in *energia termica* scaldando una resistenza, come avviene in un forno o nella stufetta elettrica, o nuovamente in *energia meccanica* attraverso i motori che fanno funzionare treni, metropolitane, ascensori o semplicemente un ventilatore elettrico, i compressori di frigoriferi e condizionatori utilizzati a loro volta per produrre freddo per conservare i cibi e rinfrescare ambienti. Grazie agli altoparlanti dello stereo, l'energia elettrica mette in moto una membrana trasformandosi così in *energia sonora*. Possiamo trasformare l'energia elettrica nuovamente in energia chimica per caricare gli accumulatori che alimentano per esempio i nostri telefonini, i computer portatili o le auto elettriche. Da ultimo, ma sempre più importante nella nostra società, possiamo utilizzare l'energia elettrica come vettore dell'informazione, perché essa è alla base di tutto il settore ICT (*Information and Communication Technologies*), dalla televisione, ai cellulari, ai computer, a Internet.

Anche se ormai non ci facciamo più caso o se addirittura non ce ne rendiamo neppure conto, da questi semplici esempi si comprende bene come la nostra vita sia caratterizzata quotidianamente da un'incessante trasformazione di energia da una forma all'altra (Tabella 1). Questo è il motivo per cui, invece che "produzione di energia", un'espressione entrata a far parte del linguaggio comune, in fisica sarebbe tecnicamente più corretto parlare di "trasformazione", secondo il principio di conservazione dell'energia.

Uno dei processi di trasformazione più noto e certamente uno dei più importanti è quello che riguarda la conversione dell'energia chimica dei combustibili a base di carbonio in energia termica e meccanica. Quest'ultima viene poi trasformata in energia elettrica mediante generatori o utilizzata direttamente per il trasporto di persone e merci, attraverso i motori a combustione interna. L'energia contenuta nei legami chimici del combustibile è trasformata, attraverso un processo fortemente esotermico (la combustione appunto, che lega il carbonio con l'ossigeno atmosferico formando biossido



*Tabella 1. – Principali processi e tecnologie caratterizzanti la trasformazione dell'energia (rielaborato da V. Smil, Storia dell'Energia, 2000)*

a da	Radiazione elettro- magnetica	Chimica	Termica	Cinetica	Nucleare	Elettrica
<b>Radiazione elettro-magnetica</b>	Fotosintesi	Assorbimento energia solare				Pile solari
<b>Chimica</b>	Chemi- luminescenza	Processi chimici	Combustione	Metabolismo animale		Pile a combustibile e batterie
<b>Termica</b>	Radiazioni termiche	Distillazione	Scambio di calore	Dilatazione, combustione interna	Innesco reazione bombe nucleari	Termo-elettricità
<b>Cinetica</b>	Decadimento beta con emissione di fotoni	Dissociazione radiolitica	Attrito	Ingranaggi e manovellismi		Generatori elettrici
<b>Nucleare</b>	Esplosione bombe nucleari		Fissione e fusione	Onda d'urto bombe nucleari		Batterie nucleari
<b>Elettrica</b>	Radiazioni elettro-magnetiche	Elettrolisi	Resistenze per il riscaldamento	Motori elettrici		



di carbonio, detto anche anidride carbonica), in energia meccanica: per esempio, nel moto alternativo dei pistoni che attiva una serie di cinematismi (come la biella a manovella, il cambio e altri ingranaggi) che ci permettono di lanciare un mezzo alla velocità desiderata e di guidarlo, grazie allo sterzo, dove vogliamo. Si noti che, sebbene la potenza dei motori a combustione interna sia enormemente superiore a quella che un uomo è in grado di sviluppare con i propri muscoli – consentendoci così di trasportare carichi enormi a grandi distanze e a elevata velocità – i motori utilizzati nei trasporti sono generalmente assai poco efficienti: infatti, solo una parte molto ridotta dell'energia chimica contenuta nella benzina si trasforma in energia meccanica di movimento, tutto il resto diventa calore che si disperde nell'ambiente attraverso il sistema di raffreddamento (il radiatore dell'auto) e i gas di scarico (cosa di cui si sarà accorto chi ha appoggiato malauguratamente la gamba sul tubo di scappamento di una moto accesa).

## 2. L'efficienza dei processi di trasformazione

La produzione di calore e di composti chimici di scarto è un elemento caratteristico della maggior parte dei processi di trasformazione dell'energia: anche se l'energia complessiva in un sistema chiuso si conserva, una parte più o meno rilevante viene inevitabilmente perduta sotto forma di calore che deve essere ceduto a una sorgente fredda per questioni puramente termodinamiche o perché è generato dall'attrito delle componenti meccaniche e dalle inefficienze dei sistemi di trasmissione ecc. Solo una parte del calore prodotto nei processi di trasformazione può essere recuperato in qualche modo (per esempio, per scaldare l'abitacolo di un'auto, oppure per fare teleriscaldamento nel caso degli impianti di termovalorizzazione dei rifiuti), tutto il resto è energia sprecata in quanto non viene utilizzata per compiere lavoro. Possiamo quindi vedere un sistema di conversione dell'energia secondo lo schema della Figura 1.

Ovviamente, maggiore è la quota di energia resa utilizzabile dalla conversione, meglio è, in quanto produrre energia costa, da un punto di vista economico, come tutti sanno, ma anche da quello ambientale, come mostreremo diffusamente nei capitoli successivi. Il problema, perciò, è di progettare tecnologie in grado di convertire l'energia in modo efficiente minimizzando le perdite.



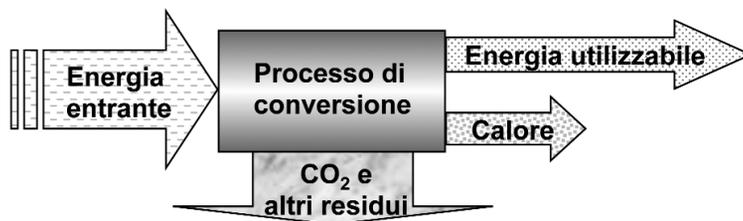


Figura 1. Schema generale di un processo di conversione dell'energia.

Un parametro fondamentale utilizzato per caratterizzare i processi di trasformazione di energia è il rapporto fra l'energia immessa nel sistema e quella effettivamente utilizzabile a valle del sistema stesso, rapporto che è chiamato “rendimento” o “efficienza”. Questo parametro, spesso indicato con la lettera greca  $\eta$  (eta) è calcolabile come:  $\eta = \text{energia in uscita} / \text{energia in ingresso al sistema di conversione}$ .

Si valuta cioè quanto si può ricavare dal sistema di conversione rispetto a quanto s'immette nel sistema stesso. È ovvio che il sistema funziona tanto meglio quanto più questo rapporto è prossimo a 1, e che in molti casi d'interesse pratico la forma con cui si ottiene l'energia in uscita è diversa da quella dell'energia in ingresso.

I rendimenti di conversione di una serie di processi di trasformazione dell'energia sono riportati nella Tabella 2. Come si vede, nella maggior parte dei casi i rendimenti sono alti solo nei processi di trasformazione in cui il fine ultimo è quello di produrre calore, altrimenti le efficienze possono essere piuttosto basse. Per esempio, nel caso delle lampadine a incandescenza (che l'Unione Europea ha giustamente deciso di bandire in modo progressivo a partire da settembre 2009 cominciando da quelle da 100 Watt) oltre il 90% dell'energia elettrica viene in verità disperso in calore e solo il 10% è effettivamente utilizzato per produrre luce. Il rendimento energetico delle lampade fredde a led è invece decisamente più elevato e raggiunge in alcuni casi anche il 60%.

In generale, tutta l'energia meccanica può essere trasformata in energia termica, mentre non è vero il contrario. Non è quindi possibile, nemmeno in linea teorica, realizzare una macchina termica il cui rendimento sia pari al 100%, cosa che, fra l'altro, sancisce l'impossibilità di realizzare il moto perpetuo.

Si noti che misurare l'energia in uscita è in genere relativamente semplice perché si tratta del “prodotto” a cui siamo interessati: per

*Tabella 2. – Rendimenti energetici di alcuni processi di trasformazione dell'energia*

<b>Dispositivo</b>	<b>Trasformazione energia</b>	<b>Rendimento</b>
Motore a vapore	da termica a meccanica	15-25%
Motore a scoppio	da chimica a meccanica	20-30%
Brucciato a gas	da chimica a termica	30-40%
Ferro da stiro	da elettrica a termica	90-95%
Accumulatore	da elettrica a chimica	70-75%
Pila	da chimica a elettrica	60-70%
Dinamo	da meccanica a elettrica	90-92%
Motore elettrico	da elettrica a meccanica	85-90%
Centrali elettriche a olio combustibile	da chimica a elettrica	35-40%
Centrali a turbogas a cicli combinati	da chimica a elettrica	55-65%
Centrali elettriche a carbone	da chimica a elettrica	35-40%
Fotosintesi	da solare a biomassa	0,5%
Fotovoltaico	da solare a elettrica	6-15%
Lampade a incandescenza	da elettrica a luminosa	<10%
Lampade a led	da elettrica a luminosa	47-64%

esempio, il chilowattora di energia elettrica disponibile per i nostri elettrodomestici.

Più problematico è definire esattamente che cosa intendiamo per “energia in ingresso”. Possiamo, infatti, considerare come tale l'energia immagazzinata nel combustibile già disponibile nel tempo e nel luogo in cui deve avvenire la conversione. Per esempio, se pensiamo ai motori a combustione interna utilizzati nei trasporti, possiamo considerare come energia in ingresso semplicemente quella della benzina contenuta nel serbatoio di una macchina; nel caso di produzione di calore per teleriscaldamento con un impianto a biomasse, si può calcolare il rendimento energetico a partire dall'energia contenuta nelle biomasse nel momento in cui vengono immesse nella caldaia di combustione; nel caso di produzione di energia elettrica con un impianto nucleare, si può considerare l'energia contenuta nel materiale fissile, ovvero l'uranio arricchito presente nell'impianto.

In alternativa, l'energia in ingresso può essere calcolata tenendo conto di tutta la filiera di produzione del combustibile, vale a dire prendendo in considerazione anche quanta energia è stata necessaria per

l'estrazione, il trattamento e il trasporto del combustibile. Per esempio, nel caso della benzina è possibile considerare i costi energetici (ed economici) per l'estrazione del petrolio, il trasporto alla raffineria, i processi di raffinazione e quelli di distribuzione. Nel caso delle biomasse per uso energetico, andrebbe calcolato anche il costo energetico sostenuto per la produzione delle biomasse stesse: per arare il terreno, seminare, fertilizzare, irrigare, tagliare, raccogliere e trasportare la materia vegetale così prodotta fino alla centrale. Nel caso del nucleare si possono considerare anche i costi necessari all'estrazione dell'uranio nelle miniere e quelli di trasporto e arricchimento.

Anche quando si considerano tutti questi aspetti, in generale il rendimento è tanto più elevato quanto maggiore è l'energia del combustibile rispetto all'energia necessaria per la sua estrazione e trasporto. Nel caso dell'energia eolica, solare o idroelettrica, le fonti energetiche sono immediatamente disponibili e quindi i costi energetici per l'approvvigionamento sono praticamente nulli. In questo caso, però, come del resto nei precedenti, è possibile valutare l'efficienza energetica andando a calcolare l'energia impiegata per realizzare e poi dismettere, al termine della vita utile, l'impianto e i materiali che lo compongono: per esempio, il generatore eolico, i pannelli fotovoltaici, la diga e l'impianto idroelettrico. Anche in questo caso perciò è applicabile lo schema della Figura 1, così come l'energia utilizzabile è accompagnata da una produzione di calore (gli attriti) e di residui potenzialmente inquinanti.

Per misurare la resa energetica di tutta la catena di approvvigionamento di un combustibile sono state proposte varie metodologie che permettono di calcolare coefficienti come il "ritorno energetico sull'investimento" (in inglese *Energy Return on Investment*, EROI). Questo indice è calcolato come rapporto fra l'energia ricavata da un impianto o con una certa tecnologia (escluso quindi il calore di scarto) e tutta l'energia spesa per arrivare al suo ottenimento. In pratica, è utile per confrontare diverse tecnologie o stimare quanta energia viene ricavata da un impianto nella sua vita media rispetto a quella impiegata per costruirlo e mantenerlo. Per esempio, se una fonte energetica ha un EROI inferiore a 1 significa che è energeticamente in perdita, in altri termini che si spende più energia di quanta se ne ricavi. Al contrario, tanto maggiore sarà l'EROI, tanto più elevata sarà la convenienza dello sfruttamento di una certa fonte di energia: per esempio, alcuni ricercatori hanno calcolato che nella prima metà del '900, il petrolio aveva un EROI compreso fra 50 e oltre 100, ov-

vero che per ogni unità di energia impegnata per estrarlo dai primi grandi giacimenti se ne potevano ricavare anche più di 100.

Il calcolo dell'EROI è piuttosto complesso, in quanto è necessario studiare la catena di produzione del combustibile lungo tutto il suo ciclo di vita e considerare accuratamente le eventuali specificità di ogni particolare fonte, tecnologia e localizzazione dell'impianto o dei giacimenti estrattivi. Per esempio, nel caso dei combustibili fossili e dell'uranio, l'EROI può cambiare sensibilmente da sito a sito (ci sono giacimenti da cui è molto facile estrarre petrolio o carbone, come i grandi giacimenti presenti in Medio Oriente, altri da cui invece è molto difficile, come le sabbie bituminose in Canada). Inoltre, l'EROI può cambiare nel tempo in funzione sia delle tecnologie che man mano si rendono disponibili, sia del livello di sfruttamento di un giacimento: via via che si estrae petrolio, infatti, risulta sempre più oneroso estrarre il petrolio rimanente. L'utilizzazione di tecniche come l'iniezione di gas o acqua aumentano il cosiddetto "fattore di produzione" (ovvero la quantità di petrolio effettivamente estraibile da un giacimento), ma comportano una crescita del consumo energetico per l'estrazione (al quale corrisponde sempre un aumento dei costi): questo fa diminuire l'EROI. Benché caratterizzato da un certo grado di soggettività e incertezza, il calcolo dell'EROI può mettere in luce alcuni aspetti interessanti, come mostra uno studio condotto nel 2006 dall'Università di Sidney (si veda la Tabella 3): per esempio, in termini di EROI, le turbine eoliche e i piccoli impianti idroelettrici risultano molto più vantaggiosi rispetto al nucleare e al fotovoltaico.

*Tabella 3. – Calcolo del ritorno energetico sull'investimento (EROI) per alcune tecnologie di produzione di energia elettrica. Fra parentesi l'intervallo minimo-massimo dell'EROI.*

<b>Tecnologia</b>	<b>EROI</b>
Fotovoltaico	3,0 (1,5 - 6,2)
Nucleare, acqua pesante	5,0 (2,8 - 5,5)
Nucleare, acqua leggera	5,5 (2,5 - 6,2)
Turbine eoliche	15,1 (8,3 - 24)
Mini-idroelettrico	21,7 (7,3 - 50)

**Fonte:** Università di Sidney, *Life-Cycle Energy Balance and Greenhouse Gas Emissions of Nuclear Energy in Australia*, 2006.



### 3. Classificazione delle fonti energetiche

Come abbiamo visto, l'energia si trova dappertutto, ma solo una piccola parte è effettivamente disponibile per essere recuperata, trasformata, trasportata e utilizzata con le tecnologie oggi disponibili. In fondo, la materia stessa è una forma estremamente condensata di energia, come ha dimostrato Albert Einstein con la celebre equazione  $E = mc^2$ , secondo cui una certa massa  $m$  di materia può liberare un'energia  $E$  pari al prodotto della massa medesima per la velocità della luce  $c$  al quadrato. Tuttavia, solo in condizioni particolarissime e con particolari tecnologie riusciamo a sfruttare questa enorme potenzialità.

#### 3.1 Le fonti primarie

Quella piccola parte di energia effettivamente sfruttabile dall'uomo con le tecnologie attuali è contenuta nelle cosiddette *fonti primarie*. Una fonte di energia è definita primaria quando è presente in natura e quindi non deriva dalla trasformazione da parte dell'uomo di nessuna altra forma di energia. Rientrano in questa categoria i combustibili direttamente utilizzabili (petrolio grezzo, gas naturale, carbone), l'energia nucleare, l'energia del sole, del vento, dell'acqua e delle biomasse. D'altra parte, la stessa parola "fonte", benché usatissima, non è appropriata dal punto di vista fisico: non c'è nulla che generi energia dal nulla! Essa va intesa semplicemente in riferimento all'uomo (e alle sue tecnologie) e quindi alle nostre capacità di conversione. Cento anni fa l'uranio non sarebbe stato considerato una fonte di energia e duecento anni fa nemmeno il gas naturale.

Tra le fonti primarie, quelle più utilizzate sono i combustibili fossili. Quelli solidi, le cui caratteristiche sono riassunte nella Tabella 4, derivano dalla carbonizzazione di biomasse legnose e per questo hanno contenuti di carbonio che variano dal 50% per i carboni più recenti a oltre il 90% per quelli più antichi.

Anche il petrolio si è formato in tempi geologici in seguito all'alterazione termica di depositi di materiale organico accumulatosi in diverse migliaia d'anni e ricoperto successivamente da strati impermeabili che ne hanno impedito la fuoriuscita e dispersione nell'ambiente. Il petrolio è un liquido denso, vischioso, dall'odore caratteristico e di colore variante da giallo-bruno a nerastro, costituito principalmente da una miscela di idrocarburi naturali liquidi (olio) e, in



Tabella 4. – I principali combustibili solidi derivati da biomasse legnose

<b>Torba</b>	carbonizzazione di vegetali erbacei, mescolata con terriccio, nessun uso industriale
<b>Lignite</b>	carbonizzazione di piante ad alto fusto
<b>Litantrace</b>	è il carbon fossile, bassa umidità, basso tenore di ceneri, viene distillato per produrre coke e gas combustibili
<b>Antracite</b>	termine estremo del processo di carbonizzazione, basso tenore di sostanze volatili, difficoltà all'innesco, uso domestico per riscaldamento
<b>Coke</b>	porzione di litantrace solida dopo riscaldamento a 900-1000 °C in assenza di aria, pregiato se poco poroso e resistente a compressione, è utilizzato in altoforno

proporzione minore, gassosi (gas naturale) e solidi (bitumi e asfalti). Si concentra in bacini sedimentari, all'interno di rocce porose, dove è presente in gocce invisibili a occhio nudo. In genere in queste rocce si ritrovano gas, petrolio e acqua distribuiti secondo la loro densità: il gas, più leggero, negli strati più alti bloccato dagli strati impermeabili; sotto, il petrolio; e alla base, l'acqua, più pesante. La composizione del petrolio può variare sensibilmente a seconda del giacimento e si usa distinguere fra oli pesanti (minore di 26° API, una scala fissata dall'American Petroleum Institute, in sigla appunto API), medi (scala API compresa fra 26° e 34°) e leggeri (sopra i 34°), i più pregiati. Un altro parametro importante per la caratterizzazione del greggio è il contenuto di zolfo: il greggio viene detto *sweet* (dolce) quando il contenuto di zolfo è inferiore allo 0,5% in volume, e *medium sour* e *sour* (acido) rispettivamente quando il contenuto di zolfo è compreso fra lo 0,5% e l'1,5% o superiore. I greggi a basso contenuto di zolfo sono di maggior valore perché se ne possono ottenere derivati più pregiati nei processi di raffinazione (Tabella 5). Il gas naturale è una miscela di vari gas fra cui principalmente metano (fra il 70 e 90%) ed etano, butano, propano e pentano, tutti composti più o meno complessi del carbonio. Agli inizi è stato considerato una iattura dai petrolieri quando usciva dai pozzi e solo nella seconda metà del '900 si è cominciato a sfruttarlo commercialmente grazie allo sviluppo di tecnologie per la compressione e il trasporto. Nel caso dell'energia nucleare si distingue fra fusione e fissione. Il processo di fusione nucleare è quello che alimenta le stelle e, in par-

*Tabella 5. – I principali combustibili liquidi derivati del petrolio*

<b>Benzina</b>	prima frazione di distillazione (Temperatura di ebollizione = 30-200 °C), miscela di idrocarburi con 4-12 atomi di C, alta volatilità, elevato potere antidetonante
<b>Cherosene</b>	seconda frazione di distillazione (T.eb. = 150-280 °C), densità più elevata della benzina, bassa volatilità, usato per alimentazione di motori a turbina, riscaldamento
<b>Gasolio</b>	terza frazione di distillazione (T.eb. = 250-350 °C), usato per motori diesel, elevata tendenza all'accensione spontanea
<b>Oli combustibili</b>	residui della distillazione, viscosità variabile, ma piuttosto elevata

ticolare, il Sole: sotto l'effetto di enormi pressioni e temperature, nuclei di atomi leggeri – tipicamente isotopi di idrogeno, deuterio e trizio – si uniscono in un nucleo più pesante. In questo tipo di reazione il nuovo nucleo costituitosi e il neutrone liberato hanno una massa totale leggermente inferiore (circa l'1%) della somma delle masse dei nuclei reagenti con conseguente liberazione di un'elevata quantità di energia (secondo la già citata legge  $E = mc^2$ ) che conferisce al processo caratteristiche fortemente esotermiche. La reazione incontrollata di fusione nucleare è stata già utilizzata nella cosiddetta "bomba H"; sulla fusione controllata si sta lavorando da decenni, purtroppo non è stato ancora raggiunto alcun risultato di pur minimo interesse pratico, a causa di una serie di ragioni di carattere tecnico fra cui la difficoltà di raggiungere e mantenere le enormi temperature necessarie (oltre 10 milioni di gradi) per innescare la fusione.

Nella fissione nucleare (il processo che alimenta le attuali centrali nucleari per la produzione di energia) il nucleo di atomi pesanti è scisso tramite il bombardamento con neutroni o altre particelle elementari in frammenti. La somma della massa dei nuclei e delle altre particelle formatasi nella reazione è inferiore a quella del nucleo iniziale e del neutrone utilizzato per bombardarlo (di circa lo 0,1%), con conseguente liberazione di energia. Dal momento che nella reazione di fissione si liberano altri neutroni, se la massa di materiale fissile è sufficientemente alta (se cioè si raggiunge la massa critica) si innesca una reazione a catena che può essere controllata come nelle centrali nucleari o incontrollata come nelle bombe atomiche sganciate nell'agosto del 1945 su Hiroshima e Nagasaki.

### 3.2 Le fonti secondarie

Le fonti secondarie sono quelle che possono essere utilizzate solo a valle di una trasformazione di energia. La benzina e il gasolio utilizzati nei trasporti vengono per esempio prodotti tramite raffinazione del petrolio. L'energia elettrica prodotta tramite centrali termiche alimentate con combustibili fossili è tipicamente una fonte di energia secondaria.

Il fatto che le fonti primarie siano disponibili in natura non significa che non siano necessari interventi più o meno rilevanti per poterle sfruttare commercialmente. Le sabbie bituminose del Canada, per esempio, richiedono speciali tecnologie facenti uso di vapore o solventi (e quindi energeticamente costose) per ricavare petrolio. Anche l'estrazione di petrolio in mare (*offshore*) o tramite iniezione di acqua o gas può richiedere un notevole investimento energetico. Questo è vero anche nel caso della produzione di uranio. Quello utilizzabile negli impianti di fissione nucleare è solo l'uranio con 235 neutroni (indicato quindi come  $U^{235}$ ), che si trova in concentrazioni molto inferiori al più comune e meno radioattivo isotopo  $U^{238}$  (detto isotopo perché ha lo stesso numero di protoni dell' $U^{235}$ , ma un maggior numero di neutroni). Per passare da una concentrazione media in natura di uranio 235 dello 0,7% a quella del 3%, necessaria per far funzionare impianti nucleari ad acqua leggera, è necessario sottoporre il minerale a un processo di arricchimento energeticamente molto costoso perché, essendo i due isotopi dello stesso elemento, non è possibile separarli per via chimica ma per diffusione o centrifugazione utilizzando la piccolissima differenza in peso (meno dell'1,5%).

Il plutonio 239, utilizzato come materiale fissile nelle centrali autofertilizzanti, non esiste in natura e quindi va classificato come fonte secondaria.

### 3.3 Fonti rinnovabili e non rinnovabili

Le fonti primarie possono poi essere classificate come *fonti rinnovabili* e *fonti non rinnovabili* (o *esauribili*). Queste ultime sono notoriamente petrolio, gas e carbone, dal momento che la loro genesi naturale richiede tempi geologici. Anche l'uranio non è una fonte rinnovabile. Al contrario, solare, idroelettrico, eolico, geotermico e l'energia delle maree e del moto ondoso sono risorse rinnovabili, perché si rigenerano in continuazione tramite fenomeni naturali. Questo è vero anche per l'energia ricavata dalle biomasse, seb-



bene queste ultime, pur rinnovabili, siano potenzialmente esauribili quando il tasso di sfruttamento è sistematicamente superiore a quello di rigenerazione. Per parte sua, l'idroelettrico è soggetto alla variabilità (e ai cambiamenti) del clima: benché il ciclo dell'acqua, alimentato dall'energia del sole, sia certamente inesauribile, tuttavia un bacino idroelettrico mal sfruttato può diventare temporaneamente improduttivo. Al contrario, sole, vento, maree, moto ondoso e calore della Terra possono essere considerate fonti sostanzialmente inesauribili (per quanto la convenienza del loro sfruttamento da un punto di vista commerciale dipenda da specifiche condizioni locali).

A parte l'energia geotermica o quella prodotta con centrali nucleari, tutte le altre fonti di energia primaria sono direttamente o indirettamente alimentate dal Sole. I combustibili fossili si sono formati principalmente milioni di anni fa in processi geologici che hanno operato su immensi depositi di biomassa vegetale morta, prodotta a sua volta attraverso la fotosintesi clorofilliana che utilizza l'energia solare. Il vento è un movimento di masse d'aria generato da gradienti (variazioni) di pressione e temperatura originati dall'irraggiamento del Sole. Solare fotovoltaico e termico ricevono energia direttamente dal Sole. L'energia geotermica è dovuta in parte al decadimento di alcuni elementi radioattivi, fra cui l'uranio, e in parte dai lenti processi di raffreddamento del nucleo del pianeta che risalgono alla genesi della Terra.



#### 4. Le unità di misura

Ci sono diversi modi di misurare l'energia: nel Sistema Internazionale (SI) si utilizza il Joule (J), che esprime il lavoro richiesto per esercitare una forza di 1 newton per una distanza di 1 m. In pratica, il Joule corrisponde al lavoro richiesto per sollevare una massa di 102 g (la dimensione di una piccola mela) per 1 m in altezza opponendosi alla forza di gravità terrestre. Un altro modo di misurare l'energia, soprattutto quella termica, è la caloria (o piccola caloria, simbolo cal), la quantità di calore necessaria a elevare da 14,5 a 15,5 °C la temperatura di 1 g di acqua distillata a livello del mare (pressione di 1 atmosfera). In genere si assume che  $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$ . In biologia e nelle scienze della nutrizione, si utilizza invece la grande caloria (Cal o kcal), equivalente a 1000 calorie, per determinare l'apporto energetico di un alimento, o il consumo energetico di una persona che compie un determinato lavoro.



Nel mondo anglosassone si utilizzano poi altre unità di misura, come la BTU (British Thermal Unit), equivalente approssimativamente a 252 calorie.

Anche per misurare la potenza, cioè il lavoro compiuto nell'unità di tempo, ci sono diversi modi come illustrato in Tabella 6. Nel Sistema Internazionale si usa il Watt (W), corrispondente al lavoro di 1 J esercitato in 1 sec. Una tipica centrale termoelettrica a turbogas a ciclo combinato ha, per esempio, una potenza di 400-500 MW (MegaWatt), se di taglia media, o di 800-1000 MW (o anche superiore) se di taglia più grande.

Nel caso dell'eolico e del solare si fa normalmente riferimento alla potenza massima del generatore, anche se a causa della natura fortemente intermittente del Sole e del vento, la potenza mediamente realizzabile è molto al di sotto della massima dichiarata e varia naturalmente da sito a sito.

Un'unità di misura storica della potenza progressivamente in disuso, ma di cui si sente ancora parlare, è il cavallo vapore (CV) o, in inglese, *Horse Power* (HP). Anche in questo caso esiste più di una definizione: il cavallo vapore britannico (HP) fu usato per la prima volta da James Watt ed è definito come la forza prodotta da un cavallo che solleva 33.000 libbre (la libbra corrisponde a circa 0,45 kg) con la velocità di 1 piede al minuto (il piede corrisponde a 30,48 cm). Pertanto:

$$1 \text{ HP} = 33.000 \text{ libbre} \cdot 1 \text{ piede/min} = 745,7 \text{ W}$$

Approssimativamente equivale al sollevamento (alle nostre latitudini) di 75 kg alla velocità di 1 metro al secondo. Il cavallo vapore europeo (CV), ancora molto diffuso in Europa, ha un valore leggermente diverso: 735,5 W (pari a 0,9863 HP).

*Tabella 6. – Equivalenza di alcune unità di misura della potenza*

1 W = 1 J/s
1 cavallo vapore (CV) = 75 kgm/s = 735,5 W
1 kilowatt (kW) = 1000 W = 1,36 CV
1 HP = 0,746 kW

Come vedremo nei capitoli successivi, gli impianti di produzione di energia sono caratterizzati generalmente in base sia alla potenza, sia

all'energia mediamente prodotta nel corso di un anno in condizioni di funzionamento normale, tenendo conto cioè dei normali periodi d'interruzione della produzione per manutenzione ordinaria. L'energia prodotta in un dato periodo di funzionamento di una centrale viene di solito misurata in wattora (Wh), cioè la potenza di 1 Watt generata per 1 ora, o in suoi multipli, tenendo conto dei seguenti coefficienti medi di conversione:

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ Wh} = 860 \text{ kcal} = 3.600.000 \text{ J}$$

Varie unità di misura sono utilizzate anche per caratterizzare le fonti di energia. Per i combustibili fossili si utilizzano unità fisiche come la tonnellata per petrolio e carbone, i metri cubi per il gas, il litro per benzina e gasolio. Un'unità di misura ancora oggi molto utilizzata per il petrolio è il barile di greggio, corrispondente a 159 litri (circa 139 kg, un valore piuttosto variabile in funzione della densità del greggio, ovvero del grado API).

Le unità di misura fisiche, però, rendono molto difficili i confronti della disponibilità energetica di fonti così differenti fra loro come il gas ( $\text{m}^3$ ), il carbone (t) e il petrolio (barili). Per superare questa limitazione è meglio ricorrere al loro contenuto di energia o calore: a questo scopo si utilizza la tonnellata equivalente di petrolio (tep), in inglese *Tonne of Oil Equivalent* (toe). Una tep rappresenta la quantità di energia rilasciata dalla combustione di 1 t di petrolio grezzo e vale, secondo la definizione dell'Agenzia Internazionale per l'Energia, 41,87 GJ (gigajoule, cioè miliardi di Joule) o 11,63 MWh (megawattora, cioè milioni di wattora). Assumendo che il petrolio fornisca circa 10.000 chilocalorie (kcal) per ogni chilogrammo, 1 tep corrisponde a 10 milioni kcal. Il valore è fissato convenzionalmente, dato che esistono diverse varietà di petrolio a diverso contenuto energetico e le convenzioni attualmente in uso sono più di una. Per misurare grandi quantità di energia (per esempio il fabbisogno energetico di una nazione o dell'intero pianeta) sono utilizzati spesso i multipli del tep, ovvero il Mtep (megatep, milioni di tep) e il Gtep (gigatep, miliardi di tep).

## 5. I criteri di valutazione delle fonti energetiche

Oltre al rendimento energetico, esiste naturalmente una serie di altri criteri molto rilevanti che concorrono a caratterizzare le fonti energetiche: fra queste, per esempio, la continuità della fornitura, la

facilità di trasporto, la possibilità di stoccaggio, la densità energetica e la densità di potenza, l'impatto ambientale e, certamente non ultimo, il prezzo di mercato delle risorse energetiche. Questo è ovviamente influenzato dalle dinamiche fra domanda e offerta e risente fortemente della situazione politico-sociale (come nel caso delle crisi petrolifere degli anni '70) e delle previsioni, aspettative e speculazioni (anche di natura puramente finanziaria) sulla disponibilità futura delle risorse, come sarà discusso nel capitolo "Domanda e offerta di energia".

### 5.1 La densità energetica

La densità energetica indica semplicemente quanta energia si può produrre da una specifica unità (in volume o in massa) di un certo combustibile. Per esempio, la densità energetica di 1 kg di legna è circa 3 volte inferiore a quella di 1 kg di antracite, non a caso il migliore dei carboni (Tabella 7). Quindi abbiamo bisogno di circa 3 kg di legna per sviluppare lo stesso calore di 1 kg di buon carbone. Si noti che il tep è una misura di densità energetica normalizzata rispetto al potere calorifico di una tonnellata di petrolio.

*Tabella 7. – La composizione chimica e la densità energetica di legna e carbone. La densità energetica è espressa come potere calorifico inferiore medio (PC), ovvero la quantità di calore che si può ricavare da 1 kg di combustibile.*

Sostanza	% C	% H	% O	% N	% S	% ceneri	PC (kcal/kg)
Legna	50-54	6-6,5	43,5-44	0,3-0,5	0	0,5-1,2	2.500-4.500
Torba	50-60	5,5-6,5	30-48	0,8-3	0,1-0,2	3-25	3.000-4.500
Lignite	60-75	5-6	20-45	0,7-2	1-12	3-8	4.000-6.200
Litantrace	75-90	4,5-5,5	5-15	0,7-2	0,5-4	0,5-4	7.600-9.000
Antracite	92-95	2-2,5	3	0,5-1	0,5-2	0,5-2	8.300-9.000

La densità energetica di 1 kg del butano è poco più di un terzo di quella di 1 kg di idrogeno, ma quest'ultimo ha una densità energetica per unità di volume che è dieci volte inferiore a quelle del propano e butano (Tabella 8) che, non a caso, sono più facili da liquefare dell'idrogeno. Data la variabilità molto elevata del potere calorifico di molti combustibili, i più utilizzati sono stati definiti convenzionalmente, come illustrato nella Tabella 9.

Tabella 8. – *La densità energetica di alcuni combustibili liquidi e gassosi*

Combustibile	MJ/volume	kcal/massa
Gasolio	41 MJ/l	9.799 kcal/kg
Benzina	44 MJ/l	10.031 kcal/kg
Alcol etilico	22 MJ/l	6.479 kcal/kg
Propano	99 MJ/Nm <sup>3</sup>	11.796 kcal/kg
Butano	125 MJ/Nm <sup>3</sup>	10.984 kcal/kg
Metano	36 MJ/Nm <sup>3</sup>	11.940 kcal/kg
Idrogeno	11 MJ/Nm <sup>3</sup>	28.567 kcal/kg

Il volume è espresso in litri (l) o normal m<sup>3</sup> (Nm<sup>3</sup>) a pressione atmosferica standard e a 15 °C.

Tabella 9. – *Poteri calorifici di alcuni combustibili (fissati per convenzione dalla norma internazionale UNI 10389)*

Gas naturale	8.250 kcal/m <sup>3</sup> (a press. atm. standard e a 15 °C)
Gas di petrolio liquefatto (GPL)	27.000 kcal/m <sup>3</sup> (a press. atm. standard e a 15 °C)
Gasolio	10.210 kcal/kg
Olio combustibile	9.870 kcal/kg

L'uranio naturale è certamente la fonte con la maggiore densità energetica in assoluto (stimata in 418,7 GJ/kg, pur con metodi di conversione completamente diversi); per comprenderne le implicazioni, ci rifacciamo a un semplice e istruttivo esempio presentato chiaramente da Leonardo Maugeri nel libro *Con tutta l'energia possibile* (2008): si supponga di voler realizzare una centrale termoelettrica di 1 GW. Se sarà di tipo termonucleare necessiterà in prima approssimazione di circa 30 t di uranio arricchito all'anno, che possono essere, in linea teorica, contenute in un spazio limitato, equivalente a un vagone ferroviario; una centrale a olio combustibile della stessa potenza richiede invece 1.500.000 t di combustibile stivabili in circa 28.000 vagoni, mentre un'analogia centrale a carbone richiederebbe 2 milioni t di minerale trasportabili in 48.000 carri ferroviari.

### *5.2 I punti di forza e di debolezza delle fonti d'energia*

Va ricordato che il nucleare richiede impianti molto grandi e può contribuire a soddisfare solo la domanda di energia elettrica, che nei trasporti è utilizzata per ora solo da grandi navi o sommergibili e dagli impianti fissi che alimentano i motori elettrici di treni, tranvie e metropolitane. Alcuni derivati del petrolio – in particolare benzina, gasolio e cherosene per l'aviazione civile e militare – si sono imposti come i combustibili di elezione del trasporto di massa, essendo caratterizzati da un'alta densità energetica (sia in massa, sia in volume) e da una grande facilità di stoccaggio e trasporto. Solo oggi, grazie all'innovazione tecnologica, si cominciano a sperimentare nuovi biocombustibili derivati per esempio dalla alghe, ma per il momento non ci sono alternative al cherosene per far decollare aerei come il Boeing 747 o l'Airbus 380 che, con 500 passeggeri più bagagli, possono percorrere oltre 10.000 km senza scalo.

Nell'ambito automobilistico, metano e gas di petrolio liquefatto (GPL) sono ormai sempre più utilizzati grazie al costo inferiore a quello della benzina e al loro basso impatto ambientale in termini di emissioni inquinanti. Tuttavia i problemi legati all'immagazzinamento e al trasporto ne hanno limitato a lungo la diffusione: infatti, a causa della loro bassissima densità energetica per unità di volume, per garantire una ragionevole autonomia al mezzo, devono essere liquefatti e mantenuti ad alta pressione; per il GPL bastano 8-10 atmosfere, mentre il metano ne richiede circa 200. Perciò il metano ha necessità di bombole robuste e molto pesanti in acciaio o in costosi materiali compositi (e anche così l'energia immagazzinabile è pari a circa la metà rispetto a quella ottenibile dallo stesso volume di benzina); in teoria è possibile portare il metano allo stato liquido e a pressioni molto più basse, ma sarebbe necessario raffreddarlo fino a una temperatura di  $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ , il che implica difficoltà tecniche anche superiori.

I problemi di compressione e stoccaggio sono ancora maggiori nel caso dell'idrogeno, il gas più difficile da liquefare dopo l'elio. Questo costituisce uno dei problemi principali alla sua diffusione su grande scala nei trasporti, oltre al problema della sua produzione, dal momento che l'idrogeno non esiste puro in natura.

L'elettricità, come dicevamo, si può trasportare rapidissimamente a grandi distanze (purché ad alto voltaggio e come corrente alternata, per ridurre al minimo le perdite di energia causate dalla resistenza elettrica dei cavi), ma non è facile stoccarla se non utilizzando accu-

mulatori costosi, voluminosi e potenzialmente inquinanti. Come vedremo nel capitolo “Le tecnologie per la produzione di energia”, questo è stato fino a oggi uno dei grandi problemi per la penetrazione sul mercato di tecnologie basate sul fotovoltaico o l’eolico, in quanto i picchi di produzione non corrispondono necessariamente a quelli della domanda.

Quello dell’intermittenza della fornitura rimane un problema fondamentale anche per il solare termico dal momento che il calore viene prodotto ovviamente durante le ore di forte irraggiamento, ma la domanda per riscaldamento è superiore nei mesi invernali, quando l’insolazione può diventare molto bassa, soprattutto alle alte latitudini.

Un problema di eolico e fotovoltaico rispetto al gas è legato alla densità di potenza, cioè alla potenza che è possibile generare per unità di superficie. Anche qui ci rifacciamo ad alcuni esempi illustrati nel citato testo di Maugeri: una centrale termoelettrica a turbogas a ciclo combinato da 500 MW occupa una superficie ben inferiore a 1 km<sup>2</sup>. Volendo costruire un parco eolico della stessa potenza sarebbe necessario disporre 100 pale da 5 MW su una superficie di oltre 45 km<sup>2</sup>. Se invece usassimo il fotovoltaico sarebbe necessario coprire di pannelli fra i 600 e i 1000 ettari di terreno, cioè fra i 6 e i 10 km<sup>2</sup>. Sia nel caso dell’eolico che del fotovoltaico, inoltre, si dovrebbe tener conto della natura intermittente di queste fonti dovuta alle variazioni stagionali e a quelle giornaliere legate alla variabilità atmosferica, e questo richiederebbe quindi spazi ancora maggiori per assicurare una potenza effettiva pari a quella desiderata.

Si comprende quindi come ogni fonte energetica e ogni tecnologia abbia punti di forza e punti di debolezza. Il carbone è la fonte più economica ma anche la più sporca e quella con maggior produzione di gas serra per kWh prodotto. Eolico e fotovoltaico sono caratterizzati in genere da bassa densità di potenza e intermittenza delle forniture, non sono comunque privi d’impatti ambientali e, almeno il fotovoltaico, costa decisamente di più del carbone. Il nucleare suscita una fortissima resistenza sociale, ha una serie di problemi irrisolti, come quello dello smaltimento delle scorie radioattive, che ne rendono indeterminati i costi di lungo periodo, e ha tempi di costruzione degli impianti dell’ordine della decina d’anni.

D’altro canto, la necessità di ridurre le emissioni di gas serra per limitare i danni dei cambiamenti climatici ci richiede di diminuire significativamente la nostra dipendenza dai combustibili fossili, ma questo difficilmente potrà avvenire se non si troveranno fonti o tec-



nologie che siano almeno minimamente competitive con quelle tradizionali da un punto di vista economico. Una volta esauritisi gli effetti della crisi economica mondiale iniziata nella seconda metà del 2008, le economie emergenti riprenderanno la loro crescita tumultuosa (che peraltro non si è mai arrestata neanche nei periodi più bui di questa crisi) e la diminuzione dello scarto fra i consumi mondiali di energia primaria e la capacità produttiva di petrolio e gas farà verosimilmente riprendere la corsa dei loro prezzi, riducendone così il vantaggio economico competitivo rispetto all'eolico e al solare. Ecco quindi che la determinazione della convenienza o meno dell'uso di una fonte piuttosto che di un'altra sta diventando sempre più complessa e dovrà tener conto di una molteplicità di fattori riguardanti non solo il costo attuale delle risorse, ma anche gli impatti ambientali e le previsioni su costi, disponibilità e domanda futura sia delle fonti convenzionali, sia di quelle alternative, come illustreremo nei capitoli successivi.







## STORIA DELL'ENERGIA

La ricerca di fonti energetiche economiche e facilmente reperibili è stata un elemento dominante della storia dell'umanità fin dai suoi albori. La stretta correlazione fra consumi energetici pro capite e ricchezza delle nazioni evidenziata dagli studi macroeconomici sugli ultimi decenni potrebbe addirittura portare a ritenere che la spiegazione di buona parte delle vicende storiche sia riconducibile al problema dello sfruttamento dell'energia. Spingersi fino a questo punto sarebbe certo semplicistico: la storia delle civiltà può essere compresa solo considerando anche una serie di fattori politici, dinamiche sociali, divisioni etniche e religiose, oltre che ambizioni personali, bramosia di ricchezza, desiderio di potenza, sete di conoscenza, passione e dedizione di molti uomini di scienza e molto altro ancora, in tante occasioni semplicemente il caso.

È tuttavia stupefacente constatare come anche piccoli miglioramenti nell'accesso o nello sfruttamento delle fonti energetiche abbiano spesso conferito un vantaggio competitivo schiacciante a quei popoli, gruppi o inventori che riuscivano a realizzarli prima degli altri. Del resto, nel passato molte guerre sono state motivate proprio dalla volontà di accaparrarsi il controllo delle risorse naturali e, fra queste, delle fonti energetiche. Ancora più impressionante è osservare come questo sia fondamentalmente vero anche oggi nel mondo globalizzato: la guerra del Golfo del 1990-91 e ancora quella dell'Iraq del 2003, l'invasione dell'Ossezia del 2008, la guerra civile che si sta consumando in Nigeria, perfino le scaramucce fra Ucraina e Russia sul prezzo del gas – con le minacce di blocco delle forniture che tanta preoccupazione hanno suscitato nel nostro Paese – hanno spesso in comune il problema del controllo dell'accesso delle fonti di energia. I problemi energetici che ci troviamo ad affrontare oggi – come la necessità di disporre di fonti economiche e sufficientemente abbondanti per soddisfare una domanda di energia sempre crescente, la riduzione della dipendenza energetica da fornitori esteri, il con-



trollo degli impatti ambientali e la lotta contro i cambiamenti climatici – hanno profonde radici nel passato.

## 1. Le trasformazioni energetiche alle origini della vita

Le prime forme di vita nacquero negli oceani primordiali circa 3,5 miliardi di anni fa. L'acqua, infatti, filtra naturalmente le radiazioni cosmiche come i raggi ultravioletti in grado di danneggiare irreparabilmente il codice genetico, il mattone fondamentale di qualsiasi forma di vita. I primi organismi erano probabilmente primitivi fermentatori che per nutrirsi utilizzavano semplici molecole organiche prodotte dalle reazioni chimiche innescate da fulmini ed energia solare. A un certo punto, probabilmente sotto la pressione selettiva di una riduzione delle risorse disponibili, alcuni organismi, invece che cercare cibo nell'ambiente, riuscirono a evolvere in modo di fabbricarselo da soli: utilizzando direttamente l'energia solare, grazie a un pigmento verde chiamato clorofilla, furono in grado di scomporre le molecole di acqua e biossido di carbonio, estrarre l'idrogeno dalla prima e il carbonio dalla seconda e sintetizzare così gli zuccheri nel processo noto come fotosintesi clorofilliana. L'ossigeno, prodotto di scarto della fotosintesi, si accumulò nell'atmosfera e creò uno strato di ozono, una forma di ossigeno molecolare con tre atomi, che filtrando i raggi cosmici creò le condizioni per le piante verdi per lasciare gli oceani e cominciare a colonizzare le terre emerse. Successivamente si sono evoluti organismi che, invece di sfruttare l'energia del sole tramite fotosintesi, utilizzavano l'abbondante materiale organico (la biomassa) prodotto dagli organismi fotosintetici per ricavare l'energia necessaria a mantenersi in vita.

La fotosintesi clorofilliana, i cui processi biochimici di base sono rimasti praticamente immutati dalla comparsa dei primi vegetali qualche miliardo di anni fa, è stata e rimane un processo fondamentale per lo sviluppo evolutivo della vita sulla Terra e, in ultima analisi, per la crescita della stessa popolazione umana e lo sviluppo della nostra civiltà. Infatti, la fotosintesi clorofilliana:

- ha permesso di modificare sostanzialmente la concentrazione dei gas nell'atmosfera, sia creando lo strato di ozono che scherma i raggi ultravioletti e le radiazioni cosmiche, sia aumentando significativamente la concentrazione di ossigeno utilizzato nella respirazione di tutti gli organismi viventi, uomo incluso, e fondamentale in qualsiasi processo di combustione; in questo senso, l'at-

mosfera terrestre è unica nella sua composizione ed è frutto di complesse interazioni fra le variabili fisico-chimiche e il comparto biologico;

- ha permesso di accumulare nel corso di milioni di anni enormi (ma non illimitate) quantità di materiale organico nei sedimenti che, sotto particolari condizioni di pressione e temperatura, hanno portato alla formazione di carbone, petrolio e gas, i combustibili fossili, che hanno alimentato l'incredibile progresso tecnologico della rivoluzione industriale e soddisfano ancora oggi l'80% del nostro fabbisogno energetico;
- ha permesso di costruire un'ampia e solida base di una catena alimentare che sostiene un numero enorme di forme di vita, incluso, naturalmente, anche l'uomo.

È quindi grazie agli organismi fotosintetici che abbiamo il pianeta che abbiamo, con la composizione atmosferica e il clima che lo caratterizza; ancora oggi la fotosintesi rappresenta uno dei più imponenti processi di trasformazione e stoccaggio dell'energia solare sulla Terra e continua a fornire direttamente energia primaria a una grossa fetta della popolazione nei Paesi in via di sviluppo.

Come qualsiasi altra forma di vita, anche quando siamo completamente a riposo e dormiamo, continuiamo a consumare energia per mantenere attivo il complesso di reazioni chimiche che ci tengono in vita, come la respirazione necessaria per ossigenare il sangue e la produzione di calore per mantenere la temperatura corporea entro un intervallo costante ottimale e ben definito. Questo complesso di reazioni è definito metabolismo basale e il consumo energetico è misurato generalmente in chilocalorie.

Il fabbisogno calorico giornaliero medio di una persona adulta oscilla fra 2000 e 2500 kcal, ma i consumi energetici possono variare molto a seconda di quanto esercizio fisico si compie nel corso di una giornata e di una serie di altri fattori, come età, peso, sesso ecc. Un individuo adulto dovrebbe trovarsi in una situazione di sostanziale equilibrio energetico fra calorie assunte con l'alimentazione e quelle effettivamente bruciate nel corso di una giornata. Quando questo non avviene, le calorie in eccesso finiscono per provocare un aumento di peso. Anche se quello dell'obesità sta diventando un fenomeno sempre più diffuso e preoccupante nelle società industrializzate, per la stragrande maggioranza della storia dell'umanità il problema, in verità, è stato esattamente quello opposto, la lotta costan-



te, e a tratti disperata, per assicurarsi un apporto nutritivo minimo per sopravvivere.

Molte delle scoperte e invenzioni dell'uomo in un periodo compreso fra 13.000 e 3000 anni fa furono finalizzate proprio a soddisfare il fabbisogno energetico di base: la scoperta del fuoco ha permesso di cucinare le carni rendendole più digeribili e commestibili, lo sviluppo dell'agricoltura di controllare la produzione di cibo e stoccare riserve per affrontare le stagioni improduttive e le carestie, l'uso di sale e olio di conservare più a lungo alimenti altrimenti facilmente deperibili, l'allevamento e la pesca sono state e rimangono una fondamentale fonte di proteine per una dieta equilibrata, mentre gli animali da tiro, come buoi e cavalli, hanno permesso di aumentare la produzione agricola e muovere le prime macchine per generare lavoro meccanico, come torni e frantoi. Per quella frazione della popolazione umana – purtroppo storicamente minima, come vedremo – in grado di assicurarsi un adeguato apporto nutritivo giornaliero, questo ha significato un miglioramento dello stato di salute, una maggiore prestanza fisica – fondamentale in guerra come in pace –, una maggiore resistenza alle malattie e ai rigori del clima, una maggiore fertilità e aspettativa di vita: in sostanza, come si direbbe in gergo darwiniano, una maggiore *fitness*.



## 2. L'uomo e la scoperta del fuoco

La scoperta del fuoco da parte di alcune specie di ominidi risale probabilmente già al Paleolitico inferiore, ma fu l'uomo moderno, *Homo sapiens sapiens*, comparso circa 120.000 anni fa, che ne trasse certamente il maggior beneficio grazie alla capacità di controllarlo, di accenderlo al bisogno e di conservarlo.

Assieme con lo sviluppo delle prime rudimentali armi da caccia che consentirono di sfruttare meglio la forza muscolare di braccia e gambe, la capacità di gestire e usare il fuoco e la sua energia è stata probabilmente la prima vera innovazione tecnologica che migliorò sostanzialmente la vita dell'uomo. Infatti, il fuoco proteggeva l'uomo dalle bestie feroci e lo scaldava nelle gelide notti invernali, permettendogli con il tempo di colonizzare aree altrimenti inospitali perché troppo fredde. La cottura delle carni permetteva di eliminare parassiti e agenti infettivi nel cibo, modificava la consistenza e il sapore dei cibi rendendoli più digeribili e più saporiti e trasformava alcune sostanze tossiche rendendole commestibili.



Grazie al controllo del fuoco, intorno al VII-VI millennio a.C. cominciarono a svilupparsi in Medio Oriente, India e Grecia i primi rudimenti di lavorazione artigianale del rame per produrre piccoli oggetti decorativi o di uso domestico, per esempio ami e punteruoli per la lavorazione del cuoio. Successivamente, nel VI-V millennio a.C., la maggiore padronanza del fuoco consentì di aumentare la temperatura nei forni, grazie alla quale fu possibile perfezionare dapprima il processo di riduzione con il quale si estrae il rame dai suoi minerali e poi la fusione del metallo (che avviene a circa 1083 °C) e la sua lavorazione in stampi.

Tra il IV e il III millennio a.C. nei laboratori dei palazzi reali e dei templi della Mesopotamia si cominciò a esplorare la possibilità di mescolare i metalli, in particolare rame e stagno, in quantità e combinazioni differenti, per produrre bronzo. Questa lega ha una durezza che è maggiore del rame e cresce con la percentuale di stagno e di impurità di fosforo e arsenico, proprietà che la rendeva adatta per la produzione di armi come lance, spade, pugnali e utensili agricoli e altri strumenti impiegati in attività artigianali.

L'utilizzo dei minerali del ferro si affermò inizialmente nel corso del II millennio a.C. nel processo di riduzione del rame, da cui derivava una produzione di piccole quantità di ferro utilizzato per realizzare semplici manufatti. In seguito al forte aumento del prezzo del bronzo dovuto alla caduta del commercio delle materie prime causata dalla grave crisi politica e sociale che colpì attorno al 1200 a.C. i centri mesopotamici e micenei, si cominciarono a produrre utensili e armi in ferro, molto più economico del bronzo grazie alla notevole abbondanza del minerale. Gli utensili in ferro si diffusero dapprima in Grecia e da qui nel resto del continente europeo. Durante l'Età del ferro, che si sviluppò nell'Europa continentale in un periodo compreso fra il 1200 e l'800 a.C., gli utensili e le armi migliori erano fatte di una lega di ferro con un contenuto di carbonio compreso fra lo 0,02 e l'1,7% in peso, caratterizzata da una durezza molto superiore a quella del bronzo, cosa che la rendeva preferibile per la realizzazione di utensili come seghe, asce, zappe, chiodi. La sua lavorazione era però difficoltosa a causa delle alte temperature necessarie per la fusione nei forni e la colatura in stampi. Pertanto, la maggior parte degli utensili realizzati in questo periodo era in verità in ferro battuto, meno duro del bronzo, ma più facile da affilare e comunque molto più economico.



### **3. Energia dalle piante e dagli animali e i primi problemi di deforestazione**

Un secondo elemento di grande innovazione fu l'addomesticamento prima degli animali e poi delle piante. Si tratta di un lungo processo di selezione di varianti genetiche per migliorare qualità e abbondanza della produzione animale e vegetale rispetto alle specie selvatiche. Questo processo iniziò alla fine dell'ultima era glaciale, poco meno di 12.000 anni fa, probabilmente in Medio Oriente nella cosiddetta "Mezzaluna fertile", l'area compresa fra i quattro grandi fiumi della regione, Tigri e Eufrate, Nilo e Giordano e, più o meno contemporaneamente, in Cina.

Gli animali come pecore, capre e bovini possono produrre carne e soprattutto latte anche con un apporto relativamente basso di energia da parte dei primi pastori nomadi, che inizialmente si limitavano a radunare e guidare gli animali, a proteggerli dai predatori, a foraggiarli in caso di necessità, a mungerli e più raramente a macellarli. Successivamente buoi e cavalli furono utilizzati anche come animali da tiro in agricoltura permettendo di raggiungere ritmi di lavoro impensabili per un contadino con la sola zappa. La ruota fu inventata in Mesopotamia nel V millennio a.C. proprio nei luoghi dove l'addomesticamento di animali di grande taglia aveva messo a disposizione la forza motrice per utilizzarla efficacemente per compiere lavoro (le civiltà precolombiane, per esempio, non utilizzarono mai la ruota per fini pratici).

Con il tempo furono selezionate piante per la produzione di grani (frumento, miglio, riso, granturco), radici (patate dolci, manioca), legumi (fagioli, arachidi), e furono messe a punto le tecniche di macinazione del grano per la produzione di farina. L'agricoltura fu una vera e propria rivoluzione che pose le basi per la nascita delle prime civiltà stabili: la produzione di un surplus alimentare – una forma di stoccaggio dell'energia solare in energia biochimica – e la capacità di conservare derrate utilizzabili nelle stagioni meno favorevoli permisero il progressivo abbandono dello stile di vita nomade tipico delle piccole popolazioni di cacciatori/raccoglitori.

Cruciale fu la possibilità di emancipare una parte della popolazione dall'attività quotidiana di procacciamento del cibo. Quest'aspetto assunse una rilevanza enorme nella storia delle civiltà, poiché consentì la formazione di comunità sedentarie sempre più numerose in centri abitati stabili e poi in città, e la nascita delle specializzazioni,





ovvero di categorie professionali dedicate a specifiche attività, come la lavorazione del legno e dei metalli.

La formazione di società più complesse richiese lo sviluppo di sistemi di governo e amministrazione adeguati e favorì l'invenzione e lo sviluppo della scrittura. Inoltre, le comunità sedentarie di agricoltori e allevatori cominciarono ad accumulare proprietà e a sentire la necessità di sviluppare sistemi per difenderle. Questo con il tempo portò alla formazione di soldati di professione e di eserciti stabili. La ricerca della supremazia militare produsse una forte spinta all'innovazione tecnologica per la produzione di armi e sistemi di difesa sempre più potenti ed efficaci.

Agricoltura e allevamento hanno proceduto di pari passo. Grazie all'energia di un elevato numero di animali da tiro, selezionati attraverso migliaia di anni, è stato infatti possibile aumentare la produttività dei lavori pesanti, arare profondamente duri terreni, strappare radici, trascinare tronchi, trasportare pesi e persone, far girare le ruote dei frantoi per produrre la farina e sollevare acqua dai pozzi. L'aratura è stata certamente l'attività in cui il contributo degli animali è stato più importante. Potenza e velocità sono molto variabili a seconda degli animali utilizzati: un asino ha una forza poco superiore a quella di un uomo robusto, un bue può fare un lavoro tre volte superiore, un cavallo fino a sette volte, a una velocità di circa un metro al secondo, maggiore del 30-50% di quella di un bue. Inoltre, rispetto ad altri animali, i cavalli possono lavorare più a lungo (dieci ore contro le sei ore al massimo dei buoi) e possono farlo per diversi anni (fino a venti per i cavalli, non più di otto-dieci per i buoi).

Non si tratta, però, solo di un problema di forza: fondamentale fu l'evoluzione dei finimenti per il traino, una forma d'innovazione tecnologica per aumentare il rendimento della forza animale. I primi finimenti erano costituiti da cinghie legate al collo, inadatte per i pesanti lavori nei campi perché spezzavano il respiro del cavallo a causa del punto di trazione eccessivamente alto sul collo dell'animale. Finimenti pettorali molto più efficienti (il basto a collare) furono adottati inizialmente dai cinesi già nel I secolo a.C. e cominciarono a essere utilizzati in Occidente verso il IX secolo d.C. e si diffusero in tutta Europa nei secoli successivi. La trazione esercitabile dai cavalli con finimenti pettorali può essere di 4-5 volte superiore a quella con finimenti al collo o alla pancia.

I cavalli fornirono anche un notevole vantaggio strategico per la velocità di spostamento di persone, carichi e merci, fondamentale sia





in pace, sia in guerra. E proprio in ambito militare la cavalleria conferì un'impressionante supremazia bellica nei confronti degli eserciti che ne erano privi.

Naturalmente, come capita spesso, tutta questa energia non veniva senza costi: per mantenere un cavallo una parte significativa della produzione agricola doveva essere utilizzata per il suo foraggiamento. Le bardature e i ferri degli zoccoli ne aumentarono sì la produttività, ma avevano un costo economico (cioè di lavoro) non marginale che spesso i poveri contadini non potevano permettersi senza indebitarsi. Nonostante tutto, saper utilizzare l'energia dei cavalli rappresentò sempre un vantaggio strategico fondamentale in tutte le civiltà preindustriali.

Non si deve ritenere, d'altro canto, che il passaggio dalla vita nomade a quella sedentaria con la diffusione dell'agricoltura abbia comportato sempre un miglioramento del tenore di vita. In genere, anzi, si verificò quasi il contrario. Lo sviluppo dell'agricoltura pose certamente le basi per l'inarrestabile crescita della popolazione umana, tuttavia la popolazione cresceva non perché si fosse raggiunto un maggior livello di benessere ma, al contrario, perché le braccia per lavorare non erano mai abbastanza. I bambini, infatti, cominciavano a dare il loro contributo ai lavori di campagna già a quattro anni. La produzione agricola aumentava lentamente in balia dei capricci della natura. Rovinose carestie, cui si aggiungevano regimi feudali che privavano i contadini del frutto del loro lavoro, facevano sì che il cibo fosse sempre scarso, la dieta poverissima e monotona, l'apporto di proteine animali molto basso. La necessità di sfamare più bocche spingeva ad abbattere i boschi per creare nuove terre agricole, operazione che a sua volta richiedeva sempre più braccia per lavorare. Così produzione agricola e popolazione crescevano assieme ma l'apporto pro capite rimaneva sostanzialmente immutato e sempre drammaticamente basso, appena sufficiente per una modesta sopravvivenza e, spesso, neanche per quella.

Nel corso dei millenni la diffusione dell'agricoltura ha modificato radicalmente il paesaggio naturale. Prima dell'introduzione della rotazione delle colture, i terreni agricoli s'impoverivano rapidamente e nel giro di pochi anni non risultavano più produttivi. Questo richiedeva la continua conversione di nuove aree in terreni agricoli, in un processo noto come *slash and burn*, letteralmente "taglia e brucia", in quanto la vegetazione veniva abbattuta e bruciata per fertilizzare il terreno da dedicare alla produzione di colture alimentari. I terreni





da convertire all'agricoltura non mancavano almeno fino a quando le popolazioni erano relativamente poco numerose e i nuovi territori da colonizzare ancora abbondanti. La rotazione delle colture agricole, introdotta fra la fine del '600 e il '700, permise di migliorare sensibilmente lo sfruttamento dei terreni. Tuttavia la progressiva crescita della popolazione e della conseguente domanda di beni alimentari e di legname per uso energetico hanno portato inesorabilmente a fenomeni diffusi di deforestazione, già drammaticamente evidenti nella loro estensione nel '600. È solo grazie al crescente uso del carbone che si cominciò a ridurre il consumo di biomasse.

#### 4. Lo sfruttamento della forza dell'acqua e del vento

Lo sfruttamento dei salti idrici per la produzione di lavoro è stato un altro passaggio fondamentale per aumentare la produttività di alcune attività legate all'agricoltura: mentre per arare un campo non c'era alternativa all'uso di animali da tiro, per far girare una macina si poteva usare la forza dell'acqua. Le prime testimonianze dell'uso di ruote ad acqua risalgono probabilmente all'epoca dei sumeri in Mesopotamia (IV-III millennio a.C.). Successivamente, nel III secolo a.C., i greci svilupparono ruote idriche orizzontali con pietra da macina collegata direttamente al potente asse di rotazione. I mulini romani utilizzavano una ruota ad acqua verticale e richiedevano quindi un ingranaggio per trasferire la forza dall'asse orizzontale di rotazione del mulino a quello verticale della ruota da macina; erano mulini più complessi ma anche più efficienti di quelli greci. Il mulino ad acqua di Barbegal, in funzione fra il I e il III secolo d.C. nel Sud della Francia, è considerato una delle maggiori concentrazioni di potenza meccanica dell'antichità: dotato di 16 ruote ad acqua, alimentava un numero equivalente di macchine che in un giorno potevano produrre 4,5 tonnellate di farina, quanto necessario per alimentare 12.500 abitanti.

È però solo in epoca medievale che i mulini ad acqua cominciarono a diffondersi maggiormente, anche grazie all'evoluzione di tecnologie che permettevano di sfruttare in modo più efficiente sia salti idrici bassi, con ruote idrauliche a pale piane o curve alimentate dal basso, tipiche di fiumi a bassa pendenza e con grande massa d'acqua, sia salti idrici più alti, con ruote idrauliche alimentate dal centro o dall'alto. Le ruote idrauliche con alimentazione dall'alto richiedevano opere di canalizzazione per portare l'acqua sopra il mulino sfruttan-





do così sia l'energia cinetica, sia quella potenziale gravitazionale. Nei secoli più recenti il classico mulino ad acqua fu sostituito dalle molto più efficienti turbine a flusso centripeto di Francis nel 1848 (attualmente ancora il tipo più utilizzato grazie all'alta efficienza di conversione che raggiunge il 90%); a getto, ideata da Pelton attorno al 1880 (utilizzata per grandi salti idrici e piccoli flussi, tipici dei bacini idroelettrici alpini con condotte forzate) e a flusso assiale di Kaplan del 1913 (efficace per sfruttare grandi portate con piccoli dislivelli).

I mulini ad acqua, dal medioevo fino all'epoca dei combustibili fossili, rappresentarono per più di un millennio la tecnologia per la produzione di energia più efficiente e affidabile. Il loro utilizzo fu cruciale non solo per la macinazione di granaglie, ma anche come motori per lavori meccanici, la tornitura del legno, la spremitura dell'olio, la produzione della carta, la concia del cuoio, l'incisione, il taglio e la molatura dei metalli, la frantumazione dei minerali, la lucidatura della ceramica, la trazione dei fili, la tessitura e molto altro ancora, tutte attività che dovevano aver luogo, ovviamente, in prossimità dei corsi d'acqua. I livelli produttivi raggiungibili grazie alle ruote idrauliche non avevano precedenti nella storia dell'umanità e permisero di abbattere sensibilmente tempi e costi di produzione. Vaclav Smil nella *Storia dell'energia* (1994) racconta che nel 1795 fu brevettata negli Stati Uniti una macchina a energia idraulica per produrre 200.000 chiodi al giorno: la sua adozione su grande scala portò a una diminuzione del 90% del costo di produzione dei chiodi nel giro di soli cinque anni.

Per quanto riguarda lo sfruttamento dell'energia del vento, invece, a parte le imbarcazioni a vela certamente già utilizzate nell'antico Egitto, si dovette aspettare molti secoli per uno sfruttamento su ampia scala tramite mulini. Questi comparvero in Europa verso la fine del XII secolo, ma fu solo dopo il '600 che gli olandesi (il cui territorio piatto non presentava salti idrici significativi per far funzionare mulini ad acqua) svilupparono le innovazioni tecnologiche in grado di migliorare l'efficienza dei mulini a vento e sfruttarli sia per pompare l'acqua dai territori strappati al mare e dalle miniere, sia per macinare il grano. Già a metà del '600 si contavano almeno 8.000 mulini a vento nei Paesi Bassi, e all'inizio dell'800 c'erano più di 18.000 mulini funzionanti in Germania, 10.000 in Inghilterra, mentre nel '900 più di 30.000 mulini erano in funzione nei Paesi del Nord Europa per una capacità complessiva di circa 100 MW. L'importanza delle tec-



nologie per sfruttare la forza del vento diminuì significativamente con l'avvento dei combustibili fossili e solo recentemente, in conseguenza delle crisi energetiche degli anni '70 e della consapevolezza dei problemi ambientali e climatici causati dai processi di combustione, l'energia del vento sta vivendo una seconda rigogliosa giovinezza.

## 5. La polvere da sparo e la forza distruttiva degli esplosivi

La polvere da sparo – costituita da salnitro, carbone vegetale e zolfo – è probabilmente la prima vera invenzione di un'energia artificiale, una fonte di energia secondaria non presente in natura. La forma di energia della polvere da sparo è completamente diversa da quella delle fonti energetiche che abbiamo fin qui esaminato e di cui parleremo più avanti in questo libro. Infatti, essa libera un'enorme quantità di energia in un tempo brevissimo, a differenza di altre fonti energetiche che producono un flusso più o meno regolare di energia adatto per compiere continuamente un lavoro. Di conseguenza la polvere da sparo ebbe un uso essenzialmente bellico come propellente per proiettili. Di origini ancora incerte, fu quasi certamente messa a punto in Cina e utilizzata in rudimentali armi da fuoco costituite originariamente da bambù cavi. La sua diffusione fu ostacolata per lungo periodo dalla mancanza di canne metalliche capaci di resistere alla deflagrazione, che è un'esplosione a velocità subsoniche, a differenza della detonazione, che avviene invece a velocità supersoniche. In Europa testimonianze dell'uso bellico della polvere da sparo con rudimentali cannoni risalgono al XIV e XV secolo e, grazie ai miglioramenti nella metallurgia, fu poi possibile sviluppare armi più piccole e precise, come la pistola, il moschetto e il fucile a canna rigata. La diffusione della polvere da sparo ebbe un impatto enorme perché modificò completamente le strategie di guerra e gli apparati difensivi che erano rimasti sostanzialmente immutati dall'antichità.

L'utilizzo della polvere da sparo, nella sua formula originaria, continuò a diffondersi fino al 1870 quando il chimico svedese Alfred Nobel mise a punto la dinamite, una miscela di nitroglicerina (un composto altamente instabile che esplose al minimo urto) e farina fossile, un composto naturale con alto potere imbibente formato dai residui fossili di microscopiche alghe della famiglia delle diatomee. Grazie a una gestione oculata dei brevetti, Nobel si arricchì enormemente; verso la fine della sua vita, forse pentito per gli effetti



distruttivi della sua invenzione, creò un enorme lascito – dell'ordine di centinaia di milioni di euro attuali – per finanziare, a partire dal 1895, il famoso Premio Nobel. In verità, la dinamite ebbe anche importanti impieghi al di fuori del campo bellico, soprattutto in ambito minerario per scavare gallerie, rompere enormi massi e aprire varchi per le sempre più estese e capillari infrastrutture viarie che proprio nella seconda metà dell'800 divennero il sistema portante su cui viaggiavano le materie prime e i beni di produzione della rivoluzione industriale.

## **6. La macchina a vapore, il carbone (e l'origine dell'inquinamento)**

Se le infrastrutture viarie erano il sistema circolatorio dei processi d'industrializzazione avviati nell'800, le macchine a vapore ne costituivano sicuramente il cuore pulsante. Già nell'antichità erano state osservate alcune proprietà del vapore, ma si dovette aspettare molto più tardi, nel 1690, perché venisse creata la prima rudimentale macchina a vapore capace di produrre lavoro meccanico per opera del francese Denis Papin: sopra un pistone all'interno di un cilindro era montata una cremagliera che trasmetteva il movimento a un asse a cui erano collegate le pale di una imbarcazione. Una sorgente di calore esterna scaldava l'acqua nel cilindro; il vapore, espandendosi, riempiva il cilindro lasciando il pistone a fine corsa; poi raffreddandosi, condensava creando una depressione che risucchiava il pistone nel cilindro, proprio questa depressione era sfruttata per generare lavoro. Nel 1712 un commerciante di ferramenta inglese, Thomas Newcomen, perfezionò per i suoi clienti minatori una macchina a vapore con un sistema a bilanciere in grado di pompare acqua dalle miniere di stagno e rame, un'attività che ai quei tempi era svolta principalmente da cavalli in modo lento, costoso e inefficiente. Successivamente James Watt apportò una serie di miglioramenti alle poco efficienti macchine di Papin e Newcomen: raffreddamento e condensazione del vapore, per esempio, non avvenivano più nel cilindro, ma in un condensatore separato, e il cilindro stesso era preriscaldato con i vapori di scarico, tutti accorgimenti che permettevano di risparmiare carbone e aumentare potenza e velocità di funzionamento. Inoltre Watt inventò il sistema di biella e manovella per trasformare il movimento alternativo del pistone in un movimento rotatorio più adatto ad azionare pompe e telai e, grazie al cassetto di distribuzione e a un complesso sistema



di valvole, riuscì a sfruttare entrambe le corse del cilindro per generare lavoro. Le sue macchine assicuravano efficienza, affidabilità e potenza senza precedenti. Oltre che nelle miniere, dove erano state inizialmente confinate per pompare acqua, trovarono applicazioni in moltissimi campi, come in metallurgia per insufflare aria nelle fornaci, permettendo così di raggiungere temperature molto più elevate che in precedenza e fondere più rapidamente metalli e generare leghe come l'acciaio, e nell'industria tessile per far funzionare molti telai contemporaneamente, assicurando così volumi di produzione (per l'appunto, detti "industriali") a costi e tempi impensabili nel lavoro artigianale.

Le macchine di Papin, Newcomen e Watt, però, avevano un limite intrinseco: non utilizzavano la forza espansiva del vapore ad alta pressione per generare lavoro, quanto piuttosto il vuoto che si creava in conseguenza della sua condensazione. Era quindi la pressione atmosferica a generare lavoro spingendo letteralmente il pistone dentro il cilindro. Di conseguenza, la massima potenza teorica per unità di superficie non poteva essere superiore a 1 atmosfera, un valore davvero modesto per le esigenze che si venivano a presentare. Era quindi necessario costruire macchine di notevoli dimensioni, con sezione cilindrica molto grande, per avere più potenza. Questo non era certo un problema per i processi industriali in cui si potevano realizzare grandi installazioni fisse, come nel settore tessile e metallurgico, ma costituiva un impedimento per la diffusione di macchine più piccole utilizzabili su ampia scala e per installazioni mobili, come nel settore dei trasporti.

Solo all'inizio dell'800 s'iniziarono a produrre macchine che sfruttavano la forza espansiva del vapore ad alta pressione e temperatura, che, più piccole e potenti, cominciarono a essere utilizzate anche nei trasporti. Nel 1804 l'ingegnere inglese Richard Trevithick realizzò la prima locomotiva a vapore. Quasi 25 anni dopo un altro ingegnere inglese, George Stephenson, costruì la mitica *Rocket*, considerata capostipite delle locomotive poiché ne presentava le caratteristiche fondamentali, come la caldaia tubolare e il tiraggio del camino. La *Rocket* era in grado di raggiungere i 48 km/h come velocità massima e i 28 km/h con un convoglio di 17 tonnellate. Nel 1829 vinse la gara indetta a Rainhill in Inghilterra per scegliere la locomotiva che avrebbe trainato i treni sulla linea Liverpool-Manchester. Nel giro di pochi decenni ferrovie, considerate simbolo di modernità, furono costruite in tutto il mondo. I treni erano diventati ormai uno dei mo-



tori fondamentali della rivoluzione industriale, in quanto assicuravano il trasporto veloce, facile ed economico di materie prime, semilavorati, persone e merci. In Italia la prima ferrovia fu inaugurata il 3 ottobre 1839, nel Regno delle Due Sicilie, dal re Ferdinando II di Borbone e collegava Napoli con Portici, primo tratto di quasi 8 km della linea Napoli-Nocera-Castellammare.

La domanda energetica per alimentare le fornaci e muovere i telai della rivoluzione industriale si accrebbe rapidamente e presto si presentò il problema di trovare un combustibile più economico e abbondante della legna, che cominciava a scarseggiare in Inghilterra a causa degli avanzati processi di deforestazione, già evidenti nel '600 e diventati drammatici nella seconda metà del '700. Fu così che l'aumento del costo della legna spinse a sfruttare le miniere di carbon fossile, presente in enormi quantità in giacimenti superficiali e sotterranei.

La formazione dei carboni fossili risale principalmente a un periodo geologico (non a caso chiamato Carbonifero) compreso fra i 280 e i 345 milioni di anni fa. In quel periodo ci fu l'esplosione della vita vegetale sulla terraferma grazie a temperature favorevoli e a un'atmosfera con un'elevata concentrazione di biossido di carbonio, che abbiamo detto è alla base della fotosintesi clorofilliana. Il carbone si formò prevalentemente in zone paludose dove la biomassa delle piante che morivano si depositava in ambienti subacquei anaerobici, nei quali cioè il basso livello di ossigeno presente preveniva il decadimento, impedendo l'ossidazione e il rilascio di biossido di carbonio. Generazioni successive di piante formarono, alla loro morte, spessi depositi di materia organica lignea non ossidata poi ricoperti da sedimenti e compattati in depositi carbonacei inizialmente sotto forma di torba poi di lignite, carboni sub-bituminosi e bituminosi e quindi antracite, in un processo d'invecchiamento progressivo in cui aumentano il contenuto di carbonio e il potere calorifico e diminuiscono l'umidità e la presenza di altri composti volatili.

Grazie anche a un potere calorifico decisamente superiore a quello della legna, nel corso del XVIII e XIX secolo il carbone divenne la fonte primaria di energia e mantenne inalterato il suo primato fin dopo la metà del XX secolo, quando fu soppiantato dal petrolio.

Con la diffusione del carbone s'inaugurò pienamente anche l'era dell'inquinamento su grande scala. Il carbone, quando brucia in assenza di moderni sistemi di depurazione dei fumi, libera polveri sottili che, inalate nelle vie respiratorie, risultano dannose alla salute



umana. Fino alla metà del XX secolo i cieli di Londra e delle principali città industriali apparivano perennemente oscurati da una densa cappa di fuliggine (non a caso il color "grigio fumo di Londra" si chiama proprio così!) che appestava le città ed era progressivamente divenuta un rilevante problema di carattere sanitario. Si calcola che il picco di smog determinatosi a Londra fra il 5 e il 9 dicembre 1952 (a causa dell'elevato consumo di carbone per combattere l'intenso freddo invernale) causò 12 mila vittime.

Oltre a provocare le polveri sottili, il carbone non è quasi mai puro e contiene tracce più o meno rilevanti di molti altri minerali non organici e composti potenzialmente dannosi, principalmente zolfo, e poi mercurio e perfino elementi radioattivi, che possono diffondersi nell'atmosfera nei fumi e si concentrano nelle ceneri di combustione che devono quindi essere adeguatamente trattate. Il carbone da riscaldamento è stato ormai quasi completamente abbandonato nella maggior parte delle città europee e nordamericane, ma l'inquinamento atmosferico causato dal carbone rimane ancora un problema di drammatiche proporzioni in alcuni Paesi asiatici, in particolare in Cina, che ne è il maggiore produttore e consumatore mondiale e non riesce a farne a meno per sostenere la propria impetuosa crescita industriale.

## 7. I motori a combustione interna e l'inizio dell'era del petrolio

Il carbone si dimostrò un ottimo combustibile per le locomotive e per le grandi macchine a vapore su installazioni fisse, a fianco delle quali si potevano costruire depositi sufficientemente capaci per il suo stoccaggio. Risultava però fondamentalmente inadatto allo sviluppo di piccoli motori per il trasporto su strada. Già dalla fine del '700, diversi studiosi avevano realizzato prototipi di motori a combustione interna, nei quali cioè, a differenza delle macchine a vapore, la combustione fra ossigeno e un reagente (costituito inizialmente da gas) avveniva direttamente all'interno del cilindro. Dopo numerosi piccoli perfezionamenti e tanti fallimenti, l'inventore tedesco Nicolaus Otto mise a punto fra il 1862 e il 1876 un motore con compressione interna a quattro tempi molto efficiente che conquistò rapidamente il mercato. Nel 1879 Karl Benz brevettò un motore a due tempi e nel 1886 uno a quattro tempi che fu montato nello stesso anno sulla prima automobile in produzione commerciale. All'inizio del 1900, un altro inventore tedesco, Rudolf Diesel, rea-



lizzò i primi motori nei quali la combustione del gasolio era innescata non con una scintilla, come nei motori a benzina, ma dall'alta temperatura risultante dalla rapida compressione della miscela di aria e combustibile ad alta pressione.

Grazie a Henry Ford si entrò nell'era della produzione di massa delle automobili. La sua Lizzie, auto semplice (era disponibile in un solo colore, il nero) e priva di fronzoli ("Quel che non c'è, non si rompe", usava dire Ford), fu prodotta dal 1908 al 1927 in 15 milioni di esemplari. Una simile produzione fu possibile grazie alla messa a punto di un innovativo sistema industriale di produzione, la "catena di montaggio" (oggetto di satira in una celebre scena del film *Tempi moderni* del 1936 di Charlie Chaplin) che permetteva di realizzare auto in tempi rapidissimi, rispetto al lento lavoro artigianale della stessa Benz, e a costi estremamente contenuti. Da oggetto di culto e simbolo di potere e ricchezza di poche famiglie facoltose, la Lizzie di Ford divenne presto l'auto del consumatore medio americano.

Il motore a scoppio rivoluzionò il trasporto urbano di merci e persone e pose fine, fra l'altro, a un problema che affliggeva le grandi aree urbane: le migliaia di cavalli che percorrevano le strade delle principali città europee producevano infatti enormi quantità di deiezioni che provocavano terribili miasmi e seri problemi di igiene. In epoca vittoriana nei quartieri di Londra un esercito di spazzini era all'opera per mantenere costantemente aperti dei corridoi fra lo sterco in modo tale da poter attraversare la strada senza sporcarsi fino alle caviglie. La diffusione dell'automobile, con la sua carrozzeria luccicante e il motore rombante, fu salutata come un avvento di modernità e pulizia.

La progettazione di grandi motori diesel a due tempi ha permesso con il tempo di far navigare immense navi cargo e superpetroliere da 550.000 tonnellate di stazza e navi da crociera con oltre 5.500 persone a bordo fra passeggeri ed equipaggio, mentre l'invenzione dei motori a jet ha fatto decollare una sterminata flotta aerea, che nel 2008 ha trasportato 2 miliardi e 270 milioni di passeggeri e 41 milioni di tonnellate di merci. Già nella seconda metà del '900 i tempi per raggiungere qualsiasi angolo del pianeta cominciarono a crollare fino a ridursi, negli anni recenti, a una sola giornata. Nel giro di meno di un secolo l'epoca del *Giro del mondo in 80 giorni* descritta da Jules Verne nel 1873 si era definitivamente conclusa.

Fu quindi grazie alla spinta generata dalla rivoluzione industriale e dalla crescente domanda energetica che il petrolio (conosciuto già





da molti secoli, prima come “fuoco greco” lanciato dalle navi bizantine come arma incendiaria e poi come medicinale) ebbe una rapidissima diffusione alla fine dell'800. Nel giro di pochi decenni l'oro nero diventò così una delle materie prime più importanti del mondo grazie alla sua facilità di trasporto, all'elevata densità energetica e alla sua incredibile flessibilità d'uso nei processi di chimica industriale.

L'industria petrolifera nacque a metà del 1859 in Pennsylvania, negli Stati Uniti, quando venne aperto il primo pozzo redditizio del mondo. Inizialmente si cominciò a mettere il petrolio nei barili di legno da 49 galloni (circa 159 litri) utilizzati per il whisky, e da allora il barile di petrolio è rimasto l'unità di misura più in voga. Inizialmente la crescita fu molto lenta; solo con la messa a punto del motore a combustione interna la domanda di petrolio e dei suoi derivati cominciò a crescere tumultuosamente e in modo inarrestabile fino ai nostri giorni. I primi piccoli giacimenti locali furono presto esauriti già all'inizio del '900, ma si aprirono successivamente grandi giacimenti in Texas (immortalati nel celebre film *Il gigante* con James Dean), Oklahoma e California e a metà del secolo in Medio Oriente.

All'inizio del '900, nel pieno della seconda rivoluzione industriale, oltre 200 derivati del petrolio erano già entrati nell'uso comune, dai solventi alle sostanze cerose per la fabbricazione di candele e medicinali, dai lubrificanti a una vasta gamma di carburanti (benzine, gasoli, nafta e cherosene). Dopo la seconda guerra mondiale il petrolio ha superato il carbone ed è divenuto la fonte energetica primaria più importante del pianeta, assumendo un ruolo centrale e insostituibile in particolare nei trasporti e nei processi di chimica industriale (si pensi soltanto alla produzione di plastiche e gomme).

È solo grazie all'uso dei combustibili fossili nella meccanizzazione dell'agricoltura e nella chimica industriale per la produzione di pesticidi e fertilizzanti che si è riusciti ad aumentare contemporaneamente e in modo significativo sia la produzione agricola, sia l'apporto calorico pro capite. Questo, tuttavia, è avvenuto – e continua ad avvenire in modo sempre più rilevante – a prezzo di una maggiore dipendenza dal petrolio che fornisce l'energia impiegata per far funzionare le macchine agricole e i sistemi d'irrigazione e per sostenere la produzione di fertilizzanti e pesticidi. Per esempio, la produzione intensiva di pomodori in serra permette, a parità di superficie, rese cinque volte superiori a quelle delle coltivazioni tradizionali, creando così l'illusione che grazie alla tecnologia si possa soddisfare la do-





manda alimentare di una popolazione mondiale sempre crescente. Tuttavia i consumi energetici per mantenere in serra condizioni ottimali di temperatura, umidità, irrigazione, fertilizzanti ecc. sono 15 volte superiori a quelli delle colture tradizionali, aggravando quindi il bilancio energetico del pianeta.

Oltre tutto, l'aumento dei consumi alimentari pro capite ha interessato per il momento solo una parte della popolazione mondiale nei Paesi industrializzati. Una parte consistente dell'umanità vive ancora in condizioni di sussistenza non molto diverse da quelle dei contadini europei dell'epoca preindustriale: nel 2009 la parte della popolazione che soffre gravemente di malnutrizione ha superato, per la prima volta nella storia dell'umanità, la cifra record di 1 miliardo.

Come già accadde con il carbone, anche l'era del petrolio ha portato con sé una serie di problemi ambientali la cui dimensione è emersa in tutta la sua drammaticità già alla fine degli anni '60 del '900. Nel 1969 Rachel Carson pubblicava *Primavera silenziosa*, una denuncia dell'uso scriteriato dell'insetticida DDT e dei suoi effetti ambientali e sulla salute umana: a questo saggio si fa risalire la nascita del movimento ambientalista. Con i trasporti di massa sono divenuti evidenti i problemi legati alle emissioni inquinanti generate dalla combustione di benzine (soprattutto degli additivi chimici anti-detonanti e degli idrocarburi incombusti), gasoli (polveri fini e ossidi di azoto che delle prime sono precursori) e oli combustibili usati nel riscaldamento e per la produzione di calore nei processi industriali. Questi ultimi, come il carbone, possono contenere elevati livelli di zolfo, la causa principale delle piogge acide.

Lo sviluppo dell'industria chimica, se da una parte ha contribuito ad aumentare enormemente il livello di benessere umano, dall'altra si è accompagnato a diffusi fenomeni di inquinamento dell'aria e di contaminazione delle acque e del suolo, che in diversi casi hanno finito per mettere a rischio la stessa salute dell'uomo. Ogni anno decine di migliaia di sostanze chimiche di sintesi continuano a essere liberate nell'ambiente e solo per una piccola frazione di queste si conoscono i possibili livelli di tossicità.

## 8. L'era dell'elettricità

Il termine elettricità deriva dal modo con cui gli antichi greci chiamavano l'ambra (ηλεκτρον): strofinando energicamente l'ambra con un panno si genera un campo elettrico che attira i ca-





PELLI e può provocare piccole scintille. Fu però solo molti secoli dopo, nella seconda metà del '700, che si intensificarono gli studi sui campi elettromagnetici: nel 1745 Pieter van Musschenbroek inventò la "bottiglia di Leida", il primo vero e proprio condensatore, utilizzato ampiamente nelle ricerche successive; Benjamin Franklin nel 1752 compì i suoi esperimenti leggendari con gli aquiloni per dimostrare la natura elettrica dei fulmini; seguirono quindi studi, scoperte e invenzioni di Michael Faraday, Luigi Galvani, Alessandro Volta, André-Marie Ampère, Georg Simon Ohm e Nikola Tesla, tutti (tranne Galvani) onorati con l'intitolazione di specifiche unità di misura legate all'elettricità.

Le prime applicazioni dell'elettricità furono nell'ambito delle telecomunicazioni. Samuel Morse mise a punto un telegrafo elettrico e il famoso codice utilizzato per la comunicazione. Antonio Meucci, che aveva bisogno di tenersi in stretto contatto con la moglie costretta a casa perché gravemente malata, inventò il primo telefono per la trasmissione elettrica della voce. Male consigliato e povero in canna, non riuscì a racimolare i 200 dollari necessari per brevettare definitivamente la sua invenzione e dovette accontentarsi di un brevetto temporaneo a 10 dollari l'anno, che comunque riuscì a mantenere solo per pochi anni. Il brevetto gli fu così soffiato sul tempo per una macchina sostanzialmente simile da Alexander Graham Bell che fondò l'omonima industria delle telecomunicazioni arricchendosi enormemente.

Thomas Edison fu uno degli inventori più prolifici del suo tempo: a suo nome furono registrati ben 1093 brevetti in diversi Paesi. La lampadina elettrica a incandescenza, brevettata nel 1878, ebbe subito un enorme successo essendo molto più efficiente e pulita delle lampade a olio minerale o naturale. I primi impianti d'illuminazione pubblica a incandescenza furono montati a New York nel 1882 e, in Europa, a Milano nel 1884. Con la diffusione dell'illuminazione elettrica, i produttori di olio di oliva del Salento in Puglia, che avevano fatto la propria fortuna vendendo enormi quantità di olio da illuminazione a Londra, San Pietroburgo e altre grandi città del Nord Europa, iniziarono un rapido declino.

Alimentato da grande ambizione e forse avidità, Edison si scatenò in una lotta senza esclusione di colpi per convincere la nascente industria elettrica ad adottare il suo brevetto per trasportare energia elettrica su cavi in corrente continua. La tecnologia concorrente – trasporto in corrente alternata ad alta tensione – era proposta da un al-



tro celebre inventore di quei tempi, George Westinghouse, che aveva brevettato questo sistema seguendo le teorie di Tesla. Edison si prodigò in una serie di azioni decisamente discutibili e al limite della disinformazione per mostrare la pericolosità della corrente alternata: favorì fra l'altro l'invenzione della famigerata sedia elettrica e provocò la morte per folgorazione con corrente alternata di una serie di animali di taglia sempre maggiore fino ad arrivare all'uccisione della povera elefantessa Topsy nel gennaio del 1903. Alla fine l'industria comprese sulla base di test oggettivi che la corrente alternata era veramente la soluzione migliore: infatti è stata poi adottata universalmente ed è ancora in uso ai nostri giorni.

Nonostante questi retroscena un po' torbidi, la possibilità di trasportare energia elettrica a grandi distanze ebbe un impatto economico-sociale enorme. Grazie alla corrente alternata fu finalmente possibile delocalizzare la produzione dal consumo di energia. Questo significava innanzitutto poter sfruttare i salti idrici dei bacini naturali o artificiali in zone remote di montagna lontane dalle aree industriali e dai centri urbani, dando così inizio alla realizzazione di grandi dighe, opere idrauliche e centrali idroelettriche, come quelle bellissime e imponenti progettate nella prima metà del XX secolo da Piero Portaluppi e che si possono ancora ammirare in molti bacini alpini e prealpini. Inoltre si cominciarono a costruire le prime grandi centrali termoelettriche alimentate essenzialmente a carbone e, nell'Italia del dopoguerra, anche a olio combustibile (superato ampiamente dal gas naturale negli ultimi anni); grazie alle economie di scala queste centrali consentivano una sostanziale riduzione dei costi di produzione. La disponibilità di energia elettrica a basso costo permise di azionare motori potenti, puliti e silenziosi che soppiantarono quelli a vapore alimentati a carbone, mentre la diffusione capillare della rete elettrica consentì di portare l'energia dove maggiore era la domanda, nelle aree industriali e nelle città, contribuendo, così, a liberarsi dal giogo del carbone.

Per quanto l'energia elettrica sia pulita, trattandosi di un'energia secondaria, la sua produzione non ha permesso di ridurre la nostra dipendenza dai combustibili fossili e, anzi, l'ha aumentata decisamente e con essa sono cresciuti i problemi ambientali conseguenti. Ancora oggi il 67% dell'energia elettrica mondiale è prodotta con combustibili fossili e quasi i due terzi di questa parte con il poco pulito carbone, in particolare negli Stati Uniti, Cina e India, che hanno ampia disponibilità di questa risorsa nei loro territori. Negli ultimi vent'anni si



è accresciuta e consolidata la consapevolezza anche dell'altro grande problema ambientale generato dall'uso dei combustibili fossili, quello della emissione dei gas climalteranti a cui è dedicato il capitolo "Energia, effetto serra e cambiamenti climatici".

## 9. Crisi energetiche, fonti alternative ed energia nucleare

A partire dalla seconda metà del '900 le principali economie mondiali, in particolare Stati Uniti e vari Paesi europei, sono divenute largamente dipendenti dal petrolio estratto nei Paesi del Medio Oriente. In seguito alla guerra del Kippur nel 1973, l'OPEC (Organization of the Petroleum Exporting Countries), per punire l'Occidente per le sue posizioni filoisraeliane, bloccò le esportazioni di petrolio facendone innalzare il prezzo in modo vertiginoso. In Italia, per far fronte alla riduzione della disponibilità di petrolio, furono inaugurate le "domeniche austere", che prevedevano il blocco totale della circolazione assieme ad altre misure come la riduzione dell'illuminazione pubblica e commerciale e la fine anticipata dei programmi televisivi.

Solo pochi anni più tardi, nel 1979, una nuova crisi energetica colpì l'Occidente a causa del rovesciamento della monarchia persiana e la creazione della repubblica islamica in Iran. Questo comportò un nuovo blocco delle esportazioni del petrolio, innescando forti movimenti speculativi sul mercato dell'energia e creando grosse difficoltà di approvvigionamento energetico per i Paesi occidentali.

Gli effetti di queste due crisi energetiche furono ovviamente molteplici. Si cominciò a diffondere la consapevolezza della fragilità del sistema produttivo e a percepire chiaramente che, in quelle che erano le prime avvisaglie di globalizzazione, le vicende politiche e sociali di un Paese, magari ritenuto da molti marginale, potevano avere fortissime ripercussioni sul resto del mondo. In secondo luogo, la crisi diede una forte spinta alla ricerca di giacimenti petroliferi al di fuori dei Paesi dell'OPEC per aumentare la sicurezza dell'approvvigionamento: la Norvegia, per esempio, individuò giacimenti nel Mare del Nord, gli Stati Uniti in Alaska e nelle zone marine costiere (giacimenti detti pertanto *offshore*). In terzo luogo, nei Paesi poveri di combustibili fossili (come la Francia o l'Italia) o con una enorme domanda energetica (come gli Stati Uniti) si cominciò a comprendere l'importanza di evitare gli sprechi energetici e, soprattutto, d'individuare fonti alternative di energia, come l'eolico e il solare termico.



### 9.1 *Il nucleare*

Le crisi energetiche degli anni '70 crearono in particolare una spinta fortissima alla produzione di energia elettrica con impianti a fissione nucleare, già operanti negli Stati Uniti e nell'allora blocco sovietico.

Le proprietà radioattive dell'uranio erano già state oggetto di studio da parte di Marie Curie, che per questo ottenne il Premio Nobel per la fisica nel 1902. Lo stesso premio fu conferito a Enrico Fermi nel 1938 per l'identificazione di nuovi elementi radioattivi e la scoperta delle reazioni nucleari mediante neutroni lenti. Nello stesso anno, proprio alcuni mesi prima dell'assegnazione del Nobel, il poco lungimirante governo italiano affossò il progetto di Fermi per la realizzazione di un ciclotrone, perché ritenuto troppo costoso e comunque poco importante, cosa che arrestò lo sviluppo della fisica nucleare italiana e segnò il declino – salvo poche eccezioni, come quella di Giulio Natta e Carlo Rubbia – della tradizione della ricerca scientifica del nostro Paese, dimenticata per decenni da tutti i governi di qualsiasi colore. Con l'inasprimento delle leggi razziali e l'invasione dell'Austria da parte della Germania nazista, Fermi, ebreo, si trasferì negli Stati Uniti, dove fu tra i protagonisti del progetto Manhattan per la realizzazione della prima reazione nucleare controllata in una pila atomica (cosa che avvenne nel 1942) e delle bombe nucleari lanciate tragicamente su Hiroshima e Nagasaki nell'agosto del 1945.

Finita la guerra, accanto alla folle corsa alla proliferazione nucleare per usi militari, cominciò a svilupparsi anche l'uso pacifico del nucleare per la produzione di elettricità. Nel 1954 fu realizzato in Russia il primo impianto nucleare, della potenza di 5 MW, collegato alla rete di distribuzione dell'energia elettrica. Le crisi energetiche degli anni '70 portarono Paesi come la Francia a produrre la maggioranza della propria energia elettrica proprio con impianti nucleari (76% del fabbisogno con 59 reattori nel 2008).

La storia dell'uso civile dell'energia nucleare è costellata fin dall'inizio dal miraggio che potesse diventare in breve tempo la fonte energetica più diffusa ed economica del pianeta. Nel 1954, per esempio, Lewis Strauss, presidente della Commissione per l'Energia Atomica Americana, dichiarò che l'energia elettrica sarebbe stata così abbondante da diventare “troppo economica per prendersi la briga di misurarne i consumi”. Sappiamo che le cose andarono poi molto diversamente. La fusione nucleare, nonostante i più imponenti inve-



stimenti economici degli ultimi 30 anni, superiori a qualsiasi altro campo di ricerca, è rimasta per il momento una chimera per gli irrisolti problemi di generazione e confinamento del plasma a milioni di gradi. Si ritiene attualmente che i primi impianti commerciali per la produzione di energia elettrica con questa tecnologia potrebbero entrare in funzione forse tra 30 o 40 anni, come dire che in effetti non si ha la più pallida idea di quando questa energia diventerà tecnicamente ed economicamente disponibile.

La fissione nucleare, invece, continua a essere afflitta da problemi di sicurezza, proliferazione nucleare (uno dei prodotti di scarto della reazione di fissione dell'uranio è il plutonio, l'ingrediente principale delle bombe atomiche), produzione di scorie radioattive da stoccare potenzialmente anche per migliaia di anni, enormi costi d'investimento e lunghissimi tempi di realizzazione degli impianti, bassissima accettabilità sociale: tutti fattori che rendono molto aleatorie le stime dei costi economici complessivi del nucleare. Molti autori ritengono che il fatto che da oltre 20 anni non siano stati più costruiti nuovi impianti sia dovuto proprio alla sostanziale indeterminazione dei ritorni economici che l'industria si è trovata ad affrontare.

Di certo, in seguito al grave incidente di Cernobyl del 26 aprile 1986, la crescita della consapevolezza dei problemi ambientali legati al nucleare e l'ostilità delle popolazioni locali hanno contribuito alla moratoria di fatto nella costruzione di nuove centrali nucleari in tutto il mondo. Sull'onda emotiva di Cernobyl, l'Italia uscì frettolosamente dal nucleare con un referendum appoggiato anche da politici che successivamente, con poca coerenza, hanno rinnegato quella scelta. Negli ultimissimi anni si è sviluppato un rinnovato interesse per l'energia nucleare. La tumultuosa crescita di Cina e India, assetate di energia, ha contribuito – assieme a una serie di altri fattori che saranno discussi nel prossimo capitolo – alla folle corsa del prezzo del petrolio che, nel giugno del 2008, ha toccato i 147 dollari al barile, con una media annua di quasi 100 dollari, un prezzo simile (al netto dell'inflazione) a quello della seconda crisi energetica alla fine degli anni '70.

L'instabilità politica dei Paesi produttori di petrolio nel Medio Oriente, in Sudamerica e in Africa (alcuni dei quali, fra l'altro, decisamente ostili o poco favorevoli all'Occidente), la necessità di emanciparsi dagli oligopoli del gas, i problemi ambientali generati dal carbone e l'accresciuta consapevolezza dell'impatto sul clima dell'emissione di enormi quantità di gas derivanti dall'uso dei combustibili



fossili hanno creato le condizioni per la realizzazione di numerosi nuovi impianti, principalmente concentrati nei Paesi asiatici.

Anche il parlamento italiano ha votato nel luglio 2009 per il ritorno al nucleare. Nel frattempo però, la centrale di Olkiluoto in costruzione in Finlandia, che doveva rappresentare il nuovo modello economico di rilancio del nucleare per costi e tempi di realizzazione estremamente contenuti, sta annaspando fra mille difficoltà amministrative e tecniche: la messa in funzione è stata rimandata dal 2009 al 2012 e i costi sono quasi raddoppiati dai 3,2 miliardi di euro inizialmente previsti a più di 6 miliardi. In Canada, l'asta per la realizzazione di due nuovi reattori ad acqua pesante da 1200 MW si è chiusa il 19 luglio 2009 con due offerte industriali da oltre 23 miliardi di dollari che superano di circa tre volte i costi che il governo canadese aveva preventivato con eccessivo ottimismo.

Invece dei grandi impianti concentrati di produzione di energia, altri Paesi, come Norvegia e Germania, stanno puntando anche sulla produzione distribuita di energia tramite eolico, fotovoltaico, solare termico e biomasse per uso energetico oltre che ad aggressivi programmi volti a favorire il risparmio energetico in modo particolare nel settore edilizio.

## 10. I nostri giorni: le reti informative e la crescita dei consumi

Ripercorrere le tappe del tumultuoso sviluppo tecnologico della fine del '900 è un compito praticamente impossibile nel poco spazio che rimane a disposizione. In meno di mezzo secolo dal dopoguerra, il nostro Paese si è trasformato da un'economia essenzialmente agricola a una industriale prima e di servizi poi. A partire dagli anni '60 e '70 gli italiani si sono dotati di automobile, telefono, radio, televisione, frigorifero, lavatrice e lavastoviglie, stereo e molti altri oggetti che ormai diamo per scontati se non, addirittura, obsoleti. Non si può non citare, però, quella che è ritenuta forse la più grande invenzione del XX secolo, il transistor, un piccolo circuito elettronico in grado di codificare l'informazione in modo binario, come 0 o 1. L'integrazione di milioni di transistor miniaturizzati in complessi circuiti elettronici permette di effettuare calcoli a una velocità semplicemente impensabile solo poche decine di anni fa e sta letteralmente rivoluzionando il mondo in cui viviamo. Ormai non c'è più apparecchio meccanico o elettrico minimamente sofisticato che non utilizzi circuiti elettronici per il suo controllo e funzionamento.



L'energia elettrica in particolare – oltre che mezzo necessario per compiere lavoro e far funzionare i dispositivi più disparati – si sta imponendo in modo pervasivo come vettore dell'informazione. Dalle grandi infrastrutture di controllo elettronico che permettono, per esempio, di gestire complesse reti di trasporto aereo e su rotaia, alle reti dei bancomat e delle carte di credito, alle cose più semplici come l'invio di posta elettronica, SMS e MMS, le videochiamate, l'iPod, le ricerche sui server informatici di Google e i contenuti multimediali caricati sui computer da YouTube, Facebook e Twitter: tutto questo – tanto per fare qualche esempio che non pretende certo, né potrebbe, essere esaustivo – presuppone che ci sia sempre disponibilità di energia elettrica, possibilmente a buon mercato.

Al contrario di quanto teorizzato con la “dematerializzazione”, la diffusione delle reti di comunicazione informatiche (e di quelle fisiche dei trasporti) ha finito non per diminuire, ma per aumentare i nostri consumi energetici e di conseguenza le emissioni di gas inquinanti e climalteranti. Una parte consistente di questi consumi sono addirittura inutili: infatti, il 50% dell'energia per alimentare i PC viene in genere sprecata in calore, un problema non trascurabile se si pensa che già nel 2008 c'erano oltre 1 miliardo di computer installati nel mondo. Se tutti i server informatici attualmente venduti negli Stati Uniti soddisfacessero i nuovi standard di efficienza energetica approvati a maggio del 2009 con il programma *Energy Star* dall'EPA, l'Agenzia per la Protezione Ambientale americana, si otterrebbe un risparmio sulle bollette di 800 milioni di dollari l'anno e si eviterebbero emissioni di gas climalteranti equivalenti a quelli di un milione di veicoli. Tenuto conto della tendenza ormai chiaramente in atto di trasferire in rete ogni sorta di contenuto informativo e multimediale, il numero di server per gestire questa spaventosa mole d'informazione crescerà vertiginosamente e con essi aumenteranno i consumi energetici.

I blackout che hanno colpito Stati Uniti e Canada nell'agosto del 2003 e, un mese dopo, l'Italia (nel nostro caso si trattò pateticamente di un albero che, cadendo sulla linea elettrica di interconnessione fra la Svizzera e il nostro Paese, innescò una reazione a catena di sovraccarico, e quindi di spegnimento, delle centrali in funzione quella notte) ci hanno ricordato quanto siamo dipendenti dall'energia. Senza energia non funziona più nulla, si ferma tutto, ri-  
piombiamo in un Medioevo in cui nessuno vuole tornare e in cui





putroppo si ritrova ancora la maggior parte delle popolazioni dei Paesi poveri.

Le aspettative di vita della popolazione dei Paesi occidentali sono cresciute costantemente nell'ultimo secolo e non sono mai state così alte nella storia dell'umanità grazie al miglioramento dell'alimentazione, delle cure sanitarie, del confort di vita: tutto questo non sarebbe stato possibile senza un accesso facile e a basso costo all'energia, ormai ritenuto un diritto inalienabile di tutti gli abitanti della Terra. Tenuto conto della limitatezza delle fonti energetiche attualmente disponibili e dei problemi ambientali generati dall'uso dei combustibili fossili, la vertiginosa crescita della domanda energetica sta ponendo le basi per quella che rappresenta senza dubbio la più grande sfida che l'umanità si trova ad affrontare e che dovrà aprire le porte a nuove forme di produzione e presumibilmente anche di organizzazione sociale a livello planetario.





# DOMANDA E OFFERTA DI ENERGIA

## 1. L'energia primaria

Il consumo di energia primaria (l'energia che non è stata sottoposta ad alcun processo di conversione o trasformazione) è quasi duplicato a livello globale in poco più di trent'anni passando, secondo le stime dell'International Energy Agency (IEA), da circa 6 miliardi di tonnellate equivalenti di petrolio (tep) nel 1973 a oltre 11 miliardi nel 2008, con una crescita media annua attorno al 2%. Negli ultimi dieci anni la crescita dei consumi è stata ancora maggiore e ha toccato picchi del 4,6%. Solo nel 2008 la crescita si è arrestata all'1,4% a causa dell'aumento del prezzo delle fonti di energia nella prima metà dell'anno e al crollo dei consumi e della produzione dovuto alla crisi economica globale nella seconda parte dell'anno.

Una buona parte dell'aumento dei consumi è dovuta ai Paesi in via di sviluppo. Nel 2006, per la prima volta il consumo di energia primaria nei Paesi non industrializzati (fuori dall'area OCSE, l'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico, che raccoglie 30 Stati membri, per la maggior parte Paesi sviluppati) ha superato quello nei Paesi industrializzati, trainato dalla crescita tumultuosa dei Paesi asiatici, in particolare Cina e India. Secondo le stime dell'International Energy Agency per il 2006 oltre l'80% dei consumi di energia primaria a livello globale deriva dai combustibili fossili e in particolare il 34% dal petrolio, il 27% dal carbone e il 20% da gas naturale. Il nucleare produce il 6% dell'energia primaria. Tra le fonti rinnovabili, l'idroelettrico contribuisce al 2,2%, biomasse e rifiuti al 10% e le altre rinnovabili al restante 0,8%.

Dopo aver scalzato il primato del carbone durato fino alla metà degli anni '60, il petrolio continua a far la parte del leone, anche se il suo contributo percentuale al soddisfacimento della domanda di energia primaria è andato via via diminuendo nel corso degli ultimi 30 anni a favore del gas naturale e nuovamente del carbone. Que-



st'ultimo, molto abbondante e poco costoso, è cresciuto considerevolmente nelle economie emergenti, nelle quali oggi contribuisce per più del 30%. Il gas naturale, più pulito ma anche più costoso, ha invece assunto un ruolo progressivamente maggiore soprattutto nei Paesi industrializzati (dove contribuisce per il 23%).

## 2. Le fonti esauribili (o non rinnovabili)

I combustibili fossili sono una fonte esauribile di energia primaria che si è generata in tempi geologici grazie a processi biologici. Nella gran parte dei casi, i giacimenti di carbone sono ricoperti da strati di rocce sedimentarie che si sono depositate con il passare del tempo. L'estrazione del carbone dalle miniere sotterranee è, come è noto, molto pericolosa per i minatori che ci lavorano per il rischio di crolli, di avvelenamento a causa dei gas e anche per l'inalazione continua di polveri. Le miniere sotterranee arrivano fino a un migliaio di metri di profondità. L'incidente di Marcinelle in Belgio, in cui morirono 262 minatori nell'agosto del 1956, avvenne appunto a 1033 m sotto la superficie. Le miniere a cielo aperto sono più facili da sfruttare e meno pericolose per i minatori, tuttavia comportano incredibili danni ambientali per l'emissione in atmosfera di polveri acide per la presenza di zolfo e per l'alterazione del paesaggio. È noto, per esempio, il caso delle miniere dei monti Appalachi sulla costa orientale degli USA, dove i giacimenti di carbone si trovano a profondità di circa 300 m sotto la vetta dei monti della catena e, per favorire l'estrazione, le cime sono progressivamente abbattute utilizzando degli esplosivi.

L'estrazione di petrolio e gas naturale avviene invece in modo diverso: il giacimento viene perforato da diversi pozzi per permettere al combustibile di fluire in superficie grazie alla differenza di pressione. Quando la pressione non è più sufficiente, petrolio e gas sono estratti tramite pompaggio. Infine, quando anche questo metodo non funziona più, è possibile iniettare nel giacimento gas (per esempio, anidride carbonica) per spingere fuori i combustibili (si veda anche la scheda "Diamoci da fare" del capitolo "Energia, effetto serra e cambiamenti climatici"). La difficoltà principale risiede nel sapere dove si trovano i giacimenti. A differenza del carbone, di cui è noto l'ambiente geologico di formazione, è difficile conoscere con una ragionevole precisione gli ambienti geologici in cui è probabile che si siano formati petrolio e gas, a causa della loro mobilità. L'uni-



ca prova definitiva si può ottenere solo tramite costose perforazioni esplorative. Le riserve più importanti di petrolio si trovano fino a 4000-4500 m di profondità, ma si stanno cominciando a sfruttare giacimenti, specialmente sottomarini (per esempio, nel Golfo del Messico) a profondità superiori ai 6000 m, metà dei quali di colonna d'acqua. Qui, invece del classico pozzo a traliccio che opera sulla terra ferma, si utilizzano grandi piattaforme ancorate o poggiate sul fondo oppure speciali navi.

Infine tra le fonti di energia esauribili va citato anche l'uranio, che è utilizzato nella produzione di energia tramite la reazione controllata di fissione dell'atomo. Secondo le stime dell'OCSE le riserve note di uranio sarebbero sufficienti, al tasso di consumo attuale, per i prossimi 85 anni.

### 3. Le riserve di combustibili fossili

Le riserve di combustibili fossili sono distribuite in modo poco uniforme e anzi risultano concentrate in poche aree geografiche del pianeta. Il 60% delle riserve di petrolio si trova nei Paesi del Golfo Persico (Tabella 1), che detengono anche il 41% delle riserve di gas naturale. Gli Stati Uniti possiedono grandi riserve di carbone, assieme ai Paesi asiatici, in particolare la Cina. La Russia possiede significative riserve di petrolio, ma soprattutto di gas (23%) e di carbone (19%). Una manciata di Paesi (quelli del Golfo Persico più Stati Uniti, Russia e Cina) controlla quindi la maggior parte delle riserve di combustibili fossili. L'Europa possiede riserve modestissime di gas e carbone e, con l'esclusione della Norvegia, è quasi priva di petrolio. Di conseguenza, per i propri approvvigionamenti l'UE dipende quasi interamente da altri Paesi, in particolare da quelli mediorientali per il greggio e dalla Russia per il gas.

Come abbiamo ricordato nel capitolo "Storia dell'energia", i maggiori esportatori di petrolio si sono associati nel 1960 nell'OPEC. I 14 Paesi che ne fanno parte possiedono il 78% delle riserve provate di petrolio e forniscono il 42% della produzione mondiale (dati relativi al 2007). Spesso dove c'è petrolio c'è anche gas naturale: i Paesi OPEC possiedono anche il 50% delle riserve di gas e ne estraggono il 17% a livello mondiale. Questo conferisce all'organizzazione un incredibile potere negoziale per contrattare con le compagnie petrolifere, per determinare le quote di produzione e, chiaramente, il prezzo di petrolio e gas.



Tabella 1. – Quota percentuale delle riserve di petrolio, gas naturale e carbone per area geografica del pianeta secondo i dati 2008 di BP ([www.bp.com](http://www.bp.com))

	Petrolio	Gas naturale	Carbone
Nord America	6%	5%	30%
Centro e Sud America	10%	4%	2%
Europa	1%	3%	5%
Russia	6%	23%	19%
Eurasia	4%	7%	9%
Paesi mediorientali	60%	41%	4%
Africa	10%	8%	0%
Area pacifico-asiatica	3%	8%	31%

I combustibili fossili sono una fonte disponibile in quantità limitata e quindi man mano che sono utilizzati diminuiscono le loro riserve globali: si tratta quindi di capire per quanto tempo saranno disponibili ai prezzi attuali. Si rincorrono da tempo voci e teorie sull'esaurimento del petrolio, alimentate anche dall'aumento del prezzo del barile di greggio nel 2008, come abbiamo visto nel capitolo precedente.

### 3.1 I differenti tipi di riserve di petrolio

Per capire quale sarà la disponibilità futura dei combustibili fossili è opportuno chiarire bene la differenza fra “risorsa” e “riserva”, e quindi tra riserve “provate,” “possibili” e “probabili”. Esistono diverse definizioni per ciascuna di queste categorie, pertanto ci riferiremo per il petrolio a quelle della Society of Petroleum Engineering e al World Petroleum Council. Con *risorsa* si intende l'intero stock di greggio (*oil in place*) presente in un intero bacino petrolifero, ovvero tutto il petrolio rimasto imprigionato in minuscole gocce non visibili a occhio nudo nelle rocce porose. Con *riserve provate* s'intende invece la quantità di petrolio che è ragionevolmente possibile (con un 90% di probabilità) estrarre con le tecnologie esistenti, a prezzi correnti e sotto le attuali condizioni politiche. Le *riserve probabili* sono quella parte dello stock di greggio di un bacino petrolifero che è possibile estrarre in modo red-

ditizio con una probabilità del 50%. Le *riserve possibili* sono quelle per cui le probabilità di recupero redditizio scendono al 10%. Una parte di un determinato stock può essere classificata come riserva possibile per la difficoltà d'interpretazione dei sondaggi geologici o per la difficoltà di estrazione con le tecnologie esistenti e ai prezzi correnti.

Delle convenzionali risorse di petrolio è quindi possibile portare in superficie solo una parte, il tasso di recupero si assesta storicamente attorno al 35%: questo significa che su 100 barili conosciuti se ne riescono a portare in superficie soltanto 35. Le compagnie petrolifere internazionali sono tenute a dichiarare solo le riserve provate di petrolio che detengono, pari soltanto all'8% del totale. La maggior parte delle riserve rimanenti è controllata direttamente dai Paesi in cui si trovano o indirettamente mediante le compagnie nazionali. Esistono molti dubbi sull'attendibilità delle stime di questi Paesi dal momento che non sono soggette a procedure di validazione. Negli anni più recenti, in particolare, sono emerse preoccupazioni da parte degli esperti sulla effettiva dimensione delle riserve provate nei Paesi del Golfo Persico, riserve che potrebbero essere in verità sensibilmente inferiori a quelle dichiarate.

Non è quindi opportuno prendere come riferimento una statistica singola, piuttosto è meglio guardare tutte quelle disponibili e confrontarne i dati. Nella Tabella 2 sono riportate le stime delle riserve provate di petrolio per area geografica secondo tre diverse fonti: la compagnia petrolifera britannica BP, l'agenzia governativa statunitense Energy Information Administration (EIA) e l'OPEC. Si vede che il valore complessivo è abbastanza simile per tutte e tre le fonti. La distribuzione per Paese varia invece molto e in particolare l'EIA stima un valore maggiore per le riserve del Nord America, includendo però nelle sue stime le sabbie bituminose in Canada: se sommiamo i 71 miliardi di barili del Nord America ai 150,7 stimati dalla BP per le sabbie bituminose canadesi, otteniamo un valore simile ai 212 miliardi di barili stimati dall'EIA. L'OPEC attribuisce un'importanza relativa maggiore alle riserve dei Paesi aderenti e fornisce invece una stima delle riserve in Nord America molto contenuta.

Secondo le stime della BP, se la produzione di petrolio in futuro restasse uguale a quella del 2008 (stimata in circa 81,2 milioni di barili al giorno), la vita utile delle riserve provate sarebbe di 42 anni. Secondo l'EIA la produzione globale di petrolio ammonta a

circa 85,5 milioni di barili al giorno, che corrispondono a una vita utile delle riserve di 43 anni. Allo stato attuale, secondo le statistiche rese disponibili dalle diverse fonti si ritiene che ci sia disponibilità di petrolio, ai prezzi correnti, per un periodo compreso fra i 40 e i 60 anni.

Si può aggiungere che, grazie all'innovazione tecnologica e ai miglioramenti nell'esplorazione, la stima della quantità di petrolio effettivamente recuperabile è andata sistematicamente aumentando negli ultimi 50 anni. Inoltre, come si diceva, la stima delle riserve provate non è statica ma dinamica, e può variare sensibilmente in funzione del miglioramento delle tecnologie di esplorazione e di estrazione e, in particolare, dei relativi costi. Al crescere dei prezzi del petrolio, aumenta quindi quella parte di riserve che può essere

*Tabella 2. – Riserve provate e proiezione della vita utile del petrolio per area geografica del pianeta*

Riserve provate di petrolio	BP			EIA		OPEC	
	miliardi di barili	% sul totale	vita utile (anni)	miliardi di barili	% sul totale	miliardi di barili	% sul totale
	2008	2008	2008	2008	2008	2007	2007
Nord America	71	6%	14,8	212*	16%	26	2%
Sud e Centro America	123	10%	50,3	110	8%	135	11%
Europa e Eurasia	142	11%	22,1	113	8%	144	12%
Medio Oriente	754	60%	78,6	748	56%	742	62%
Africa	126	10%	33,4	115	9%	120	10%
Asia e Pacifico	42	3%	14,5	34	3%	38	3%
<b>Totale</b>	<b>1.258</b>	<b>100%</b>	<b>42,0</b>	<b>1.332</b>	<b>100%</b>	<b>1.204</b>	<b>100%</b>
di cui: UE	6,3	1%	7,7				
OECD	88,9	7%	13,2				
OPEC	955,8	76%	71,1			<b>939</b>	<b>78%</b>
Non-OPEC £	174,4	14%	14,8				
ex-URSS	127,8	10%	27,2				
Sabbie bituminose Canada	150,7						

\* Comprese sabbie bituminose in Canada



classificata come “provata” e quindi recuperabile in modo redditizio a prezzi di mercato.

Un ulteriore elemento di incertezza nella stima delle riserve di petrolio è dato dalla scarsità delle esplorazioni tramite perforazioni, che in ultima analisi sono l'unico modo per stimare con ragionevole affidabilità il volume e l'estensione spaziale delle riserve. Nei Paesi del Golfo Persico, per esempio, l'esplorazione tramite perforazioni è stata fortemente scoraggiata dal basso costo del prezzo del petrolio nell'ultimo mezzo secolo (se si escludono, ovviamente, le due crisi petrolifere degli anni '70 che sono state però assorbite in tempi relativamente rapidi dal mercato). Fino a pochi anni fa, oltre il 70% delle perforazioni petrolifere era concentrata in Nord America dove è presente solo il 6% delle riserve mondiali. Fra il 1995 e il 2004 sono state realizzate quasi 16 mila perforazioni solo negli Stati Uniti, mentre nello stesso periodo sono stati perforati meno di 100 pozzi nell'intero Golfo Persico, che da solo detiene il 60% del petrolio mondiale. Negli anni '90, del resto, i Paesi produttori di petrolio non avevano motivo di aumentare ulteriormente la capacità produttiva potenziale, allora ampiamente superiore alla pur crescente domanda, per il timore di un ulteriore crollo di prezzi del greggio assestatosi su livelli già particolarmente bassi dalla seconda metà degli anni '80. La Russia sta scontando ancora l'arretratezza tecnologica e il Venezuela con la nazionalizzazione dell'industria petrolifera si è alienato il supporto tecnologico delle compagnie petrolifere occidentali per le esplorazioni e lo sfruttamento delle sue riserve. Solo in epoche di crisi le attività di perforazione petrolifera riprendono in modo significativo, come è effettivamente avvenuto nel 2008. Questo spiega perché c'è ancora tanta incertezza nella stima delle risorse effettivamente recuperabili.

A partire dal 2007 sono state introdotte due nuove classificazioni di riserva. Le *risorse potenziali* indicano le quantità di petrolio che, sebbene non ancora scoperte tramite sondaggi o pozzi, si stima che potrebbero esistere sulla base delle caratteristiche geologiche di un determinato sito o su ipotesi sulle dimensioni di giacimenti che devono ancora essere esplorati. Le *risorse non convenzionali* sono invece le quantità di petrolio che per essere utilizzate richiedono speciali tecnologie per l'estrazione e il trattamento, come l'uso di solventi o di vapore per estrarre petrolio dalle sabbie e scisti bituminosi. Diverse fonti ritengono che le risorse non convenzionali siano decisamente superiori alle riserve provate.





Con un consumo di petrolio pari a circa 30 miliardi di barili all'anno sembra quindi che ci sarà petrolio per buona parte di questo secolo. L'aumento del costo del petrolio fino alla metà del 2008 è da attribuire quindi non a timori sul suo esaurimento, quanto piuttosto a una serie complessa di ragioni fra cui la più influente è probabilmente l'assottigliamento della differenza fra la capacità produttiva a livello mondiale (stimata in circa 81-86 milioni di barili al giorno) rispetto alla domanda complessiva di circa 84,5 milioni di barili al giorno (in crescita di circa il 1,6% annuo negli ultimi decenni). Questo surplus produttivo è utilizzato per riequilibrare il mercato in caso di una temporanea riduzione o interruzione della produzione da parte di uno o più Paesi produttori, come è avvenuto con le crisi degli anni '70 o più recentemente a causa degli uragani nel golfo della Florida, dove sono presenti numerosi pozzi di estrazione *offshore* americani e alcuni grossi centri di raffinazione. Tanto più questa differenza fra capacità produttiva potenziale e consumi reali è piccola, tanto maggiore è la preoccupazione che il mercato non sia in grado di affrontare periodi anche limitati di crisi e quindi tanto più alti diventano i prezzi. Ciò si è verificato, per esempio, intorno al 2005, quando la crescita dei consumi mondiali di petrolio ha eroso una parte significativa della differenza fra capacità produttiva e consumi e i Paesi produttori si sono trovati parzialmente impreparati a soddisfare l'aumento della domanda.

Un secondo problema sta nel fatto che non tutti i greggi sono della stessa qualità, dal momento che possono contenere una frazione di idrocarburi pesanti più o meno elevata (tanto più è grande, tanto meno pregiato è il greggio) e di impurità, come lo zolfo, che ne riducono la qualità. Inoltre, i vari tipi di greggio non sono necessariamente compatibili con gli impianti di raffinazione che sono in grado di ricavare quantità differenti di prodotti leggeri (come benzine e nafta) e intermedi (come gasolio da riscaldamento e cherosene per aviazione), più pregiati rispetto a quelli più pesanti (come l'olio combustibile) e ai prodotti speciali derivati dai residui come bitume e lubrificanti. Quindi, può capitare che talvolta anche un'offerta abbondante, ma di bassa qualità, non soddisfi le necessità del mercato.

Gli investimenti nel settore della raffinazione sono stati esigui per buona parte della fine del XX secolo a causa dell'enorme sovraccapacità produttiva creata negli anni '70, ragion per cui l'industria petrolifera si è trovata in difficoltà a soddisfare la domanda energetica crescente nella prima parte del nuovo millennio. Non ultimo, hanno





giocato un ruolo non marginale nella crescita del prezzo del petrolio anche le speculazioni finanziarie sui mercati che fanno scommesse sulla crescita o diminuzione del prezzo futuro. Negli ultimi anni per ogni barile fisico di petrolio scambiato sul mercato, ci sono state diverse centinaia di barili virtuali (detti anche “barili di carta”) che hanno influenzato il prezzo del petrolio interferendo pesantemente con le strategie di copertura del rischio attuate dagli operatori commerciali.

### *3.2 Le riserve di gas naturale e di carbone*

Considerazioni analoghe valgono anche per il gas naturale e il carbone. Per quanto riguarda il gas naturale, secondo le stime della BP le riserve provate note alla fine del 2008 ammontano a 6534 milioni di miliardi ( $10^{12}$ ) di metri cubi. Se l'estrazione di gas in futuro restasse uguale a quella del 2008, queste riserve basterebbero per 60 anni.

Le riserve provate al 2008 di carbone ammontano a 830 miliardi di tonnellate (metà delle quali è antracite), che significa che le riserve sarebbero sufficienti per i prossimi 122 anni se si continuerà a estrarre carbone con lo stesso ritmo di questi ultimi anni.

Una sostanziale differenza rispetto al petrolio, però, è che gas e carbone hanno costi di trasporto molto superiori a quelli del petrolio, pari anche alla metà di quelli di estrazione. Questo è il motivo per cui mentre solo una piccola parte del petrolio viene consumata dai principali produttori del Golfo Persico e la maggior parte è esportata, nel caso del carbone buona parte della produzione è utilizzata nello stesso Paese in cui sono presenti i giacimenti, in particolare Cina e Stati Uniti, che infatti ne fanno un grande uso per la produzione di energia elettrica. Negli ultimi anni la Cina ha trainato la maggior parte della crescita dei consumi di carbone, diventando il maggior consumatore a livello mondiale con 1406 milioni di tep nel 2008, circa il doppio degli Stati Uniti, 5 volte di più dell'India e 10 volte di più della Russia.

Il trasporto del gas naturale è ancora più complesso tant'è che la produzione su scala industriale è esplosa solo quando si è sviluppata la tecnologia industriale per la realizzazione dei gasdotti e, in misura inferiore, degli impianti di liquefazione e rigassificazione. Per esempio, il gasdotto Greenstream, che unisce Italia e Libia, è lungo 530 km e permette di importare 8 miliardi di metri cubi di gas naturale l'anno; la sua costruzione nel 2004-2005 ha richiesto un investi-



mento di circa 7 miliardi di euro. In questo caso, le opere ingegneristiche sono state complesse dato che la condotta attraversa il Mar Mediterraneo e in alcuni tratti si trova a profondità di oltre 1000 m. In altri casi, tuttavia, le difficoltà sono di tipo politico poiché i lunghi tracciati dei gasdotti, che uniscono Paesi esportatori a Paesi importatori, attraversano aree politicamente instabili e giocano un importante ruolo negli equilibri di potere di vaste aree geografiche. Il progetto del gasdotto Nabucco, per esempio, prevede un percorso di 3300 km che collega Turchia e Austria (da cui poi il gas verrebbe distribuito al resto d'Europa) attraversando Bulgaria, Romania e Ungheria. Nabucco, che dovrebbe iniziare a funzionare nel 2011, permetterà di importare in Europa circa 31 miliardi di metri cubi l'anno provenienti dai gasdotti dell'Azerbaijan adesso collegati. L'obiettivo è di allargare il ventaglio dei Paesi fornitori di gas naturale, dato che alla partenza del gasdotto dalla Turchia avranno facile accesso soprattutto i Paesi del Medio Oriente oltre a Georgia, Kazakistan, Turkmenistan e altri Paesi ex sovietici.

Nel frattempo (agosto 2009) Turchia e Russia hanno sottoscritto un accordo per un progetto di gasdotto concorrente, il South Stream, che passerà nelle acque territoriali turche, in cambio della partecipazione dei russi alla realizzazione dell'oleodotto che collegherà il Mar Nero al Mar Mediterraneo. Preoccupazioni sono state sollevate da alcuni osservatori internazionali in quanto il South Stream potrebbe costare il doppio del Nabucco (stimato in 7,9 miliardi di euro) e aumenterà ulteriormente la dipendenza dell'Europa dal gas russo. Infatti, oggi il Paese fornitore di gas naturale più importante per l'Unione Europea è proprio la Russia che nel 2008 ha esportato nei Paesi dell'Europa circa 150 miliardi di metri cubi.

#### 4. Le fonti rinnovabili

A parte l'idroelettrico e le biomasse, le fonti di energia rinnovabile (eolico, solare termico, solare fotovoltaico, energia delle maree, geotermico) nel 2006 permettevano di soddisfare a mala pena l'1% dei consumi di energia primaria, nonostante la loro capacità produttiva sia potenzialmente enorme: se fosse possibile sfruttare ogni refolo di vento sulla superficie del pianeta, si potrebbe produrre energia 50 volte superiore a quella necessaria per soddisfare gli attuali consumi mondiali. L'energia della radiazione solare che raggiunge la Terra è enorme e sarebbe sufficiente utilizzarne meno del

2% per eliminare completamente la nostra dipendenza dai combustibili fossili e dal nucleare. In pratica questo però non è possibile per una serie di ragioni riconducibili, come vedremo nel capitolo “Le tecnologie per la produzione di energia”, alla natura intermittente della fornitura di energia di queste fonti rinnovabili, alla difficoltà di stoccare l’energia così prodotta in modo da poterla utilizzare dove e quando serve (per esempio, per i trasporti oppure per soddisfare i picchi di domanda e gli andamenti stagionali dei consumi), alle caratteristiche tecniche dell’attuale rete di distribuzione dell’energia elettrica nei Paesi industrializzati, che non è stata progettata per supportare una generazione distribuita dell’energia, alla mancanza di linee elettriche per collegare le aree geografiche dove la domanda è più alta (città, centri residenziali e industriali) con i luoghi più adatti alla produzione di energia da fonti rinnovabili (come i crinali delle montagne per l’eolico o le zone desertiche a forte insolazione per il solare fotovoltaico).

Non sono nemmeno trascurabili gli impatti ambientali legati alle grandi estensioni di campi eolici o solari che sarebbero necessari per produrre quantità significative di energia, soprattutto in un territorio come quello europeo e, ancor più, quello italiano, densamente abitato e di grande pregio storico-architettonico e naturalistico-paesaggistico. Oltre a tutto, il costo dell’energia da fonti alternative risulta in alcuni casi ancora non concorrenziale se non è supportato da opportuni incentivi pubblici, come nel caso del fotovoltaico. Grazie all’innovazione tecnologica e alle economie di scala legate all’aumento della produzione, il divario fra i costi dell’energia da combustibili fossili e fonti rinnovabili va tuttavia progressivamente diminuendo. Così nel caso dell’eolico, quando è realizzato in zone ad alta ventosità (per esempio, in nord Europa e in impianti in mare aperto), questo divario si è praticamente annullato.

Le fonti rinnovabili presentano generalmente una maggiore accettabilità sociale rispetto ai grandi impianti di generazione concentrata di energia, in particolare quelli che utilizzano carbone ed energia nucleare, e comportano in genere costi di investimento e tempi di realizzazione di gran lunga inferiori. Non è un caso che mentre la trasformazione di impianti termoelettrici da olio combustibile a carbone genera sempre grosse resistenze delle comunità locali, il tasso di crescita di eolico e solare negli ultimi tre anni è stato impressionante, di gran lunga superiore a quello di tutti i combustibili fossili. È opinione generalizzata che soprattutto nei



prossimi decenni le energie rinnovabili sono destinate a ritagliarsi un ruolo tutt'altro che marginale nei Paesi industrializzati e, in primo luogo, in alcuni Paesi dell'Unione Europea e in Nord America, dove saranno attuate aggressive politiche governative per favorire la loro penetrazione.

## 5. Come usiamo l'energia primaria

Abbiamo visto che i consumi di energia primaria sono molto elevati e che si tratta per la maggior parte di combustibili fossili. Il petrolio è utilizzato principalmente come combustibile nel settore dei trasporti, mentre la quota utilizzata per la produzione di energia elettrica negli anni è progressivamente diminuita: nel 1973 un quarto dell'energia era prodotta da petrolio, oggi la percentuale è scesa sotto l'8%. Il gas naturale è utilizzato sia per la produzione di energia elettrica, sia nel settore industriale, sia nel settore residenziale e dei servizi. Negli ultimi anni si è assistito a una crescita notevole dell'utilizzo del gas naturale nei Paesi OCSE, con un tasso di incremento del 4,5%, contro un incremento dell'1% circa dei consumi di energia. Il carbone, infine, è utilizzato principalmente per la produzione di energia elettrica e nelle industrie, soprattutto nei Paesi ricchi di questa risorsa.

Il petrolio rimane fondamentale soprattutto nel settore dei trasporti dove il suo utilizzo è in costante crescita per l'aumento generalizzato della motorizzazione su strada e dell'aviazione civile sia a livello globale, sia nelle economie emergenti e nei Paesi in via di sviluppo: nel 1973 il 45,4% dei 2,25 miliardi di tep per usi finali era assorbito proprio dai trasporti; nel 2006 questa percentuale era salita al 60%.

Gran parte dell'energia primaria è destinata alla produzione di energia elettrica. Nel 2006 l'energia elettrica prodotta a livello globale ammontava a circa 19.000 TWh (terawattora), prodotta al 41% da carbone, al 20% da gas naturale, al 6% da petrolio, al 15% dal nucleare, dal 16% dall'idroelettrico e per il rimanente 2% dalle altre fonti rinnovabili. Chiaramente il mix energetico per la produzione di energia elettrica varia molto da Paese a Paese. In Italia, la gran parte dell'energia elettrica è prodotta da gas naturale, ma anche l'idroelettrico ha un ruolo importante grazie ai numerosi bacini su Alpi e Appennini. In Francia quasi l'80% dell'energia elettrica è prodotta in centrali nucleari. Negli USA nucleare e carbone sono le fonti prin-



cipali: dei 4724 TWh/anno complessivi, ne producono rispettivamente 816 (19%) e 2128 (45%). In Cina il carbone è la fonte predominante, dato che è abbondante, economico e non ci sono legislazioni ambientali particolarmente stringenti sulle emissioni in atmosfera: 2301 TWh su un totale di 2716 sono prodotti da carbone (80%) e 436 dall'idroelettrico.

## 6. La distribuzione dei consumi

La distribuzione geografica dei consumi finali di energia è essenzialmente concentrata nei Paesi industrializzati, che, con una quota della popolazione che non supera il 20%, consumano quasi la metà dell'energia per usi finali (Tabella 3). Nel 2006 il 47% degli usi finali di energia era concentrato nei Paesi industrializzati (OCSE), l'8,1% in Russia, il 27% nei Paesi asiatici (15% solo in Cina), il 5,1% in America Latina e 5,6% in Africa. Della quota consumata dai Paesi industrializzati (3,8 miliardi di tep), circa la metà è da attribuire ai Paesi nordamericani, il 35% a quelli europei e il 15% a quelli dell'area del Pacifico.

Con una combinazione esplosiva di elevati tassi di crescita dell'economia e a una popolazione estremamente numerosa (gli abitanti di

*Tabella 3. – Popolazione mondiale (dati ONU) e consumi finali di energia (dati IEA) nel 2005 per area geografica*

Area geografica	Popolazione		Consumi finali	
	Milioni	%	Milioni tep	%
OCSE	1172	18,2	3937	48,7
Medio Oriente	187	2,9	340	4,2
Russia e Paesi ex sovietici	285	4,4	639	7,9
Europa fuori area OCSE	54	0,8	73	0,9
Cina	1311	20,4	1148	14,2
Asia (Cina esclusa)	2080	32,3	913	11,3
America Latina	449	7,0	404	5,0
Africa	894	13,9	453	5,6
Trasporto internazionale via nave	-	-	178	2,2
<b>Totale</b>	<b>6432</b>	<b>100%</b>	<b>8084</b>	<b>100%</b>



Cina e India ammontano a 2,5 miliardi), i mercati emergenti stanno assumendo un ruolo da protagonisti nel panorama internazionale dei consumi energetici. Tuttavia proprio l'altissimo numero di abitanti mantiene i loro consumi energetici pro capite, se pur in crescita, decisamente inferiori a quelli dei Paesi industrializzati. Nel 2006, a fronte di un consumo medio di 1,8 tep/abitante a livello mondiale, la Cina aveva un consumo di 1,44 tep/abitante e l'India di 0,51. Nei Paesi industrializzati dell'area OCSE il consumo pro capite medio nel 2006 era di 4,70 tep, in Italia di 3,13 e negli Stati Uniti di 7,44 tep. Se si guarda poi all'energia elettrica, il divario aumenta ulteriormente: il consumo pro capite negli Stati Uniti è cinque volte superiore alla media mondiale, quello dell'Italia 2,2 volte più grande, quello della Cina e dell'India rispettivamente del 20% e dell'80% inferiore.

## 7. La crescita della domanda energetica mondiale

Nonostante una progressiva diminuzione dell'intensità energetica (l'energia necessaria per produrre ogni euro del PIL di una nazione) dei principali Paesi industrializzati, l'Agenzia Internazionale dell'Energia ritiene che la domanda energetica mondiale sia destinata a continuare la sua crescita nei prossimi 20 anni fino a superare del 50% i consumi attuali. La crisi economica che si è abbattuta su tutti i mercati fra il 2008 e il 2009 rallenterà verosimilmente questa crescita, ma, come spesso è avvenuto in passato, sarà prima o poi riassorbita e la domanda energetica tornerà a crescere rapidamente.

Si è già detto che una parte significativa di questa crescita è da imputarsi allo sviluppo economico-industriale dei mercati emergenti, in particolare quelli dell'area pacifico-asiatica. Ulteriori fattori che determinano l'incremento costante della domanda di energia sono l'aumento demografico – in particolare nei Paesi in via di sviluppo – e il fenomeno dello spostamento di quote significative della popolazione dalle aree rurali ai centri urbani. I consumi energetici pro capite in aree urbanizzate ad alta densità abitativa sono per loro natura superiori a quelli delle zone rurali, dove permane un'economia essenzialmente di sussistenza. L'ONU ritiene che proprio in questi anni, per la prima volta nella storia, la popolazione urbana abbia superato quella rurale. La globalizzazione dei mercati e delle economie comporta, inoltre, una crescita della domanda energetica nel settore del trasporto stradale e aereo di merci e persone, un fenomeno che



interessa parimenti i Paesi industrializzati e quelli in via di sviluppo. Nei Paesi industrializzati l'era digitale (anche detta della "dematerializzazione" a causa dell'uso pervasivo di reti informative elettroniche, che hanno eliminato i componenti fisici di moltissimi processi) ha provocato un aumento del consumo di elettricità per alimentare tutti i dispositivi elettronici di cui facciamo direttamente o indirettamente uso.

Secondo l'Agenzia Internazionale dell'Energia, se nei prossimi 25 anni la domanda complessiva dei Paesi in via di sviluppo dovesse triplicare, scenario che appare tutt'altro che irrealistico (raggiungendo così un terzo dei consumi medi pro capite dei Paesi sviluppati), il fabbisogno energetico globale risulterebbe pari a circa 17 miliardi di tep (17 Gtep), di cui più del 50% destinato agli odierni Paesi in via di sviluppo (a fronte dell'attuale quota del 20%). Anche secondo le stime dell'ONU, se l'uso di energia primaria nel mondo dovesse continuare ad aumentare seguendo il ritmo attuale, i consumi energetici raggiungerebbero nel 2035 i 17 Gtep (il doppio rispetto a 8,8 Gtep del 1998) e i 26 Gtep nel 2055. Secondo gli scenari sviluppati dalla Agenzia Internazionale dell'Energia, i combustibili fossili rimarranno la fonte di energia dominante almeno fino al 2030, tanto che in questo scenario contribuiranno con l'83% all'aumento di energia primaria. Questi scenari prevedono inoltre che:

- il contributo relativo del petrolio diminuisca, pur continuando a prevalere sul mix di energia primaria;
- il contributo del carbone aumenti prevalentemente in Cina e India (quattro quinti della domanda globale di carbone) dal momento che questi Paesi ne possiedono abbondanti riserve;
- il contributo del gas naturale aumenti, anche se con tassi inferiori a quello degli anni recenti, soprattutto a causa dei prezzi elevati e delle difficoltà di trasporto attraverso liquefazione o gasdotti;
- il contributo percentuale dell'idroelettrico diminuisca leggermente;
- il contributo del nucleare diminuisca, anche se questa partita rimane ancora parzialmente aperta, soprattutto nei mercati emergenti, dove la domanda energetica per sostenere i processi di industrializzazione è altissima e le resistenze sociali alla realizzazione di impianti nucleari di produzione di energia elettrica sono inferiori rispetto ai Paesi industrializzati;

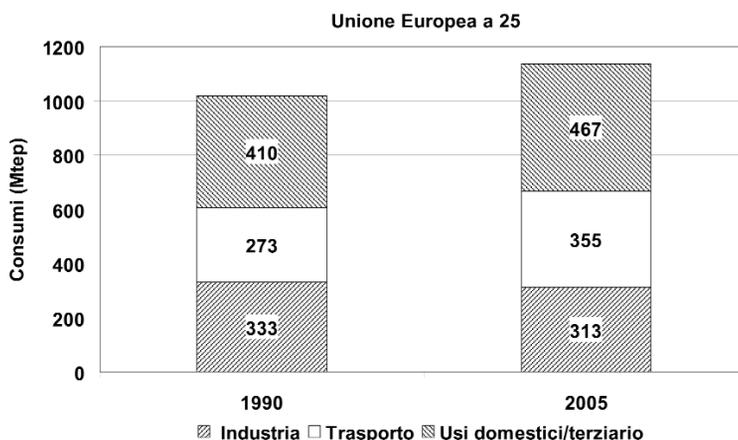
- il contributo delle biomasse diminuisca leggermente soprattutto nei Paesi in via di sviluppo che potrebbero utilizzare tecnologie di trasformazione più moderne;
- il contributo delle altre fonti rinnovabili – eolico, solare e geotermico – avrà la crescita maggiore, ma partendo da un contributo molto modesto al mix globale continueranno a contribuire poco, almeno nel breve periodo, se non in alcuni Paesi, come la Norvegia e parzialmente la Germania, che hanno deciso di investire in queste fonti alternative considerate settore strategico d'innovazione tecnologica e di riduzione della dipendenza dall'estero per l'approvvigionamento energetico.

## 8. Il contesto europeo

La regione dell'Unione Europea a 25 Stati (UE-25) è la maggiore consumatrice di energia dopo gli Stati Uniti: la domanda di energia primaria è aumentata di circa lo 0,8% all'anno tra il 1990 e il 2004 ed è stata soddisfatta tramite l'uso di petrolio (37%), gas naturale (24%), nucleare (15%) e carbone (18%). Le fonti rinnovabili sono cresciute del 5,7% tra il 2005 e il 2006, arrivando a soddisfare il 9,2% della domanda. La dipendenza energetica dei Paesi dell'UE-25 nel 2006 era di circa 54%.

I consumi finali di energia sono aumentati del 12% dal 1990 al 2005, principalmente per l'aumento (circa 30%) della domanda di energia per i trasporti (Figura 1). I consumi del settore industriale, invece, sono diminuiti del 6% sia per un aumento dell'efficienza energetica (anche l'intensità energetica è diminuita, soprattutto nei Paesi della zona euro), sia per lo spostamento verso un'economia più orientata ai servizi.

Secondo le previsioni della Commissione Europea, con le politiche intraprese fino al 2004 il consumo di energia totale nell'UE-25 continuerà ad aumentare fino al 2030 (+15% rispetto al 2000). L'aumento dei consumi diminuirà nel tempo, fino a stabilizzarsi attorno al 2020, riflettendo la modesta crescita economica e la stabilizzazione della popolazione. L'aumento di 240 Mtep dal 2000 al 2030 dei consumi di energia sarà soddisfatto principalmente da gas naturale (dovrebbe aumentare di 140 Mtep) e dalle fonti rinnovabili, che aumenteranno in termini relativi più di tutti gli altri combustibili, mentre il consumo di petrolio, pur rimanendo il maggiore, non dovrebbe superare il livello attuale.



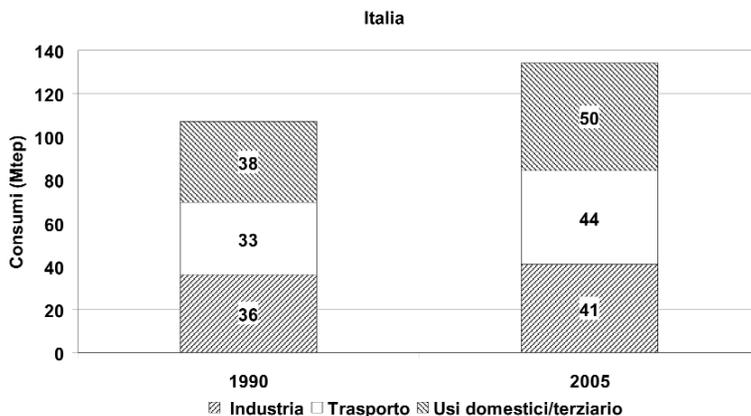
**Figura 1.** Consumi finali di energia per settore nei Paesi UE-25 (dati Eurostat, 2007).

## 9. Il contesto italiano

La domanda di energia negli scorsi 20 anni è aumentata anche in Italia soprattutto nel settore del trasporto e in quello domestico, mentre è rimasta sostanzialmente costante nel settore industriale (Figura 2). Gli usi termici, che rappresentano la grande maggioranza (92%) di tutti gli usi domestici e il 54,2% della richiesta complessiva, sono soddisfatti attingendo a fonti non rinnovabili: in particolare, gasolio e metano. È però ancora abbastanza diffuso l'impiego, di certo non tra i più efficienti, di dispositivi elettrici per generare calore a bassa e media temperatura.

Maggiori efficienze potrebbero essere raggiunte nell'attuale sistema di produzione di energia elettrica, basato per la quasi totalità sull'impiego di combustibili fossili: i rendimenti di trasformazione sono circa il 35% per le centrali tradizionali e il 55% per le centrali a ciclo combinato. Oltre il 70% dell'energia elettrica è generata con un ciclo termoelettrico. I dati Eurostat 2008 mostrano che la produzione di energia elettrica nel 2006 derivava prima di tutto dal gas naturale (164 TWh), quindi dal petrolio e dagli oli combustibili (46 TWh) e, infine, dal carbone (44 TWh).

Uno dei dati più rappresentativi è quello delle importazioni di energia primaria, pari all'84,7% circa dei consumi secondo il Rapporto ENEA Energia e Ambiente del 2004: in particolare i prodotti petro-



**Figura 2.** Consumi finali di energia per settore in Italia (dati Eurostat, 2007).

liferi (provenienti per lo più dai Paesi del Medio Oriente e del Nord Africa) rappresentano il 54% delle importazioni complessive, seguiti da gas naturale (30%, di origine soprattutto russa e algerina), combustibili solidi (8%) ed energia elettrica (7%).

L'analisi della dipendenza energetica evidenzia come i settori maggiormente esposti a questa situazione siano la generazione di elettricità e i trasporti, che non possono prescindere dalla risorsa petrolio. Di conseguenza, l'Italia è inevitabilmente esposta alle fluttuazioni del prezzo dei combustibili fossili. Anche a livello nazionale appare giustificato il crescente interesse verso le prospettive di sviluppo offerte dalle fonti rinnovabili, in grado di fornire soluzioni concrete e locali ad alcune problematiche dell'attuale panorama energetico.

## DIAMOCI DA FARE

### I distretti eco-industriali

La produzione di combustibili fossili e il consumo di energia avvengono nella maggior parte dei casi in luoghi separati. I distretti eco-industriali sono invece agglomerati di imprese e utenze i cui processi produttivi sono tra loro collegati in modo tale che ci sia uno scambio diretto di materie prime, sottoprodotti ed energia. In questi distretti le imprese collaborano tra loro e con la comunità locale con l'obiettivo di ridurre gli impatti ambientali tramite la diminuzione dei rifiuti complessivamente generati e il risparmio nell'approvvigionamento delle materie prime e risorse naturali.

Un distretto eco-industriale molto grande e famoso è quello di Industrial Symbiosis, a Kalundborg in Danimarca ([www.symbiosis.dk](http://www.symbiosis.dk)), operativo da circa

trent'anni. Qui si trova un impianto termoelettrico di potenza pari a 1.500 MW alimentato a carbone. Il calore di scarto dell'impianto è distribuito a circa 3500 utenze della città vicina tramite una rete di teleriscaldamento; lo stesso calore serve anche per scaldare le vasche di un allevamento ittico nelle vicinanze. I depositi fangosi dell'allevamento di pesci sono venduti come fertilizzante. La centrale a carbone fornisce anche vapore a un'industria farmaceutica e a una raffineria. La torre di lavaggio (scrubber) per la rimozione di anidride solforosa della centrale a carbone accumula gesso, venduto a un'industria produttrice di cartongesso che soddisfa in questo modo la quasi totalità del suo approvvigionamento. Infine, le ceneri residue della combustione del carbone sono utilizzate per la pavimentazione delle strade e nelle sabbie per i cementi. Riassumendo, i benefici ambientali (ma anche economici) sono la riduzione dell'utilizzo di combustibili fossili per il riscaldamento, per la produzione di vapore e di fertilizzanti; la riduzione dell'inquinamento dovuto all'immissione di acqua calda nel fiordo; la riduzione degli scavi nelle miniere di gesso. Uno schema semplificato delle interazioni tra le varie industrie e servizi del distretto è riportato in Figura 3. In questo caso, la simbiosi instauratasi tra la centrale e le industrie vicine si è evoluta spontaneamente nel tempo, seguendo la legislazione ambientale, diventata man mano più stringente, e la crescita dei costi delle materie prime. Oggi invece si iniziano a pianificare distretti eco-industriali con lo scopo dichiarato di localizzare vicine industrie che possono beneficiare l'una dell'altra.

Un esempio in questo senso è un birrificio canadese che è stato progettato con l'obiettivo di minimizzare gli impatti sull'ambiente. Un birrificio tradizionale, infatti, oltre alla birra produce anche abbondanti scarti, tutti di origine organica, come quelli dei cereali utilizzati, ricchi di nutrienti e proteine, che in gran parte

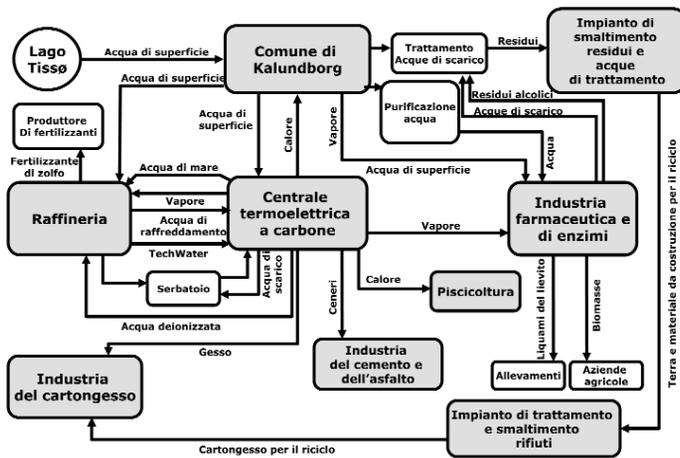


Figura 3. Schema delle relazioni tra i processi industriali attivi nel distretto eco-industriale di Kalundborg in Danimarca.

restano inutilizzati. Il loro uso come mangime negli allevamenti non è indicato proprio per l'elevata concentrazione di nutrienti e proteine che rendono il mangime difficile da digerire. Il birrifico Storm Brewing di Newfoundland ([www.zerri.org](http://www.zerri.org)) in Canada è stato progettato per utilizzare questi scarti come materia prima di altre produzioni. I residui dei cereali sono utilizzati come substrato per la coltivazione di funghi e in una seconda fase, divenuti più adatti all'alimentazione animale, sono forniti come mangime agli allevamenti. I reflui zootecnici degli allevamenti, insieme all'acqua utilizzata nel birrifico, alimentano un digestore anaerobico per la produzione di biogas (una miscela di metano e biossido di carbonio) che è utilizzato per generare energia elettrica in motori. Il digestato, cioè il residuo del processo di digestione anaerobica ricco di nutrienti, è utilizzato in una vasca come substrato per la coltivazione di alghe che successivamente sono usate come mangime in un allevamento di pesci. Questo esempio di buona pratica è sicuramente inferiore come dimensione rispetto all'esempio danese. Tuttavia è un sistema molto efficace ed è stato riprodotto in numerosi birrifici in Germania come in Namibia.

## FACCIAMO I CONTI

### Il picco del petrolio

Per capire come sarà l'evoluzione dell'estrazione e del consumo del petrolio (e di qualunque altra risorsa fossile e non rinnovabile) partiamo da alcune ipotesi molto semplici. Immaginiamo che sotto di noi si trovi un enorme serbatoio di petrolio, tutto della stessa qualità, e che ogni anno si tenda ad aumentarne l'estrazione per soddisfare una domanda crescente e il costo di estrazione divenga sempre più elevato, perché il serbatoio si svuota progressivamente e quindi è necessario estrarre il petrolio a profondità sempre maggiori.

Se definiamo  $P(t)$  la quantità totale di petrolio estratta fino all'anno  $t$  (per esempio, fino all'anno 2000) potremo scrivere che quella che verrà estratta fino all'anno  $(t+1)$  sarà pari a:

$$P(t+1) = aP(t) - Bc(t)P(t)$$

dove  $a$  è un coefficiente maggiore di 1 che rappresenta l'aumento della richiesta,  $B$  è un altro coefficiente che dice quanto l'estrazione diminuisce all'aumentare del costo di estrazione  $c(t)$ . Quest'ultimo è, a sua volta, dato dal prodotto di un coefficiente  $\gamma$  per il petrolio estratto  $P(t)$ , poiché, come detto sopra, il costo di estrazione diventa sempre più elevato man mano che il serbatoio si svuota, cioè  $P(t)$  cresce. In sintesi abbiamo quindi che:

$$P(t+1) = aP(t) - B\gamma P^2(t)$$

dove i coefficienti dipenderanno dalla specifica risorsa che prendiamo in considerazione e quindi andranno fissati in modo da far sì che l'andamento calcolato in questo modo si avvicini il più possibile a quello che effettivamente è sta-

to rilevato in pratica. Ogni anno si utilizzerà quindi una quantità di risorsa pari a:

$$P(t + 1) - P(t) = -\beta\gamma P^2(t) + (a - 1) P(t)$$

che possiamo riscrivere

$$P(t + 1) - P(t) = -a P^2(t) + b P(t)$$

e il picco di consumo di risorsa si avrà quindi nell'anno in cui  $P(t+1) - P(t)$  sarà massimo. Poiché questa differenza è rappresentata da una parabola nella variabile  $P(t)$ , ci basterà calcolare dov'è il vertice della parabola stessa. Tale vertice rappresenterà infatti il punto di massimo, perché il termine quadratico ha coefficiente negativo e quindi la parabola è rivolta verso il basso. Quindi il vertice avrà un valore

$$P(t + 1) - P(t) = b^2/(4a)$$

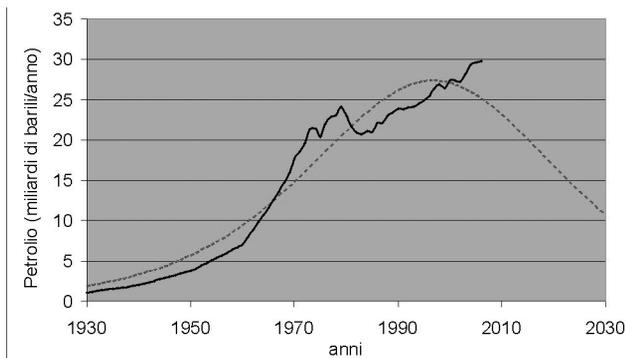
che corrisponderà al picco di consumo del petrolio.

Utilizzando dati standardizzati (cioè divisi per 30 miliardi di barili/anno in modo da avere risultati compresi tra 0 e 1) risulta che, con  $a=0,00105$  e  $b=0,062$ , la nostra equazione è abbastanza simile ai valori storicamente rilevati e si ottiene quindi un picco di consumo pari a 27 milioni di barili/anno che, secondo il nostro modello, sarebbe stato raggiunto poco prima del 2000. Da lì in poi, la produzione dovrebbe declinare.

La Figura 4 rappresenta l'andamento previsto nelle nostre ipotesi e i dati di produzione effettivamente rilevati. Naturalmente la realtà è abbastanza diversa dalle nostre ipotesi (infatti il grafico dei dati reali ha continuato a crescere). Il petrolio non è tutto uguale, i costi di estrazione differiscono nei diversi luoghi e cambiano nel tempo a causa dello sviluppo delle tecnologie, il costo è determinato sia dall'estrazione vera e propria, sia dalla ricerca di nuovi giacimenti, la domanda varia molto nel tempo e quindi anche l'interesse delle compagnie a estrarre effettivamente il petrolio. Ciò causa le notevoli fluttuazioni di prezzo a cui assistiamo continuamente e che quindi potrebbero essere meglio interpretate non considerando soltanto lo stock del petrolio come abbiamo fatto qui.

Tuttavia sono ragionamenti simili a quelli precedenti che hanno condotto il geologo americano Marion King Hubbert a formulare nel 1956 la sua famosa teoria del "picco del petrolio", che prevedeva un massimo della produzione negli anni tra il 1965 e il 1970. Da allora la teoria ha suscitato un amplissimo dibattito che è tuttora in corso. I critici ne hanno messo in luce la scarsa capacità previsionale, in quanto il petrolio è fatto dipendere solo da se stesso e non dal resto dell'economia, mentre i fautori rilevano come si adatti bene a risorse che si sono effettivamente esaurite: per esempio, il carbone della Pennsylvania esaurito attorno al 1975. In effetti, il petrolio è così intimamente legato al complesso della nostra so-

cietà, che è impossibile prevederne precisamente l'evoluzione senza aver capito a fondo i meccanismi complessivi della nostra economia, e questo, come episodi recenti hanno dimostrato, sembra un obiettivo ancora molto lontano.



**Figura 4.** La linea tratteggiata rappresenta l'andamento previsto nelle nostre ipotesi e quella continua i dati di produzione effettivamente rilevati.

## DOCUMENTIAMOCI

***Il petroliere (There Will Be Blood).*** Regia di Paul Thomas Anderson con Daniel Day-Lewis, Paul Dano, Kevin J. O'Connor. USA 2007.  
Un film, ambientato negli USA, che ha come protagonista il petrolio.

**Émile Zola. *Germinale*,** Einaudi, 2005.  
Romanzo ambientato nell'Ottocento francese, che narra le vicende di un minatore di carbone, inquadrando la condizione sociale dell'epoca.

### **www.aspoitalia.it**

Sito dell'Associazione per lo Studio del Picco del Petrolio. ASPO riunisce scienziati e ricercatori impegnati sulla questione dell'esaurimento delle risorse, in particolare di quelle petrolifere. Sono spiegate in dettaglio le teorie del geologo Hubbert sul picco del petrolio.

### **www.bp.com**

Sito della compagnia petrolifera British Petroleum. Ogni anno viene pubblicato il volume *Statistical Review of World Energy* che contiene numerosi dati aggiornati riguardo alle riserve e alla produzione di combustibili fossili per Paese.

### **www.eia.doe.gov**

Sito dell'agenzia del governo USA che ha il compito di raccogliere e organizzare dati sull'energia a livello nazionale e globale. Ci sono interessanti dati sulle ri-



serve di combustibili fossili, sulla produzione dei giacimenti e sul consumo, sulla produzione e consumo dell'energia elettrica.

**[www.iea.org](http://www.iea.org)**

Sito della International Energy Agency, con notizie, discussioni e statistiche su tutti i problemi dell'energia. Si possono mappare indicatori di produzione, consumo ed emissioni a scala globale e trovare dati sul singolo Paese. I dati recenti sono a pagamento.

**[www.indigodev.com](http://www.indigodev.com)**

Sito della Indigo Development, società di consulenza che supporta l'organizzazione e la costruzione di distretti eco-industriali. Sul sito si possono trovare alcuni progetti realizzati.

**[www.terna.it](http://www.terna.it)**

Sito di Terna-Rete Elettrica Nazionale S.p.A, la società responsabile della trasmissione e del dispacciamento dell'energia elettrica sulla rete ad alta e altissima tensione su tutto il territorio italiano. Dal sito si possono scaricare molte statistiche su produzione, impianti, combustibili e consumi di energia elettrica. Il primo dato è la produzione di 0,7 GWh nel 1883!







## LE TECNOLOGIE PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA

La storia dell'energia può essere letta come progressivo allontanamento o, come talora si dice, disaccoppiamento tra la produzione di energia e il suo consumo. Per la verità, come abbiamo già detto, più che di produzione si dovrebbe parlare di conversione dell'energia, in quanto l'attività dell'uomo si limita sostanzialmente a modificare la forma dell'energia disponibile in natura per renderla più adatta ai propri bisogni.

Come abbiamo visto nel capitolo "Misurare l'energia e le fonti energetiche", il parametro più importante di tutti i sistemi di conversione dell'energia è il rendimento che valuta il rapporto tra l'energia in uscita dal sistema rispetto a quella immessa. Va rilevato che questo rapporto non è una costante che dipende solo dal combustibile e dalla tecnologia di conversione, ma dipende anche dall'energia erogata in ogni istante, cioè dalla potenza. Tutti sanno, per esempio, che per uno dei più diffusi e conosciuti convertitori di energia, il motore a scoppio delle nostre auto, ha dovuto essere inventato un dispositivo, il cambio, che consente di mantenere entro un certo campo di valori la potenza erogata senza legarla in modo diretto alla velocità del mezzo, così che il rendimento risulti relativamente costante e il più elevato possibile (e comunque il rendimento del motore a scoppio è decisamente più basso di altri sistemi di conversione).

Qualche considerazione specifica va riservata all'energia elettrica, di gran lunga la forma di energia che più condiziona la nostra vita quotidiana per la sua estrema flessibilità (può essere convertita facilmente in energia meccanica e in energia termica) ed è alla base di tutti i sistemi di elaborazione e trasmissione delle informazioni, dal telefono al computer.

L'energia elettrica è caratterizzata da basse perdite per il trasporto (se la trasmissione avviene in corrente alternata e a elevato voltaggio) e dalla sostanziale impossibilità di stoccaggio. Un ulteriore fatto da tenere presente è che il rendimento delle centrali di produzio-





ne cresce abbastanza rapidamente con la loro taglia ed è quindi conveniente, almeno da questo punto di vista, costruire centrali di grandi dimensioni. In particolare è l'impossibilità di immagazzinare l'energia elettrica in quanto tale che ha determinato la struttura di quel sistema estremamente complesso che è attualmente la rete elettrica, forse una delle realizzazioni più sofisticate della tecnologia moderna. L'elettricità è una forma di energia che si può praticamente usare in ogni luogo, grazie alla ramificazione della rete di trasporto, ma va prodotta nell'istante in cui viene utilizzata. Chiunque, in tutta Europa (ma la rete elettrica si estende anche al di là dei confini continentali), ha "diritto" in qualunque istante di accendere una lampadina, un televisore, un computer. Nell'ambito di una certa potenza massima garantita, ciò significa che, da qualche parte, una centrale deve produrre più energia.

Poiché quasi tutti abbiamo l'abitudine di studiare/lavorare/divertirci più di giorno che di notte (o quanto meno di lavorare di più di giorno e di divertirci di notte, ma con un minor consumo di elettricità), ciò crea dei "picchi" di domanda verso la metà della mattina e verso le 16 per poi calare a valori quasi nulli verso le 3 o le 4 del mattino. Questo andamento (*pattern*) giornaliero si modifica poi nel corso dell'anno. Per esempio, i consumi per illuminazione aumentano nelle giornate buie d'inverno e quelli per l'aria condizionata in quelle più calde d'estate. Le centrali di produzione dell'energia elettrica devono quindi far fronte sia ai consumi "di base", cioè quelli che rimangono costanti nel tempo, sia a quelli di picco e, anzi, a questi ultimi devono essere in grado di rispondere molto rapidamente, con cambi di produzione e di ripartizione del carico tra le diverse centrali e le linee di trasmissione.

A complicare ulteriormente il problema, come vedremo più avanti nel capitolo, c'è il fatto che, per ottenere il massimo rendimento dalle centrali che utilizzano il calore per la produzione di energia elettrica, è utile riutilizzare per quanto possibile anche il calore che andrebbe disperso e inutilizzato. Ciò richiede una rete di distribuzione anche per il calore. Anche la domanda di calore ha la sua variabilità, che non coincide esattamente con quella del carico elettrico. Infatti, la rete del calore è utile soprattutto in inverno (anche se in parte può essere utilizzata tutto l'anno se ci sono industrie che lo richiedono).

Nel capitolo esamineremo rapidamente le principali tipologie di combustibili e di centrali per la produzione di energia elettrica e ter-





mica e ci concentreremo poi sulle fonti rinnovabili, cioè sulle forme di conversione più sostenibili in cui l'energia può essere rigenerata in tempi comparabili a quelli del suo utilizzo. Al contrario le fonti fossili, come abbiamo già visto, sono attualmente sfruttate con un'intensità enormemente superiore a quella con cui sono rigenerate dai naturali processi biochimici del pianeta.

## 1. Le centrali termoelettriche e termonucleari

La stragrande maggioranza dell'energia oggi impiegata nel mondo è energia chimica dei combustibili fossili che viene convertita in energia termica attraverso la combustione, un processo di ossidazione molto rapido con l'ossigeno dell'atmosfera, che è il "comburente". L'energia atomica è generata attraverso un processo diverso, la fissione degli atomi durante la quale una piccola quantità di massa si trasforma in energia secondo la famosa relazione dovuta a Einstein, ma sostanzialmente anche in questo caso il prodotto utilizzato è energia termica, come avverrà anche nel futuro se si passerà a reattori basati sulla fusione nucleare invece che sulla fissione. In ogni caso quindi, abbiamo a che fare con "centrali termiche" che differiscono per il combustibile usato e per la tecnologia con cui poi utilizzano il calore generato dal combustibile, ma che operano comunque attraverso un processo termodinamico.

Il calore è utilizzato per riscaldare in una caldaia un fluido, gas o vapore, che, espandendosi rapidamente, esercita una pressione su un organo meccanico per ottenere alla fine un movimento rotatorio. Tutti sanno che, nei motori a scoppio, così come nelle vecchie locomotive a vapore, il fluido, miscela di aria e benzina nel primo caso, vapore nel secondo, spinge un pistone che, attraverso un sistema di bielle e manovelle, fa ruotare un albero motore a cui sono collegate le ruote. Nelle centrali elettriche l'organo rotante è invece una turbina, come nei motori dei jet, alla quale è collegato un alternatore che produce l'elettricità. Di solito poi, l'uscita dell'alternatore passa attraverso uno o più trasformatori per elevarne la tensione (anche fino a 500.000 V) e ridurre così le perdite dovute al trasporto lungo le linee.

Abbiamo dunque in ingresso l'energia chimica (o nucleare) del combustibile che nella centrale è trasformata in energia termica, che a sua volta si trasforma in energia meccanica e infine quest'ultima in energia elettrica. È chiaro che, durante ciascuna di queste trasfor-



mazioni una parte dell'energia va dispersa (in generale, sotto forma di calore) e non è completamente trasformata. Il rendimento complessivo della centrale è quindi il prodotto dei rendimenti delle varie fasi e, dato che ciascuno di essi è certamente minore di 1, non può essere più elevato del più basso tra i rendimenti stessi. È dunque importante che tutti i rendimenti siano tenuti più alti possibile e in nessuna delle fasi ci siano perdite rilevanti.

La fase più critica è la trasformazione dell'energia termica in energia meccanica, perché il ciclo termodinamico (cioè la serie di trasformazioni che il gas o il vapore subisce) deve necessariamente prevedere la cessione a una "sorgente fredda" dell'energia termica inutilizzata, in modo che il fluido possa poi essere nuovamente riscaldato e quindi espandersi e continuare a produrre il movimento. Il rendimento del ciclo è tanto più elevato quanto più la temperatura alla quale il fluido è riscaldato e quella della sorgente fredda sono lontane, ma evidenti ragioni pratiche impediscono di lavorare con fluidi troppo caldi e non è facile trovare sorgenti fredde a temperature molto basse. Ciò limita, anche dal punto di vista teorico, il rendimento di questa fase (e quindi il rendimento complessivo) per cui è impossibile andare al di là di circa il 50%. Un caso molto comune è quello in cui si utilizza l'acqua di un fiume, di un lago o del mare come sorgente fredda a cui cedere calore. Per questo motivo le centrali termoelettriche si trovano quasi sempre nei pressi di un corpo idrico. Il risultato della trasformazione è quindi, per la maggior parte, calore che viene ceduto all'acqua o all'aria.

Per quanto riguarda i combustibili, come si è detto nei capitoli iniziali, in Italia e in molte parti dell'Europa, le centrali elettriche che utilizzavano olio combustibile e gasolio sono state in larga parte sostituite da centrali alimentate a gas naturale per il minor costo, la maggiore efficienza e il minore inquinamento.

### *1.1 Gli impianti a carbone*

L'altro combustibile molto sfruttato nel mondo, grazie alle sue enormi riserve, è il carbone. Il carbone era stato abbandonato in molti Paesi occidentali perché le impurità di zolfo che presenta determinavano la formazione di ossidi di zolfo e la movimentazione del carbone produceva notevoli quantità di particolato. I moderni sistemi di desolforazione consentono però oggi un abbattimento pressoché completo dell'anidride solforosa e la movimentazione può avvenire sempre in ambienti chiusi in modo che il carbone non sia mai



esposto all'aria. Ciò, insieme ai bassi prezzi e all'elevata disponibilità, ha fatto sì che il carbone ritornasse a essere utilizzato in vari impianti in Italia e all'estero.

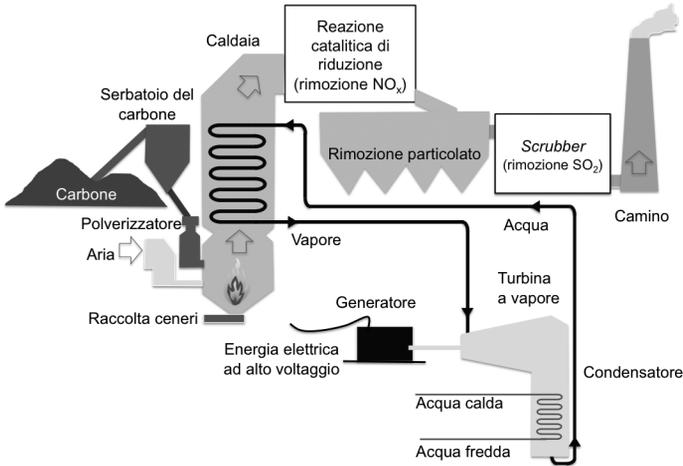
Nel seguito è brevemente descritto lo stato dell'arte degli impianti alimentati a carbone, ciclo USC (Ultra-Super-Critico), e a gas naturale, ciclo combinato. Per illustrarli dobbiamo riprendere brevemente le nozioni di termodinamica spiegate in tutti i libri di fisica. La trasformazione dell'energia chimica di un combustibile in energia meccanica può avvenire sostanzialmente in due modi: con una combustione interna o esterna. Nel primo caso il fluido è riscaldato e compie il lavoro meccanico all'interno del motore stesso ed è poi espulso alla fine del ciclo (così funzionano i motori di autoveicoli e motociclette). Si tratta quindi di un ciclo aperto in cui il fluido (per esempio, aria e benzina) è continuamente ricambiato. Nella combustione esterna, che poi è il metodo utilizzato nelle prime macchine a vapore, il fluido è riscaldato in una caldaia e si espande successivamente nel "motore", cioè in pratica in una turbina. Dopo questo passaggio, viene raffreddato e può ricominciare il ciclo. Si tratta quindi di un ciclo chiuso, nel quale il fluido, salvo casi particolari d'impianti di potenza molto ridotta, è costituito da acqua.

Lo schema di funzionamento degli impianti a carbone USC non differisce sostanzialmente da quelli più tradizionali, illustrati schematicamente nella Figura 1. L'acqua è riscaldata nella caldaia ed evapora, il vapore viene surriscaldato e avviato alla turbina nella quale si espande, mantenendola in rotazione, in uscita dalla turbina viene condensato (e per questo deve cedere calore) e pompato nuovamente in caldaia per riprendere il ciclo.

Nella realtà la situazione è tuttavia più complessa perché lo scambio di calore nella caldaia e nel condensatore richiedono specifiche strutture per entrambi (scambiatori di calore) e il surriscaldamento e l'espansione del vapore avvengono in più stadi, per cui l'assorbimento e la cessione dell'energia avviene in più fasi. I fumi in uscita dalla caldaia passano poi attraverso una serie di sistemi di depurazione soprattutto per ridurre il particolato (depolveratori) e gli ossidi di azoto (denitrificatori) e di zolfo (desolforatori).

Negli impianti a carbone USC, che funzionano di solito con polverino di carbone, quindi con combustibile già in parte trattato per ridurre le impurità, la differenza fondamentale sta nelle elevate temperature e pressioni di lavoro del vapore che si avvicinano ai 700 °C e ai 350 bar (ricordiamo che la pressione atmosferica è circa 1 bar





**Figura 1.** Schema di un ciclo a vapore alimentato a carbone.

cioè 100 kPa). Proprio queste condizioni spinte, che ovviamente richiedono materiali speciali a elevata resistenza (e quindi anche costi più alti) danno il nome al tipo di impianto: in termodinamica sono infatti definite “supercritiche” le condizioni di pressione e temperatura alle quali non c’è una chiara distinzione fra le fasi liquida e gassosa. D’altra parte, queste condizioni consentono rendimenti elevati che si avvicinano al 46-48%.

Naturalmente, come qualunque combustione, anche gli impianti a carbone USC generano una quantità non trascurabile di ceneri (500.000 t/anno per una centrale di 2500 MW) che vanno opportunamente smaltite o riutilizzate.

### 1.2 Le centrali a gas

Le turbine a gas, assai meno diffuse di quelle a vapore, sono a combustione interna e funzionano ad aria atmosferica, che viene compressa e in cui è poi iniettato il combustibile che, bruciando, ne innalza notevolmente la temperatura e va a mettere in movimento la turbina, sul cui asse sono montati, da un lato, il compressore e, dall’altro, l’alternatore. I gas combusti sono espulsi e il ciclo riprende con nuova aria. Anche qui i gas combusti vanno trattati per depurarli prima dell’emissione in atmosfera e anche qui tanto la com-

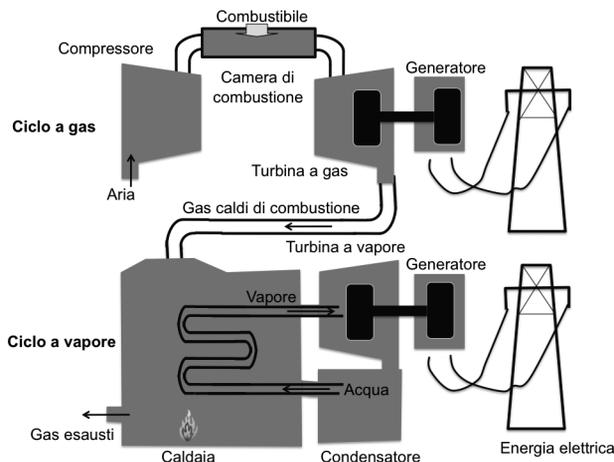


Figura 2. Schema di una centrale a gas a ciclo combinato.

pressione che l'espansione nella turbina avvengono in più stadi. La caratteristica specifica di questi impianti è dunque l'espulsione di gas a temperatura molto elevata (anche oltre  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ma a bassa pressione, circa pari a quella atmosferica. Come già detto, anche i motori a jet degli aerei sono di questo tipo.

La tecnologia delle centrali a gas a ciclo combinato produce elettricità combinando una turbina a gas con una turbina a vapore, come nello schema della Figura 2. L'aria è dapprima compressa nel compressore e poi miscelata con gas naturale nella camera di combustione. Il calore ceduto muove la prima turbina, che a sua volta muove il generatore per produrre elettricità. Il calore liberato dalla combustione è recuperato nel generatore di vapore, il vapore così prodotto muove la seconda turbina, che a sua volta produce elettricità attraverso un generatore.

Il circuito acqua-vapore è poi raffreddato con aria nel condensatore. Anche in questo caso, tutti i processi avvengono di solito in più fasi e quindi lo schema effettivo di una centrale è decisamente più complesso di quello illustrato in Figura 2. Un sistema a ciclo combinato presenta rendimenti complessivi anche prossimi al 58%, irraggiungibili da ciascuno dei due cicli separatamente. Ciò grazie alla possibilità, offerta dalla combinazione dei due cicli, di sfruttare le elevate

temperature in ingresso delle turbine a gas (anche se inferiori di circa 200 °C rispetto a quelle aeronautiche, le moderne turbine industriali arrivano a temperature di 1300-1400 °C), con le temperature molto basse di condensazione, e quindi di cessione di energia all'esterno, del vapore (90-100 °C). Per questo i cicli combinati stanno rapidamente diffondendosi un po' in tutti i Paesi. Secondo i dati di Terna, in Italia nel 2008 erano installati circa 18.600 MW con questa tecnologia.

### 1.3 Le centrali termonucleari

Tra le centrali termiche vanno annoverate, come si è detto, anche quelle nucleari che differiscono dalle precedenti "solo" per il fatto che il riscaldamento dell'acqua e del vapore è ottenuto attraverso un processo di fissione nucleare.

Se concettualmente la differenza è molto semplice, in pratica l'aumento di complessità è estremamente elevato, sia per la necessità di evitare i rischi relativi alla possibile fuoriuscita di materiali radioattivi, sia perché il funzionamento del processo di fissione nucleare deve essere controllato con estremo rigore per evitare che possa degenerare in reazioni irreversibili. Proprio per queste complessità un reattore nucleare va mantenuto, per quanto possibile, in condizioni relativamente stazionarie e ciò fa sì che le centrali di questo tipo si prestino bene a soddisfare le esigenze del carico di base, ma in pratica non possano intervenire sui carichi di punta. Com'è noto in Italia non esistono centrali di questo tipo, ma ce ne sono numerose in altri Paesi, come la Francia, gli Stati Uniti o il Giappone.

## 2. Cogenerazione e teleriscaldamento

Tutte le centrali termiche funzionano trasformando il calore nel lavoro meccanico di un gas o del vapore e, per una fondamentale legge della termodinamica, devono per questo "scaricare" verso l'esterno una parte del calore prodotto. Ci si può quindi porre la domanda se questo calore che, in un certo senso, costituisce lo "scarto" della produzione di elettricità non possa invece essere riutilizzato in altri settori. La risposta alla domanda è ovviamente positiva quando esiste una domanda di energia termica, come avviene nel riscaldamento delle case o in talune produzioni industriali. Un impianto che ha come obiettivo non solo la produzione di energia elettrica, ma anche quella di energia termica (ovviamente nei modi e



nei tempi richiesti dalla domanda di quest'ultima) viene detto un impianto di "cogenerazione".

La produzione di energia in cogenerazione presenta numerosi vantaggi, perché consente di risparmiare una certa quantità di energia primaria (pari mediamente al 20-30%) rispetto alla produzione separata delle stesse quantità di energia termica ed elettrica. Comporta quindi anche una riduzione delle emissioni e favorisce la sostituzione della fornitura di calore con modalità più sicure e con minore impatto sull'ambiente.

La cogenerazione può essere applicata a centrali di ogni tipo, comprese quelle basate su motori a combustione interna in cui viene recuperato il calore contenuto nei fumi di scarico e nei fluidi di raffreddamento del motore. Gli impianti possono avere dimensioni molto differenziate: dalle grandi taglie (che raggiungono anche i 400 MW) a quelli con capacità di generazione inferiore a 1 MW e anche più basse, fino a qualche decina di kW (si parla in questo caso di microgenerazione).

Un impianto di produzione combinata di energia elettrica e calore può essere considerato "cogenerativo" soltanto se soddisfa determinati requisiti qualitativi. In particolare, l'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas (AEEG) ha fissato i seguenti requisiti:

- l'Indice di Risparmio Energetico, che quantifica il risparmio di energia primaria conseguito dalla cogenerazione rispetto alla produzione separata delle medesime quantità di energia elettrica e termica, deve essere maggiore del 10%;
- il Limite Termico, che esprime la quota di energia termica prodotta rispetto al totale di energia elettrica e calore, deve essere maggiore del 15%.

Per gli impianti che soddisfano queste specifiche valgono un certo numero di agevolazioni di tipo fiscale e produttivo (per esempio, il gestore della rete nazionale deve prioritariamente acquisire l'energia da questi impianti).

Per poter consegnare agli utenti l'energia termica prodotta, le centrali di cogenerazione (ma anche le centrali che forniscono solo energia termica) devono disporre di una rete di trasporto dell'acqua calda. Questo sistema viene definito "teleriscaldamento". Si tratta di un metodo diffuso in Europa e nel Nord America, ma che si sta sviluppando anche in Cina. In Italia la prima città a introdurre il servizio di teleriscaldamento è stata Brescia nel 1971, seguita negli anni '80





da Torino, che oggi possiede la rete di teleriscaldamento più estesa del Paese. Ma reti di teleriscaldamento esistono anche in molte altre città italiane (Bologna, Cremona, Ferrara, Imola, Lodi, Mantova, Milano, Reggio Emilia, Verona ecc.).

Questa tecnica di distribuzione dell'energia termica si basa su un sistema centralizzato, costituito da uno o più impianti di produzione, che provvede a distribuire il fluido "termovettore" (acqua calda, ma anche acqua surriscaldata o vapore) nei vari punti della città. Quando l'acqua calda giunge negli edifici allacciati alla rete, attraverso uno scambiatore di calore, cede il calore all'impianto condominiale, per poi fare ritorno in centrale dove viene nuovamente riscaldata. In Italia il sistema di distribuzione è per lo più di tipo "indiretto": il circuito dell'acqua della centrale, che esce a temperature attorno ai 100 °C e rientra a temperature intorno ai 60 °C, è separato dal circuito che lavora presso gli utenti, dove opera uno scambiatore di calore. A fronte di maggiori costi di investimento e di esercizio, questa soluzione comporta una serie di vantaggi significativi: consente di utilizzare componenti a bassa pressione per l'impianto dell'utente, prevede una manutenzione semplificata e garantisce l'individuazione delle perdite, rende più efficiente la regolazione e la contabilizzazione del calore. Gli utenti allacciati possono così continuare a gestire autonomamente i propri consumi: ogni edificio mantiene la sua individualità termica (in corrispondenza del punto di consegna, sono installati contatori individuali) e l'assenza di combustibili e di fiamme dirette in locali annessi agli edifici da riscaldare, sostituiti dalla fornitura diretta di acqua calda, rendono il teleriscaldamento un sistema intrinsecamente sicuro da rischi relativi a scoppi e incendi.

Il trasporto di acqua calda dalla centrale alle utenze deve avvenire in modo tale che durante il tragitto non vi siano perdite rilevanti di calore. Quindi, da un lato, occorre realizzare la rete con tubazioni coibentate (solitamente in acciaio alle quali è applicata una protezione in poliuretano e infine una copertura in polietilene) e dall'altro, occorre comunque che la centrale non sia distante più di qualche chilometro dalle utenze servite. Proprio quest'ultima condizione è, per certi aspetti, la più critica: gli utenti dell'energia termica devono essere sufficientemente vicini all'impianto e tra loro, in modo che non si debba costruire una rete di lunghezza eccessiva. Le reti attualmente esistenti in Italia sono dell'ordine della ventina di chilometri e servono diverse migliaia di abitanti ciascuna.



### 3. Le fonti rinnovabili

#### 3.1 L'energia idroelettrica

Con una quota del 9,5% nel 2007 e con la sua lunghissima tradizione (le prime centrali idroelettriche sull'Adda risalgono ai primi del '900), la produzione di energia elettrica dall'energia cinetica dell'acqua è di gran lunga la fonte rinnovabile più importante nel nostro Paese. Ciò non vale solo per l'Italia, tutte le più grandi centrali elettriche del mondo sono di tipo idroelettrico: Kariba tra Zimbabwe e Zambia (1200 MW), Assuan sul lago Nasser in Egitto (2100 MW), Itaipu sul Paraná al confine tra Brasile e Paraguay (18 turbine da 715 MW ciascuna), le Tre Gole in Cina, la più recente, che con 26 turbine da 700 MW ciascuna, produce il 3% circa di tutta l'elettricità cinese.

Gli impianti idroelettrici tradizionali sono creati sbarrando con dighe corsi d'acqua naturali o deviandone il flusso in condotte che scendono sui fianchi o anche all'interno delle montagne. Nel primo caso, si formano invasi più o meno grandi (da qualche milione a centinaia di miliardi di m<sup>3</sup>) e si possono sfruttare portate elevate con salti ridotti, nel secondo caso, si creano invece salti molto elevati. I grandi laghi italiani – Garda, Maggiore, Como ecc. – sono regolati da dighe che però hanno un vaso “utile” solo di qualche centinaio di milioni di m<sup>3</sup>, perché non possono creare variazioni di livello troppo elevate (di solito, meno di un paio di metri) per non entrare in conflitto con gli altri usi del lago.

Le dighe che hanno creato serbatoi prima inesistenti, come appunto il Lago Nasser o quello delle Tre Gole, hanno capacità molto più elevate sia perché si estendono su superfici vastissime, sia perché possono creare dislivelli dell'ordine del centinaio di metri. Anche in Italia esistono ovviamente grandi serbatoi, anche se di dimensioni minori: quello del Coghinas in Sardegna, con una capacità di 242 milioni m<sup>3</sup>, o quelli di Cancano e San Giacomo in Alta Valtellina (187 milioni m<sup>3</sup>). Questi ultimi due serbatoi gemelli rappresentano una tipologia di impianto diversa: sono serbatoi posti ad alta quota (circa 1900 m) che forniscono agli impianti di conversione portate più modeste, ma con un salto e quindi un'energia cinetica molto elevati. A queste due diverse modalità di funzionamento, corrispondono anche turbine differenti: più simili alle antiche ruote a pale quelle per basse portate e alte velocità (turbine Pelton), più simili a eliche di motoscafo quelle per alte portate e



salti più ridotti (turbine Francis e Kaplan). In tutti i casi, la turbina è montata sullo stesso albero del generatore elettrico e quindi la sua rotazione produce immediatamente energia senza alcuna trasformazione termodinamica.

Anche le centrali idroelettriche tradizionali presentano alcuni problemi significativi. Un problema è dovuto alla variabilità della produzione legata alle condizioni climatiche. In un anno particolarmente poco piovoso gli invasi potrebbero non riempirsi riducendo sia la portata, sia i salti utilizzabili. I serbatoi a monte delle centrali hanno lo scopo di rendere la produzione il più indipendente possibile dalle precipitazioni. Se i serbatoi sono molto grandi rispetto alle precipitazioni complessive sul bacino, possono stoccare volumi d'acqua non solo da una stagione all'altra (in Italia le precipitazioni sono massime in autunno e primavera e la richiesta di elettricità in inverno e in estate), ma addirittura da un anno all'altro (il lago Nasser può contenere circa il doppio della portata annua del Nilo). Tuttavia, rimane sempre una componente legata al clima: una sequenza di anni particolarmente secchi può compromettere la produzione di energia.

Un altro problema che sta diventando sempre più evidente è che non è proprio vero che la produzione idroelettrica avviene “senza consumare” acqua. In senso stretto, nessuna attività “consuma l'acqua” dato che nessuna la distrugge. Tutte, compresa l'agricoltura e l'uso potabile, si limitano a spostarla nello spazio e nel tempo. L'agricoltura, per esempio, manda una parte dell'acqua utilizzata nelle falde e ne fa evaporare un'altra e più rilevante parte; l'acqua evaporata si condensa in nubi e quindi in pioggia e torna nel ciclo. Anche le centrali idroelettriche spostano acqua nello spazio e nel tempo, anche se in modo più limitato. Nello spazio, perché spesso i corsi d'acqua vengono deviati, l'acqua scorre in condotte forzate e ritorna negli alvei originari solo a chilometri di distanza dal punto di prelievo (“captazione”). Nel tempo, perché la presenza di dighe e serbatoi altera il naturale deflusso dei fiumi e quindi il loro modo normale di seguire le stagioni.

La piena del Nilo che fecondava i campi degli antichi egizi è sparita con la costruzione della diga di Assuan. Anche la portata dell'Adda diminuisce mediamente di circa  $30 \text{ m}^3/\text{s}$  durante i fine settimana a causa del ridotto rilascio dai serbatoi idroelettrici (sembra quasi che anche il fiume si riposi!). Questo spostamento dell'acqua nello spazio e nel tempo può causare variazioni significative nell'e-





cosistema fluviale e nelle fasce lungo i corsi d'acqua. Per esempio, una carenza d'acqua in periodi critici può impedire la riproduzione di certe specie acquatiche o comunque ridurne l'habitat. Anche una velocità delle acque troppo bassa può rendere difficile la vita delle trote, lo stesso vale per temperature elevate, che d'estate le acque possono raggiungere più facilmente se la portata è ridotta. Per salvaguardare i corsi d'acqua negli anni recenti è stata introdotta la nozione di "deflusso minimo vitale" (DMV): la portata minima che gli impianti idroelettrici devono comunque lasciare negli alvei fluviali per garantire un habitat sufficiente alle principali componenti acquatiche dell'ecosistema. Infine, una grossa barriera all'ulteriore sviluppo dell'idroelettrico, almeno in Italia, è che praticamente tutti i salti e corsi d'acqua di un qualche interesse sono stati sfruttati e in pratica non si riescono più a costruire dighe dagli anni '60 del secolo scorso. Ciò fa sì che la quota di produzione idroelettrica sui consumi complessivi stia progressivamente diminuendo.

Dalla loro gli impianti idroelettrici hanno innegabili vantaggi: la risorsa è rinnovabile, le turbine sono molto efficienti, il rumore è contenuto, l'inquinamento nullo e la flessibilità è notevole, cioè è possibile in tempi molto ridotti aumentare o ridurre la produzione. Proprio questa caratteristica rende preziose le centrali idroelettriche: possono venire incontro alle domande di punta, a volte di durata tale (dell'ordine dei minuti) che non si potrebbero soddisfare con variazioni di produzione delle centrali termoelettriche, che richiedono tempi di manovra più lunghi. Ciò spiega anche perché l'Italia importa, nelle ore di punta, energia elettrica dalla Svizzera, che con tutte le sue montagne può disporre di grandi quantità di idroelettrico (con questa forma di energia copre il 56% del proprio fabbisogno!).

L'impossibilità di espansione per i grandi impianti idroelettrici, il miglioramento di efficienza delle turbine anche di piccole dimensioni e la possibilità di un controllo automatico e remoto, sta spingendo molti a indagare la convenienza di sfruttare a fini di produzione idroelettrica anche portate e salti molto modesti. Si parla in questo caso di mini (sotto 1 MW di potenza) e micro (sotto i 100 kW) centrali idroelettriche. Questi impianti possono risultare interessanti nelle zone isolate o comunque in vista della creazione di una rete di produzione effettivamente distribuita, alla quale si accennerà più avanti.



### 3.2 L'energia eolica

Insieme all'energia dell'acqua, l'energia cinetica del vento è stata una delle forme utilizzate dai tempi più remoti per la trasformazione in energia meccanica per il trasporto (le imbarcazioni a vela) e la produzione (i mulini a vento). La differenza portata dalle tecnologie più recenti è stata l'aumento notevole dei rendimenti di conversione, grazie soprattutto agli studi sull'aerodinamica delle pale degli aerogeneratori e la conseguente riduzione dei costi. Ciò ha fatto sì che nell'ultimo decennio i generatori a energia eolica siano stati quelli che hanno avuto il maggiore incremento nel mondo: dai 10 MW alla fine degli anni '90 si è passati agli oltre 121 GW del 2008. Rispetto ai classici mulini a vento, i moderni aerogeneratori hanno un numero ridotto di pale (di solito due o tre) e una dimensione assai maggiore. Attualmente si va verso pale che possono arrivare a 50 m (quindi un diametro di 100 m) su torri che arrivano a 50-70 m di altezza. Sul mozzo delle pale c'è direttamente il generatore elettrico (eventualmente collegato attraverso un sistema di ingranaggi che adatta il numero relativamente basso di giri delle pale a quello più elevato richiesto dal generatore) di potenza tra i 300 kW e i 5 MW. Esistono però anche sistemi di piccolissima dimensione (pochi kW) che possono essere installati, per esempio, sulle barche a vela o nel giardino di casa.

Le centrali eoliche, dette in inglese *wind farm*, sono di solito costituite da poche unità a diverse decine di torri, ciascuna con il proprio generatore, che devono essere opportunamente distanziate tra loro per evitare che si disturbino a vicenda e quindi riducano il rendimento complessivo. Per arrivare, come avviene oggi, a potenze dell'ordine del centinaio di MW le centrali eoliche occupano aree molto estese e devono essere installate dove la velocità del vento è più costante e sostenuta, poiché la produzione effettiva dipende fortemente dall'intensità e dalla durata del vento. Per il singolo generatore il rendimento varia con la velocità del vento: velocità troppo basse non sono in grado di far ruotare le pale, mentre velocità troppo elevate costringono a interrompere la generazione di energia per evitare sforzi eccessivi sulle componenti meccaniche.

Una recente evoluzione di questi sistemi sta nella loro installazione *offshore*, cioè in mare aperto a qualche chilometro dalla costa. Se la profondità del mare è modesta, si può ottenere senza un eccessivo aggravio di costi sia un impatto visivo molto minore (a volte dalla terraferma si vedono appena), sia la possibilità di sfruttare venti mol-

to più costanti. D'altra parte, oltre all'ovvio intralcio alla navigazione e all'impatto sull'ecosistema marino, ci sono svantaggi legati alla difficoltà di manutenzione e alla necessità di trasportare a terra l'energia prodotta attraverso cavi di alcuni chilometri di lunghezza, con le conseguenti perdite. Ciononostante, questo tipo d'installazioni è in forte sviluppo, soprattutto dove l'elevata densità di popolazione non consente di trovare aree adatte sulla terraferma: per esempio, in Olanda. Al largo delle coste pugliesi, invece, saranno installate alcune delle prime turbine eoliche che, invece di avere fondamenta sul fondo marino, saranno costruite su galleggianti ancorati al fondo. Questa tecnica, ancora in via di sperimentazione, permetterebbe di posizionare le turbine anche su fondali con profondità fino a 300 m invece dei 50 che al massimo si possono raggiungere nell'altro caso. Un altro settore di ricerca molto attivo e aperto prevede di abbandonare il classico modello del mulino a vento e cercare metodi più efficaci di sfruttamento dell'energia cinetica delle masse d'aria. Queste, come è noto, hanno velocità più elevate e costanti più ci si allontana dal suolo (rimanendo però entro qualche chilometro di altitudine) e quindi molti stanno pensando di installare sistemi "volanti". Ricordiamo, perché sviluppata in Italia, l'idea di far muovere un generatore ad asse verticale attraverso due o più aquiloni di grandi dimensioni che ruotino, opportunamente controllati, a diverse centinaia di metri di altezza. Qui sta proprio la difficoltà del sistema: come far ruotare gli aquiloni senza che si disturbino reciprocamente. Ma, come sanno gli appassionati di kite-surf che riescono ad andare avanti e indietro dalla costa pur in presenza di un vento costante, la cosa è teoricamente fattibile e infatti un prototipo esiste già. Non è detto che, per i suoi costi contenuti, il basso impatto visivo e il minimo utilizzo di territorio, in futuro non possa dare un apporto significativo alla produzione di energia dal vento.

### 3.3 L'energia solare

Come tutti sappiamo, il Sole è la fonte originaria di tutta l'energia sulla Terra "da cui nacque ogni vita", canta l'Inno al Sole del faraone Akenaton (circa 1350 a.C), "*calor ... lumenque profusum perveniunt nostros ad sensus et loca fulgent*" (che manda calore e luce, che giungono ai nostri sensi e ne risplendono le terre) recita Lucrezio nel V canto del *De rerum natura*.

In effetti, per gli astrofisici il Sole è una "centrale" a fusione nucleare (gli atomi di idrogeno si fondono in atomi di elio) della spro-

positata potenza di 385 YW (1 yottawatt =  $10^{24}$  W). Il Sole trasmette in media (poiché ruota su se stesso e ha periodi di attività più o meno intensa) verso la Terra una radiazione elettromagnetica di circa 175.000 TW, cioè  $1368 \text{ W/m}^2$ . La superficie della Terra è però sferica e una parte dell'energia si disperde nell'atmosfera, per cui alle nostre latitudini attorno ai  $45^\circ \text{ N}$  l'irraggiamento medio è di circa  $200 \text{ W/m}^2$ . Moltiplicando questo valore per la superficie esposta al sole, si ottiene comunque una potenza enorme: diversi ordini di grandezza superiore a quella che utilizziamo in tutto il pianeta. Questa energia arriva con lunghezze d'onda sui 200-380 nm (ultravioletto, 6,4% della radiazione complessiva); 380-780 nm (luce visibile, 48%); 780-10.000 nm (infrarosso, 45,6%). Della radiazione solare quindi solo uno spettro relativamente limitato costituisce la luce visibile.

### 3.3.1 I pannelli fotovoltaici

Una delle modalità in più veloce sviluppo per cercare di raccogliere questa grande quantità di energia è quella delle celle fotovoltaiche. Queste sono costituite da un materiale semiconduttore, oggi per lo più silicio, al quale vengono aggiunte piccolissime concentrazioni di altri elementi (tecnicamente questa operazione è chiamata "drogaggio"), come il boro o il gallio, in modo che quando la cella è colpita dai fotoni dalla luce solare si generi un movimento di elettroni e quindi una corrente elettrica. Si tratta di una corrente continua di valori molto modesti, che solo riunendo le celle in pannelli e questi in moduli assume valori significativi. I pannelli normalmente installati possono essere sostanzialmente di tre tipi: silicio monocristallino (sottili sfoglie di silicio ricavate da un unico cristallo), policristallino (cioè composti da molti piccoli cristalli) e amorfo (silicio allo stato gassoso diffuso su una superficie, generalmente di vetro).

Fin qui appare tutto molto semplice, e in parte lo è, se dobbiamo giudicare da quanti pannelli vediamo in giro per alimentare parchimetri, segnali stradali, sistemi di trasmissione, cellulari ecc., oltre che dalle centrali che stanno sorgendo un po' in tutto il mondo. La più grande attualmente è in Portogallo e dovrebbe raggiungere oltre 110 MW, mentre in Germania nel 2007 erano installati oltre 3811 MW di pannelli fotovoltaici. Tuttavia la produzione di energia garantita da tutti questi pannelli (in Germania, 3500 GWh/anno) rimane limitata a valori attorno all'1% della produzione complessiva, perché

il loro utilizzo su grande scala presenta ancora una serie non trascurabile di problemi.

Il primo è il basso rendimento di conversione, il rapporto tra l'energia elettrica prodotta e l'energia solare incidente: per il silicio amorfo, il più economico, si è intorno all'8%, mentre quello monocristallino, assai più costoso, raggiunge il 18%. Per produrre potenze elevate sono quindi necessarie grandi superfici; per esempio, centrali da poco meno di 1 MW installate in Italia meridionale utilizzano una superficie dell'ordine dei 25.000 m<sup>2</sup> (circa 4 campi da calcio). Il motivo di queste prestazioni è che gli attuali pannelli operano in una ristretta banda dello spettro solare e in particolare si rivelano assai poco adatti a raccogliere la radiazione infrarossa. Sono quindi allo studio pannelli stratificati che operino in serie su diverse bande dello spettro per aumentare la resa complessiva.

Un secondo motivo, altrettanto importante, è il costo del silicio, che per questa funzione deve essere molto puro e quindi richiede lavorazioni sofisticate e onerose. Questi costi stanno rapidamente diminuendo con l'espandersi del mercato e l'aumento della produzione industriale; si calcola che entro pochi anni sarà paragonabile ai costi di impianti più tradizionali.

Una terza essenziale caratteristica dei pannelli è quella di produrre maggiore energia quando l'irraggiamento è forte e minore energia quando il Sole è oscurato dalle nubi o in fase calante. Proprio per questa variabilità, occorre far riferimento alla potenza dei pannelli in condizioni di massima resa (irraggiamento e temperature ottimali) e quindi ai cosiddetti "chilowatt di picco" (kWp), sapendo che questa potenza non potrà comunque essere erogata se non per periodi brevi. Si tratta di una caratteristica delle fonti rinnovabili che pone importanti problemi di bilanciamento tra la domanda e la produzione su cui ritorneremo più avanti. Per ovviare in parte a questo problema, i pannelli possono essere montati su sistemi di "inseguimento" solare, cioè sistemi meccanici che ne modificano inclinazione e orientamento in modo da mantenere l'irraggiamento massimo possibile, ma questo aumenta i costi e la complessità dell'impianto e generalmente non è del tutto compensato dal miglioramento delle prestazioni.

Infine, c'è qualche problema tecnico legato al fatto che l'energia elettrica prodotta è a corrente continua, ma per essere immessa in rete e portata alla tensione utile deve essere trasformata in alternata. A fare ciò provvede un sistema elettronico, detto *inverter*, che comporta ulteriori costi economici e perdite energetiche.

Dalla loro parte i pannelli fotovoltaici hanno però alcuni indubbi vantaggi: alla semplicità di cui abbiamo detto (nessuna parte in movimento, niente temperature elevate) si accompagnano la mancanza di emissioni gassose durante il loro funzionamento, la bassa richiesta di manutenzione (occorre solo ripulire saltuariamente le superfici per evitare che i raggi solari non raggiungano le celle) e la lunga durata: si valuta che possano raggiungere anche i 20 e addirittura 30 anni di vita senza sostanziali cali di prestazioni.

### 3.3.2 Il solare termico

Sebbene siano un'invenzione di circa tre secoli fa, solo alla fine del '900 i pannelli solari hanno cominciato a diffondersi in modo sistematico soprattutto per abitazioni e impianti che necessitano di elevate quantità di acqua calda come piscine e strutture sportive.

In generale, i pannelli solari sono costituiti da una superficie trasparente (di vetro o materiale polimerico), una piastra captante (alluminio o rame) all'interno della quale è inserito un fascio di tubi in cui scorre il liquido (addizionato con un liquido antigelo) del circuito primario che viene riscaldato, uno strato isolante (in genere lana di roccia) e un fondo in lamiera zincata o vetroresina; il tutto è tenuto assieme da una struttura portante, di solito in alluminio. L'impianto richiede poi un serbatoio per l'accumulo dell'acqua calda, che al suo interno contiene uno scambiatore di calore nel quale circola il liquido del circuito primario del pannello, che cede il calore ricevuto dal Sole e riscalda l'acqua. La circolazione del fluido primario può essere ottenuta naturalmente, sfruttando le differenze di temperatura nei diversi rami come negli impianti di riscaldamento, oppure tramite una pompa, con la quale i rendimenti possono raggiungere l'80% e la temperatura dell'acqua può arrivare a 80 °C.

Anche in questo caso la domanda di acqua calda può non coincidere con il momento in cui viene fornita gratuitamente dal Sole ed è quindi necessario integrare il sistema con un tradizionale scaldabagno a gas o elettrico. Tuttavia va rilevato che l'apporto di calore fornito dallo scaldabagno è molto ridotto se l'acqua che arriva dal pannello termico ha già una temperatura decisamente superiore a quella dell'ambiente, e quindi il pannello consente comunque un buon risparmio di energia ed emissioni.

In funzione del clima locale e dei materiali con cui è realizzato, un tipico impianto monofamiliare ha una superficie di 3-5 m<sup>2</sup> (di solito

posta sul tetto o in giardino) con un serbatoio di accumulo di 150-300 litri e consente di produrre acqua calda a temperature di 55-65 °C per coprire circa il 70% del fabbisogno annuale di acqua calda per cucina, bagno e anche per il riscaldamento. Ma esistono realizzazioni di ben altre dimensioni: le piscine della Padova Nuoto sono riscaldate con 83 pannelli per 182 m<sup>2</sup>, installati sul tetto, che forniscono ogni anno 63,75 MWh di energia termica. Nonostante le caratteristiche non proprio ideali di insolazione, la Germania è tra i Paesi più avanzati nell'installazione di questo tipo di pannelli e ha prodotto con essi 3700 GWh di energia nel 2007.

Da ultimo va citato il possibile accoppiamento di sistemi fotovoltaici e termici. Come si è detto, infatti, le celle fotovoltaiche non convertono bene la radiazione infrarossa (quindi la componente termica della radiazione) e tendono a scaldarsi. Mettendo dietro alle celle fotovoltaiche dei pannelli termici si può sottrarre il calore in eccesso e ottenere energia termica. Così è stato fatto, per esempio, con il tetto solare ibrido della mensa del Centro Ricerche FIAT, funzionante dal marzo 2003; utilizza pannelli solari con celle fotovoltaiche di tipo policristallino e un sistema di ventilazione dell'aria che, circolando in un'intercapedine di separazione dalla copertura del tetto, raffredda le celle e si riscalda producendo energia termica. L'impianto con una potenza elettrica installata complessiva di 19,5 kW ricopre una superficie di 160 m<sup>2</sup> e produce 9000 m<sup>3</sup> d'aria calda ogni ora.

### 3.3.3 Il solare a concentrazione

L'ultima e più recente frontiera dello sfruttamento dell'energia solare è quella "a concentrazione", detto anche "solare termodinamico". Anche qui in fondo non c'è molto di nuovo (ci ricordiamo gli specchi ustori impiegati da Archimede contro i romani durante l'assedio di Siracusa nel 212 a.C.), ma nuovi materiali e nuove tecnologie consentono un uso più razionale e sistematico di antiche conoscenze. Sono sistemi che mediante specchi parabolici concentrano la radiazione solare in un punto (detto "fuoco") nel quale l'energia risulta quindi molto elevata. In questi impianti vengono allineati diversi specchi, come nella Figura 3, che concentrano la radiazione su un tubo nel quale scorre un fluido termovettore, che così può raggiungere temperature anche di 550 °C. Ciò permette un accumulo di calore in grandi serbatoi e quindi consente l'utilizzo del calore anche in momenti in cui l'irraggiamento è minore. Il fluido

caldo può poi essere usato per la produzione di vapore e quindi di energia elettrica, con le normali turbine. La scelta del fluido termovettore è molto importante: per esempio, nel progetto Archimede del premio Nobel Carlo Rubbia si dovrebbe usare una miscela di sali fusi (60% di nitrato di sodio e 40% di nitrato di potassio, novità più rilevante del progetto) che permette un accumulo di calore in grandi serbatoi a una temperatura di esercizio molto elevata.

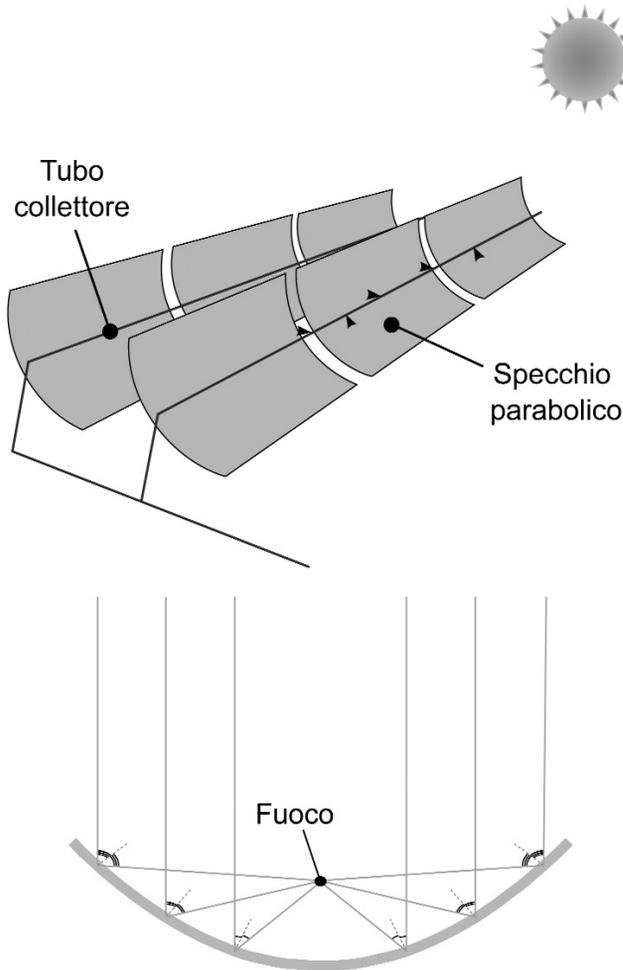


Figura 3. Schema di un impianto solare a concentrazione.



La tecnologia è quindi relativamente semplice (pur richiedendo lavorazioni abbastanza sofisticate per la produzione degli specchi con l'esatta curvatura) e non richiede i costosi pannelli fotovoltaici; una volta messa a punto, potrebbe effettivamente costituire un metodo efficiente di sfruttamento diretto dell'energia solare.

In Spagna, nella provincia di Granada, è attiva dal 2008 la prima centrale solare (Andasol 1), posta a una quota di 1100 m in un clima molto secco dove l'insolazione è elevata (2200 kWh/m<sup>2</sup> anno). Dovrebbe produrre mediamente 180 GWh ogni anno e, quello che è interessante, dovrebbe mantenere la stabilità della rete elettrica fornendo energia senza oscillazioni o interruzioni grazie alle 7,5 ore di riserva di cui dispone. Il collettore solare ha una superficie di 549.360 m<sup>2</sup> (70 campi da calcio) e allinea 1008 specchi in 168 file parallele, mentre l'intera centrale occupa circa 200 ettari. Il vapore, generato a 100 bar e 371 °C alimenta una turbina con rendimento del 38%. Ci sono due serbatoi di accumulo dei sali fusi lunghi 14 m e con un diametro di 36 m.

In Italia è stato installato dall'ENEL un piccolo impianto sperimentale, di soli 5 MW, a Priolo Gargallo (Siracusa), proprio nelle terre in cui visse Archimede. La centrale, che dovrebbe arrivare in futuro a 20 MW, ha l'interessante caratteristica di essere integrata in un più tradizionale impianto di cogenerazione, in grado di compensare le oscillazioni di potenza dovute alla variabilità dell'energia solare e di sfruttare comunque in ogni momento tutto il calore reso disponibile, riducendo l'uso del combustibile nella turbina a vapore.

### 3.4 L'energia geotermica

Il termine "geotermia" deriva dal greco e significa "calore della Terra" e definisce il calore in parte residuo del calore primordiale originatosi durante la formazione del pianeta e in parte prodotto dal decadimento di isotopi radioattivi presenti nelle rocce che compongono le parti più profonde della crosta terrestre. Questo calore è costantemente trasferito dall'interno della Terra (la temperatura delle rocce aumenta di circa 30 °C per ogni chilometro di profondità) verso la superficie. È però interessante anche notare che, dopo i primi metri di profondità in cui il suolo ha la stessa temperatura media dell'atmosfera (circa 15 °C), appena si scende sotto i 10-15 m si giunge in strati che hanno una temperatura costante attorno ai 10 °C, indipendentemente dalla temperatura superficiale. Ce ne rendiamo conto immediatamente quando visitiamo grotte e caverne



a una certa profondità. Questa notazione è importante perché abbiamo visto che tutti i cicli termodinamici necessitano di una sorgente fredda alla quale cedere calore.

L'energia geotermica può essere sfruttata in modi diversi a seconda delle temperature alla quali si riesce a operare: a 5-6 km, le temperature sono sempre dell'ordine dei 200 °C, ma è complicato raggiungere simili profondità. Di solito, se si dispone di temperature superiori ai 100 °C, si sfrutta il calore per la produzione di energia elettrica, mentre al di sotto lo si sfrutta soprattutto per il riscaldamento domestico. In Italia da oltre 100 anni si produce energia elettrica sfruttando il vapore proveniente dal sottosuolo a Larderello in Toscana per un totale di 5000 GWh/anno, corrispondente ai fabbisogni elettrici di 2 milioni di famiglie. La località è particolarmente favorevole perché già a 2 km di profondità si trovano temperature dell'ordine dei 300 °C. In effetti la proposte di sfruttamento di questa risorsa iniziarono nell'800 soprattutto grazie a Francesco De Larderel, da cui la località ha poi preso il nome. Complessivamente in Italia sono attive 34 centrali geotermiche (26 delle quali nell'area boracifera tradizionale) per un totale di 700 MW di potenza installata. Altri impianti del genere esistono in Francia, vicino a Strasburgo, in Australia, Stati Uniti, Gran Bretagna, Giappone.

In generale, dopo che il vapore ad alta temperatura è stato estratto e utilizzato per azionare la turbina, viene raffreddato ad aria (in apposite torri) e reimpresso nel pozzo allo stato liquido in maniera da costituire quasi un ciclo chiuso, altamente sostenibile.

#### 3.4.1 Le sonde geotermiche

L'altra interessante possibilità di sfruttamento del calore terrestre è quella di utilizzare i primi 100-150 m dalla superficie come sorgente a temperatura costante. Si usano a questo scopo le cosiddette "sonde geotermiche" (che possono essere verticali o orizzontali): scambiatori di calore installati in perforazioni in prossimità dell'edificio da riscaldare. All'interno della perforazione sono inseriti uno o due tubi di polietilene a forma di U e lo spazio vuoto viene riempito con una miscela di bentonite e cemento. Il fluido circolante nelle condotte recupera il calore dal terreno e fornisce l'energia geotermica a una pompa di calore dimensionata per la potenza di riscaldamento richiesta dall'edificio da riscaldare. La pompa di calore è una macchina termica che, utilizzando in parte energia fornita da un motore elettrico, fa compiere a un fluido un ciclo inverso: sottrae

cioè calore a una sorgente più fredda e lo cede a una sorgente più calda. Questo avviene normalmente anche nel frigorifero che sottrae calore al suo interno, più freddo, e lo cede all'esterno, più caldo attraverso la serpentina posteriore. Invertendo la direzione del fluido, si può invece sottrarre calore all'ambiente più caldo e ottenere quindi un raffrescamento.

La resa di una pompa di calore è misurata dal coefficiente di prestazione (COP), dato dal rapporto tra energia resa (alla sorgente) ed energia consumata (di solito elettrica), usualmente indicato in fisica come "coefficiente di effetto utile". Un valore del COP pari, per esempio, a 3 indica che per ogni kWh d'energia elettrica consumato, la pompa di calore renderà 3 kWh di calore. Non si tratta di un vero e proprio rendimento, in quanto la pompa si limita a trasferire l'energia da una sorgente a un'altra. Utilizzando il terreno come sorgente fredda si possono raggiungere COP dell'ordine di 5 e anche più in presenza di una falda acquifera che consente un migliore scambio termico. In fase di raffrescamento il sistema può funzionare anche in modalità passiva, cioè si estrae calore dall'edificio pompando nel sistema l'acqua fredda o il liquido antigelo proveniente dalle sonde interrate, senza l'azione della pompa di calore vera e propria.

Sistemi di questo genere funzionano meglio se le differenze di temperatura tra la sorgente calda e quella fredda non sono molto elevate e quindi richiedono dei sistemi di riscaldamento diversi dai tradizionali caloriferi in cui deve scorrere acqua a temperatura relativamente alta. Si utilizzano pannelli radianti, cioè fasci di tubi che scorrono sotto il pavimento e lo portano a circa 30 °C di temperatura. Poiché così la cessione del calore avviene soprattutto per irraggiamento, la sua distribuzione è più uniforme e, oltre a risparmiare energia, questi sistemi rendono gli ambienti più confortevoli di quelli riscaldati con stufe o termosifoni. Con profondità delle sonde tra i 18 e i 60 m si utilizzano tra 80 e 110 m di tubazione ogni 3,5 kW di capacità della pompa. Si pensa che le sonde in polietilene possano avere durata superiore ai 25 anni.

I sistemi di riscaldamento basati su pompe di calore geotermiche si stanno rapidamente diffondendo in molti Paesi. Tra questi un posto particolare va alla Svizzera, che grazie a una legislazione fortemente incentivante vanta la maggior densità mondiale di sistemi di questo tipo. Nel 2006 l'80% delle nuove costruzioni è stato dotato di pompe di calore e il mercato è cresciuto di oltre il 30% rispetto all'anno precedente, per una potenza installata che si avvicina ai 500 MW.

Anche la Germania è molto avanti nello sfruttamento di questo tipo di energia e nel 2007 ha prodotto circa 2300 GWh mediante geotermia, con un incremento del 19% rispetto all'anno precedente.

Una recente realizzazione di un grande impianto di questo genere è il complesso edilizio del villaggio olimpico costruito in Cina per le Olimpiadi 2008, che fornisce 32 MW di potenza termica in raffreddamento e 37 MW in riscaldamento.

### *3.5 Biomasse per l'energia*

Il termine biomassa include ogni tipo di materiale di origine biologica: in altri termini ci si può riferire a ogni sostanza che deriva direttamente o indirettamente dalla fotosintesi clorofilliana e quindi è legata alla chimica del carbonio. La biomassa è la più antica e più diffusa delle fonti energetiche, sostituita gradualmente negli ultimi 150 anni dai combustibili fossili. Anche questi ultimi hanno origine organica, ma, come abbiamo detto, non sono ritenuti rinnovabili dato che i tempi di ricostruzione di tali risorse sono nell'ordine di milioni di anni. Nemmeno le biomasse sono immediatamente rinnovabili, occorre che siano utilizzate a un ritmo che permetta loro di riformarsi: è chiaro che il disboscamento delle grandi foreste amazzoniche non rientra in questa logica!

In fondo, le biomasse costituiscono un'ulteriore modalità di utilizzo dell'energia solare: anziché usarla direttamente, si usano i prodotti della sintesi clorofilliana che essa consente, con il vantaggio che l'emissione di CO<sub>2</sub> che si ha in fase di utilizzo della biomassa a fini energetici non fa altro, in pratica, che rimettere in circolazione nell'atmosfera lo stesso biossido di carbonio che era stato assorbito durante la crescita della biomassa stessa. Si parla per questo delle biomasse come biossido di carbonio neutre, e quindi come fonti energetiche che non contribuiscono all'effetto serra (ne parleremo al capitolo "Energia, effetto serra e cambiamenti climatici"). Per la verità, il problema è un po' più complesso, perché una parte del CO<sub>2</sub> assorbito durante la crescita delle piante viene stoccata nel suolo e rilasciata molto più lentamente e inoltre per utilizzare la biomassa occorre trasportarla e lavorarla e ciò implica una qualche emissione di biossido di carbonio. Inoltre la vegetazione contribuisce al paesaggio, alla dinamica degli ecosistemi, alla stabilità dei pendii, alla resistenza all'erosione. Non possiamo esaminare qui tutti questi aspetti e ci limiteremo quindi a valutarne l'utilizzo come combustibile.

La biomassa utilizzabile ai fini energetici consiste in tutti quei materiali organici che possono essere utilizzati direttamente come combustibili o trasformati in altre sostanze (solide, liquide o gassose) di più facile e conveniente utilizzazione negli impianti di conversione. In base alle origini è possibile classificare le biomasse come: prodotti primari della fotosintesi; sottoprodotti delle catene alimentari e delle lavorazioni industriali; frazioni biodegradabili dei rifiuti solidi urbani.

Da un altro punto di vista, è possibile distinguerle secondo il comparto di provenienza:

- *comparto forestale e agroforestale*: residui delle operazioni di taglio e mantenimento dei boschi o delle attività agroforestali, utilizzazione di boschi cedui...;
- *comparto agricolo*: residui provenienti dall'attività agricola e dalle colture dedicate di specie lignocellulosiche, piante oleaginose, piante alcoligene;
- *comparto zootecnico*: reflui zootecnici;
- *comparto industriale*: residui provenienti dalle industrie del legno o dei prodotti in legno e dall'industria della carta, oltre ai residui dell'industria agroalimentare;
- *rifiuti urbani*: residui delle operazioni di manutenzione del verde pubblico e frazione umida di rifiuti solidi urbani.

Si tratta quindi di materiali molto eterogenei, che vanno dai prodotti residuali ai prodotti di alcune particolari coltivazioni realizzate appositamente per la produzione di energia (colture energetiche), e con caratteristiche chimiche e fisiche diverse. Ciò comporta anche differenze significative nelle modalità di conversione in energia che possono seguire varie filiere.

### 3.6 I processi di conversione energetica delle biomasse

In linea generale, i processi di trasformazione possono essere raggruppati in due categorie. I processi di *conversione termochimica*, basati sull'azione del calore che permette le reazioni necessarie a trasformare la materia in energia, sono impiegati per biomasse in cui il contenuto di umidità non superi il 30%: per esempio, la legna e tutti i suoi derivati, i più comuni sottoprodotti colturali come la paglia di cereali, i residui di potatura ecc. e taluni scarti di lavorazione, come lolla, pula, gusci, noccioli. I processi di *conversione biochimica*, che permettono di ricavare energia attraverso reazioni

chimiche dovute al contributo di enzimi, funghi e altri microrganismi, sono invece impiegati per biomasse in cui l'umidità sia superiore al 30%: le colture acquatiche, alcuni sottoprodotti colturali, come foglie e steli di verdure, patate ecc.; i reflui zootecnici e alcuni scarti di lavorazione.

Più specificamente, la conversione energetica può essere operata con una delle seguenti tecnologie: combustione diretta; carbonizzazione; pirolisi; gassificazione; digestione anaerobica; fermentazione alcolica; estrazione di oli e produzione di biodiesel.

La *combustione diretta* è il metodo più semplice e antico, ma occorre che avvenga in condizioni controllate per essere efficiente e non produrre inquinanti pericolosi. Oggi è attuata generalmente in caldaie a griglia fissa, a griglia mobile o a letto fluido ad alto rendimento e di varia potenza, in cui avviene lo scambio di calore tra i gas di combustione e i fluidi di processo (acqua, olio diatermico ecc.). I vecchi camini aperti in cui si bruciava un tempo la legna per il riscaldamento domestico e la cottura dei cibi sono stati progressivamente sostituiti perché inefficienti dal punto di vista energetico e notevolmente inquinanti, soprattutto per quanto riguarda il particolato.

I prodotti utilizzabili per la combustione sono il legname in tutte le sue forme (in particolare, oggi si usano il cippato, cioè scaglie di legno delle dimensioni di pochi centimetri, e i pellet, piccoli cilindretti di segatura di legno compattata ad altissime pressioni); paglie di cereali; residui di raccolta di legumi secchi, di piante oleaginose (ricino, cartamo ecc.), di piante da fibra tessile (cotone, canapa ecc.); di potatura di piante da frutto e di piante forestali; residui dell'industria agroalimentare.

Le centrali a biomassa sono tipicamente del tipo a cogenerazione con taglie dell'ordine di qualche MW elettrico e di qualche decina di MW termici. Impianti di queste dimensioni sono installati, per esempio, a Tirano, in Lombardia, e a Lienz, nell'Austria meridionale. A Vienna è attivo dal 2006 un impianto di cogenerazione che utilizza 600.000 m<sup>3</sup>/anno di legna proveniente dalla manutenzione dei boschi; ha una potenza elettrica di 23,5 MW e una potenza termica di 65,7 MW agevolmente sfruttata nel sistema di teleriscaldamento della capitale austriaca, che con quasi 1000 km di tubature fornisce il riscaldamento a circa 250.000 abitazioni. Impianti di maggiori dimensioni sono possibili, ma comportano la necessità di disporre di elevate quantità di biomassa e quindi di elevati flussi di trasporto, che a loro volta generano emissioni inquinanti.

La *carbonizzazione* è un processo di tipo termochimico molto vecchio e oggi poco utilizzato, che consente la trasformazione delle molecole dei prodotti legnosi e cellulósici in carbone (carbone di legna o carbone vegetale) mediante l'eliminazione dell'acqua e delle sostanze volatili dalla materia vegetale per azione del calore.

La *pirolisi* è un processo di decomposizione termochimica di materiali organici, ancora largamente in fase di sperimentazione, ottenuto mediante l'applicazione di calore a temperature comprese tra 400 e 800 °C, in completa assenza o con una ridotta quantità di ossigeno. I prodotti della pirolisi sono gassosi, liquidi e solidi, in proporzioni che dipendono dai metodi utilizzati e dai parametri di reazione. Tuttavia, la qualità di questi prodotti non è ancora perfettamente adeguata all'utilizzo in turbine a gas (in impianti di una certa dimensione) o in motori diesel (in impianti di piccola potenza).

La *gassificazione* è un processo termochimico che consiste nell'ossidazione incompleta di biomasse in ambiente a elevata temperatura (900-1000 °C) per la produzione di un gas combustibile (detto "gas di gasogeno") di basso potere calorifico, variabile tra i 4000 kJ/Nm<sup>3</sup> (gassificatori ad aria) e i 14.000 kJ/Nm<sup>3</sup> (gassificatori a ossigeno). Questa tecnologia, ancora in fase di sperimentazione, presenta problemi legati principalmente alle impurità presenti nel gas (polveri, catrami e metalli pesanti). Inoltre l'immagazzinamento e il trasporto del gas di gasogeno non sono molto convenienti a causa del suo basso contenuto energetico per unità di volume. Perciò si tende a trasformarlo in metanolo, o alcol metilico (CH<sub>3</sub>OH), che con un potere calorifico dell'ordine di 21.000 kJ/kg può essere utilizzato per l'azionamento di motori o ulteriormente raffinato per ottenere benzina sintetica.

La *digestione anaerobica* è invece un processo di conversione di tipo biochimico che avviene in assenza di ossigeno e consiste nella demolizione di sostanze organiche complesse (lipidi, protidi, glucidi) contenute nei vegetali e nei sottoprodotti di origine animale per opera di microrganismi. Si ottiene così un gas (biogas), costituito per il 50-80% da metano e per la restante parte soprattutto da biossido di carbonio, che ha un potere calorifico medio dell'ordine di 23.000 kJ/Nm<sup>3</sup>. I microrganismi anaerobi presentano basse velocità di crescita e basse velocità di reazione e quindi occorre controllare con cura le condizioni ottimali dell'ambiente di reazione. I tempi di processo sono relativamente lunghi se confrontati con altri processi biologici; tuttavia il vantaggio della digestione anaerobica è che la ma-

teria organica complessa viene convertita in metano e biossido di carbonio e quindi porta alla produzione finale di una fonte rinnovabile di energia sotto forma di un gas combustibile ad alto potere calorifico. Al termine del processo di fermentazione nei materiali residui (effluente o digestato) si conservano integri i principali elementi nutritivi (azoto, fosforo, potassio), già presenti nella materia prima: l'effluente risulta in tal modo un ottimo fertilizzante. Il biogas viene poi raccolto, compresso e immagazzinato e può essere utilizzato come combustibile per alimentare caldaie o motori a combustione interna e quindi anche per produrre energia elettrica. Si tratta di un processo molto interessante soprattutto per trattare i reflui zootecnici che libererebbero in atmosfera un'elevata quantità di gas serra (il metano in essi contenuto ha un effetto serra 21 volte superiore al biossido di carbonio); anche per questo motivo ha notevole successo nelle zone della Pianura Padana dove più numerosi sono gli allevamenti. Si tratta di impianti di dimensioni modeste, da 0,5 a 2 MW, costituiti da uno o due fermentatori (serbatoi coperti e mantenuti a temperatura costante tra i 10 e i 55 °C a seconda della tecnica utilizzata) del volume di qualche migliaio di metri cubi che possono trattare qualche decina di tonnellate di materiale al giorno e nei quali i liquami (eventualmente mescolati con altre biomasse verdi) rimangono per periodi medi da 20 a 90 giorni. In Italia nel 2007 erano attivi 15 impianti alimentati da reflui, 11 da colture e rifiuti agroalimentari, 175 da discariche, per una potenza complessiva di circa 350 MW elettrici.

La *fermentazione alcolica* è un processo di fermentazione di prodotti agricoli ricchi di zucchero (cereali – principalmente il granturco, colture zuccherine, amidacei e vinacce) che produce bioetanolo. Il biodiesel è un altro biocombustibile liquido ottenuto dalle biomasse attraverso un processo di transesterificazione. Le principali colture di questo tipo in Europa sono la colza e il girasole; negli Stati Uniti, in Brasile e in Argentina prevale la soia; mentre nel Sudest asiatico si produce olio di palma.

Ci sono però alcune perplessità nel mondo scientifico sulla reale convenienza energetica e ambientale dei biocombustibili liquidi: se si tiene conto dell'intera filiera di trasformazione, il vantaggio in termini energetici è molto ridotto, perché l'energia prodotta da 1 litro di biocombustibile è di poco superiore all'energia necessaria per la sua produzione. Inoltre, allo stato attuale delle conoscenze scientifiche, le biomasse da cui estrarre biocombustibili sono gra-

noturco, colza e altre colture che per garantire rese elevate devono essere appositamente coltivate su suoli fertili. Poiché il suolo è una risorsa limitata, ci si chiede se sia legittimo un utilizzo energetico che lo sottragga alle colture alimentari. Per esempio, negli USA il 20% del granturco è oggi utilizzato non per l'alimentazione, ma per produrre bioetanolo. Nei Paesi in via di sviluppo si aggiunge l'ulteriore e gravissimo problema della deforestazione: vaste aree di foreste sono rase al suolo per liberare terreno per colture energetiche (ma questo, come è noto, succede anche per le colture alimentari). Si sta perciò studiando il cosiddetto etanolo di seconda generazione che permetterebbe di superare i problemi appena citati. In particolare, in questo processo sarebbero utilizzate biomasse con elevati contenuti di cellulosa: si utilizzerebbero gli scarti dell'agricoltura o della lavorazione del legno e non solo biomasse zuccherine come i cereali. La quantità di biomasse da utilizzare sarebbe maggiore, ma potrebbe essere ottenuta senza sottrarre suolo alla produzione alimentare e con un processo molto più efficiente dal punto di vista energetico. Allo stesso scopo si sta sperimentando anche la produzione di combustibili da alghe coltivate in zone lagunari, quindi senza sottrarre terreni agricoli alla produzione alimentare.

In Italia nel 2008 le biomasse, inclusi i rifiuti urbani, hanno complessivamente prodotto il 12% dell'energia elettrica lorda, triplicando la loro quota rispetto al 2000.

#### 4. Nuove tecnologie e prospettive

Accanto a queste fonti di energia rinnovabili già consolidate, in molte parti del mondo si stanno sperimentando nuove tecnologie per aprire ulteriori prospettive di sostituzione dei combustibili fossili.

##### 4.1 *L'energia dal mare*

Un settore potenzialmente interessante per lo sviluppo di nuove energie rinnovabili è lo sfruttamento delle maree e delle correnti marine. Si tratta di un'enorme quantità di energia meccanica che tuttavia è disponibile a velocità basse e, a volte, discontinue per cui non è semplice trasformarla in energia utile. Sono state comunque costruite centrali che sfruttano l'energia del mare in luoghi dove le maree sono più forti, come le coste atlantiche della Francia, do-

ve le maree possono raggiungere i 12 m. A La Rance, è attiva dal 1967 una centrale da 240 MW lunga 330 m e costituita da 24 turbine di 5,4 m di diametro che possono funzionare con la marea in entrambi i sensi. Tuttavia questi impianti costieri hanno problemi con l'erosione e la sedimentazione, per cui anche in questo caso si sta studiando la possibilità di impianti *offshore*. Al largo delle coste inglesi e scozzesi sono stati individuati siti per una potenza complessiva che potrebbe raggiungere i 6000 MW.

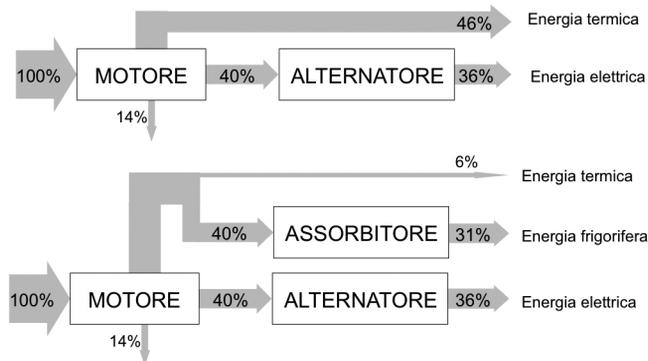
Si stanno anche studiando sistemi per sfruttare le correnti permanenti con pale immerse, come quelle delle turbine eoliche, con il vantaggio che in generale le correnti sono molto più costanti dei venti. Un metro quadrato di area, intercettata con una turbina, in una corrente d'acqua che viaggia a 3 m al secondo (11 km/h) può dare una potenza di 3 kW.

Infine, tra i tanti progetti in corso, citiamo il progetto Pelamis, una struttura semisommersa lunga 150 m fatta da diversi elementi rigidi accoppiati a pistoni idraulici: una specie di grande serpente che, mosso dalle onde, trasmette il movimento a dei generatori collegati agli snodi. Il primo impianto è stato installato al largo del Portogallo e ha una potenza di 2,25 MW. Altri saranno installati davanti a Vancouver, in Canada e in Scozia. Gli impianti commerciali dovrebbero arrivare a 30 MW, occupando circa 1 km<sup>2</sup> di mare.

#### 4.2 Trigenerazione e teleraffrescamento

Se attraverso la cogenerazione si producono contemporaneamente calore ed elettricità, attraverso la trigenerazione con un solo combustibile si produce anche freddo, come rappresentato schematicamente nella Figura 4. Nelle abitazioni e negli uffici dei Paesi a clima temperato la richiesta di calore è limitata a pochi mesi invernali, mentre durante i mesi estivi esiste un significativo fabbisogno di rinfrescare gli ambienti con il condizionamento dell'aria.

Come per i sistemi di cogenerazione, anche la trigenerazione offre grandi risparmi energetici: si stima un risparmio di energia del 60% e un conseguente forte risparmio nella bolletta energetica delle utenze e delle imprese. Nel caso delle industrie, il vantaggio può essere anche superiore se il calore è già disponibile come scarto del normale ciclo produttivo. In questo caso, l'applicazione del sistema di trigenerazione consente di riutilizzare il calore e i fumi, altrimenti persi nell'atmosfera, per produrre "in casa" energia elettrica e raffrescamento.



**Figura 4.** Funzionamento invernale (sopra) ed estivo (sotto) di un sistema ciclo frigorifero abbinato a un cogeneratore.

Ospedali, edifici pubblici, università, centri commerciali, centri fitness e altre strutture che presentano una domanda costante di energia elettrica, termica e frigorifera, sono i principali destinatari di questa tecnologia. Anche il settore agroalimentare, che riunisce in uno stesso ciclo la produzione diretta di materie prime agricole e la loro successiva lavorazione industriale, potrebbe impiegare la trigenerazione nella cosiddetta “catena del freddo” per le operazioni di surgelamento dei prodotti, poi commercializzati nella catena di distribuzione.

Per la realizzazione di un impianto di teleraffrescamento al momento esistono due possibilità. La prima consiste nel generare freddo attraverso l’acqua calda che scorre nei tubi; l’acqua refrigerata, cioè, viene prodotta da gruppi frigo assorbitori installati presso l’utente e alimentati dalla rete di teleriscaldamento. Si tratta in pratica di una tecnologia che permette di avere il freddo a partire da una fonte di calore a temperatura elevata, e la cui resa è tanto più elevata, quanto più è alta la temperatura alla fonte: per avere un sistema economicamente valido, l’acqua dovrebbe essere mandata nella rete a una temperatura di circa 150 °C. Questo però succede solamente in alcuni limitatissimi casi (solo in alcune aree della rete della città di Brescia sono raggiunte temperature intorno ai 120 °C).

L’altra possibilità consiste sempre nel produrre freddo a partire da acqua calda, ma direttamente presso la centrale, e nel distribuire poi direttamente l’acqua fredda: questo è quello che si intende per tele-

raffrescamento. A favore di questa soluzione gioca il fatto che il terreno a 1 m di profondità (profondità alla quale solitamente avviene la posa delle tubazioni) ha una temperatura che oscilla sempre tra i 10 °C e i 12 °C, che quindi può offrire un buon servizio di coibentazione per l'acqua fornita, che solitamente ha una temperatura intorno ai 5-7 °C: il salto termico da affrontare è dunque esiguo. La città leader per questo tipo di applicazione è Stoccolma che dispone di una rete estesa e perfettamente funzionante.

In Italia lo sviluppo di questo nuovo servizio energetico prosegue con molta lentezza e con valori assoluti sia in termini di potenza installata, sia di energia fornita ancora molto lontani da quelli relativi al servizio di riscaldamento. Alcuni centri come Reggio Emilia, Vicenza, Modena, Bologna e Milano hanno cominciato a proporre questo servizio in alcuni quartieri, ma i risultati sono ancora da valutare. Per quanto riguarda le tecnologie poi, la più usata in Italia è quella che prevede il trasporto del calore presso l'utente e la produzione locale di acqua refrigerata attraverso i gruppi frigorifero, mentre la distribuzione di acqua refrigerata prodotta in centrale è ancora in fase di studio.

#### 4.3 Celle a combustibile

Le celle a combustibile (*fuel cells*), dette anche pile a combustibile, sono dispositivi che sostanzialmente invertono la reazione di elettrolisi (separazione dell'acqua in ossigeno e idrogeno mediante una corrente elettrica) e di conseguenza ottengono corrente ricombinando ossigeno e idrogeno. Il prodotto delle loro attività è quindi semplicemente acqua. La cella, che sostanzialmente funziona come le normali batterie elettriche, opera senza parti in movimento, né sviluppo di calore (salvo in alcune realizzazioni); invece di esaurirsi come le normali batterie, continua a produrre corrente finché all'anodo e al catodo sono forniti idrogeno e ossigeno.

Ci sono due aspetti su cui si è concentrata la maggior parte della ricerca scientifica. Il primo riguarda lo sviluppo di una membrana che impedisca il passaggio degli elettroni e li costringa a fluire attraverso il circuito elettrico esterno. Il secondo si concentra sullo studio di elettrodi che fungano da catalizzatori della reazione: attualmente questi sono di platino, ma si stanno cercando sostituti meno costosi a base di ferro. Un punto debole delle celle è la necessità di disporre di idrogeno che non esiste puro in natura e quindi deve essere ottenuto da qualche altra fonte, senza che ciò richieda più energia di

quella riottenibile dalla sua ricomposizione con l'ossigeno (che invece si trova abbondante e gratuito nell'aria). È per questo che si stanno valutando altre possibilità, come l'utilizzo del metanolo, ottenuto anche dalle biomasse.

D'altra parte, i vantaggi delle celle sono notevoli; compattezza, flessibilità (possono essere da qualche kW a un centinaio di MW), basso rumore, trasportabilità (una delle maggiori applicazioni potrebbe essere quella a bordo delle auto), nessuna perdita di potenza dovuta a trasformazione termica e quindi rendimenti molto elevati. Non per nulla, sono state scelte per fornire energia elettrica a bordo delle capsule *Apollo* che hanno raggiunto la Luna; le questioni relative a peso, autonomia, mancanza di emissioni, le hanno fatte preferire a qualsiasi altra forma, nonostante il costo elevato e il bilancio energetico passivo: l'energia per l'estrazione dell'idrogeno poteva anche superare quella che se ne riotteneva, perché l'estrazione avveniva sulla Terra, dove le risorse sono abbondanti, e la produzione di elettricità avveniva nella capsula in volo, in condizioni di risorse estremamente limitate. D'altra parte è così anche per le batterie che usiamo per le torce elettriche, il telecomando, il PC portatile: non ci curiamo tanto del loro bilancio energetico globale (che è negativo perché erogano meno energia di quanta ne devono assorbire), ma ci preme poter disporre dell'energia elettrica necessaria dove e quando vogliamo, con pesi e volumi contenuti.

C'è comunque un generale ottimismo sulla possibilità di ottenere a breve celle a costi contenuti e le sperimentazioni, oltre che la produzione, sono in piena attività.

#### *4.4 Sistemi di accumulo dell'energia*

Come è emerso più volte nel corso del capitolo, il problema fondamentale dell'energia elettrica è l'impossibilità di immagazzinarla quando ce n'è in abbondanza per rilasciarla poi nei momenti di maggiore richiesta. Occorre quindi pensare a sistemi di accumulo, che prevedono l'immagazzinamento dell'energia sotto altre forme, che poi possano essere usate per produrre energia elettrica.

Una di queste forme potrebbe essere, come abbiamo appena visto, la produzione di idrogeno, che, sia pure con un bilancio energetico negativo, potrebbe essere una buona soluzione per sfruttare maggiormente tutte le fonti discontinue. Quando una domenica mattina di primavera ci fosse un bel sole e molti pannelli producessero elettricità, che cosa se ne potrebbe fare se la domanda fosse bassa, come

sempre accade la domenica mattina? Si potrebbe produrre idrogeno, al limite anche mediante idrolisi e immagazzinare l'idrogeno in forma liquida o gassosa per utilizzarlo poi su mezzi mobili o in celle a combustibile fisse quando la domanda di elettricità è elevata. La stessa cosa potrebbe accadere con una turbina eolica con molto vento. Certo, sono scenari futuribili: per ora la produzione eolica o solare possono essere immesse comunque in rete senza problemi, dato che costituiscono una parte molto piccola dell'energia utilizzata, anche la domenica mattina.

Un altro sistema, molto più semplice e già in uso è quello d'invertire il funzionamento degli impianti idroelettrici e farli funzionare come stazioni di pompaggio per immagazzinare nuovamente l'acqua a monte degli impianti. Sistemi di questo genere sono diffusi soprattutto in Svizzera, ma ne esistono diversi anche in Italia, e consentono di recuperare (anche qui in modo energeticamente inefficiente se si guarda al bilancio complessivo, ma molto utile se si guarda invece all'evoluzione oraria) la produzione delle centrali termoelettriche che rimarrebbe inutilizzata, specialmente di notte, e per accumulare risorsa idrica da rilasciare nelle ore di punta quando è più pregiata e richiesta. La centrale di Edolo in Val Camonica, per esempio, ha otto gruppi da 140 MW con turbine che possono funzionare sia per produzione, sia per pompaggio. A Ronco Val Grande, in provincia di Varese, c'è un'altra centrale idroelettrica dello stesso tipo, che nelle diverse ore del giorno e della notte manda le acque su e giù dal lago Delio, a quota 930 m, al lago Maggiore, a quota 200 m, con una potenza installata di 1300 MW, una delle maggiori d'Italia.

Esistono teoricamente anche altre possibilità, tra le quali lo stoccaggio dell'energia termica in composti che abbiano capacità termiche estremamente elevate e siano contenuti in serbatoi ben isolati. Ne abbiamo già in parte visto l'applicazione insieme alle centrali solari a concentrazione. Si possono anche utilizzare i cosiddetti "supercondensatori" che immagazzinano l'energia in forma elettrostatica senza reazioni chimiche, né termiche; oppure sistemi meccanici, come volani (pesanti ruote di fibre di carbonio che ruotano a velocità molto elevate in camere sottovuoto per evitare perdite d'attrito con l'aria) accoppiati a normali generatori elettrici. La caratteristica comune di questi sistemi è quella di potersi caricare e scaricare rapidamente, al contrario di quanto avviene con i tradizionali accumulatori elettrici, in modo da offrire rapidità di intervento per venire incontro ai picchi di domanda.



#### *4.5 La produzione di energia distribuita e la rete di trasporto*

Al termine di questa breve analisi delle diverse possibili forme di produzione dell'energia termica ed elettrica, occorre sottolineare ancora una volta come si assisterà nel prossimo futuro a un cambiamento notevole dello schema di funzionamento della rete elettrica che ha caratterizzato gli anni passati.

Il sistema finora è formato, da un lato, da grandi impianti di produzione che, a causa del loro elevato impatto ambientale, dovevano essere costruiti lontano dalle aree urbane e quindi dalla domanda di energia. Dall'altra parte, c'è un'utenza molto distribuita a cui l'energia deve essere fornita trasportandola attraverso linee ad alta e altissima tensione (fino a 500 kV) per ridurre al massimo le perdite. Una struttura, come si dice, ad "albero", con pochi grandi impianti alle radici e tanti piccoli e grandi utilizzatori sulle foglie. La corrente fluiva sempre in un senso ben determinato, dalle "radici" alle "foglie". Una rete di questo tipo, che è la struttura portante dell'energia elettrica italiana, nel 2007 "consumava" 21 TWh pari al 6,5% di tutti i consumi italiani.

In un futuro molto prossimo si andrà invece verso una struttura "a rete" con molti, anche piccoli, nodi di produzione e nodi di consumo, che talora potranno anche coincidere (chi ha il tetto fotovoltaico in certe ore produce più di quanto non consuma, e quindi immette energia nella rete, e in altre ore alimenta dalla rete i consumi che eccedono la propria produzione). La complessità di questa struttura a rete nasce dal fatto che non è più noto a priori in quale direzione scorra l'energia nei singoli rami e questo complica enormemente la sua gestione. D'altra parte un sistema così concepito, oltre a essere molto più robusto (un guasto in un punto di produzione non si estende automaticamente a tutti gli utenti collegati) può far risparmiare una parte notevole dell'energia oggi necessaria per il trasporto.

#### *4.6 Riduzione e livellamento del carico*

Il problema dell'energia non è solo un problema di produzione, ma anche (e forse soprattutto) un problema di consumo. È proprio per questo che la politica dell'Unione Europea prevede, entro il 2020, non solo l'aumento della produzione di energia da fonti rinnovabili, ma anche una consistente riduzione dei consumi. Questo è un problema ancora più difficile da affrontare perché non è solo una questione d'impianti e tecnologie, ma anche di abitudini e di comportamenti.



Tutti sono al corrente delle campagne fatte per sostituire i vecchi elettrodomestici con quelli a minor consumo (classe A e A+), così come è stato fatto per le automobili. Meno noto è forse che anche la struttura degli edifici, oltre alle utenze elettriche interne, può dare un contributo rilevante al risparmio energetico. La scelta dell'orientamento e dell'esposizione, della disposizione delle finestre, l'impiego di serramenti, vetri e materiali da costruzione isolanti, di doppie pareti esterne possono ridurre anche di 10 volte i consumi degli edifici che oggi assorbono circa il 40% dell'energia globalmente consumata in Europa. Di questo ci occuperemo in dettaglio nel capitolo "Risparmio energetico, usi finali e trasporti".

A tutte queste possibilità si aggiungono quelle offerte dalla domotica (la gestione computerizzata degli ambienti domestici) per controllare e migliorare il comfort interno, risparmiando energia. Nelle abitazioni, semplici sensori comandati da un piccolo processore possono essere usati per alzare o abbassare automaticamente le serrande così da mantenere all'interno la luminosità e la temperatura desiderate, per evitare di riscaldare o illuminare i locali quando non sono utilizzati, per migliorare i flussi di aria calda e fresca dei sistemi di riscaldamento e condizionamento, per regolare l'umidità e anche per segnalare anomalie.

Infine un'opzione disponibile è quella di cercare di "livellare" il carico, cioè di fare in modo che la domanda risulti più uniformemente distribuita nelle ore della giornata. La recente installazione da parte degli enti gestori di contatori elettrici digitali non ha solo lo scopo di consentire un controllo a distanza dei consumi, ma soprattutto quello di poter assegnare prezzi diversi all'elettricità nelle diverse ore della giornata in modo da rendere più conveniente l'utilizzo degli elettrodomestici al di fuori delle ore di punta e quindi, alla fine, di riuscire a modificare comportamenti che talvolta sono molto radicati.

## DIAMOCI DA FARE

### **Il termoutilizzatore di Brescia**

Il termoutilizzatore di Brescia è una centrale di produzione combinata di energia elettrica e termica che utilizza prioritariamente i rifiuti urbani della città (circa il 60%) insieme alle biomasse (Figura 5). Ha dunque un duplice vantaggio, lo smaltimento dei rifiuti e la produzione di energia.

Il termoutilizzatore è un impianto piuttosto complesso: riceve rifiuti, li brucia e utilizza il calore ricavato dalla loro combustione per produrre vapore ad alta temperatura e pressione. Questo vapore muove le pale di una turbina collegata a un

generatore che produce energia elettrica; il vapore a bassa pressione che resta inutilizzato viene convogliato nella rete di teleriscaldamento. I fumi prodotti dalla combustione sono poi opportunamente trattati prima di essere immessi in atmosfera.

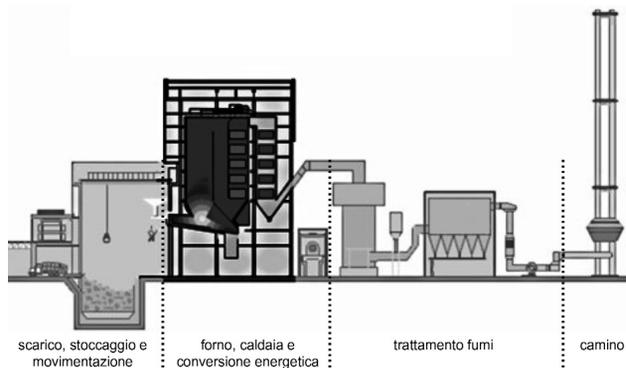
I rifiuti conferiti all'impianto sono rifiuti solidi urbani (RSU, vale a dire tutto quanto non viene recuperato attraverso la raccolta differenziata), rifiuti speciali provenienti da attività commerciali e biomasse. La composizione media tipica è:

- 34% di carta e cartone
- 20% di materie plastiche
- 37% di materie organiche, tessili e legno
- 9% di inerti, metalli, vetro ecc.

I rifiuti, che hanno un potere calorifico tra 1800 e 2400 kcal/kg, dopo la pesatura, accedono al termoutilizzatore attraverso un apposito "portale di controllo" dove sono installati strumenti per il rilevamento di eventuali sorgenti radioattive. Lo scarico degli automezzi e la movimentazione dei rifiuti avvengono in locali a tenuta ermetica e in depressione, per impedire anche la propagazione di odori all'esterno.

L'impianto è costituito da tre linee di combustione; le prime due, entrate in funzione nel 1998, trattano i rifiuti urbani e speciali, mentre la terza, avviata nel 2004, utilizza residui vegetali.

I rifiuti sono automaticamente immessi sulla griglia di combustione, costituita da 6 corsie parallele ciascuna con 15 gradini in movimento per consentire una miscelazione efficace e quindi una combustione completa. L'ossigeno necessario è quello presente nell'aria che viene appositamente dosata e immessa nella camera di combustione. La combustione delle parti solide avviene sulla griglia, dove la temperatura della fiamma è automaticamente regolata al valore di circa 1100 °C, così da eliminare gli inquinanti organici presenti nei rifiuti e, nel contempo, ridurre la formazione di ossidi di azoto e monossido di carbonio. La combustione



**Figura 5.** Schema dell'impianto di un termovalorizzatore.

del gas originato dalla griglia è completata nella zona sovrastante in cui viene immessa e vaporizzata un'opportuna miscela di acqua e ammoniaca per ridurre gli ossidi di azoto.

Dallo stadio "combustore" si hanno due prodotti: i fumi caldi che entrano nella caldaia per la generazione di vapore e le scorie che si raccolgono in fondo alla griglia. Le scorie (circa il 10% del materiale trattato) contengono rottami di ferro di varie dimensioni che vengono separati tramite un'elettrocalamita per poi essere riutilizzati in fonderia; la restante parte delle scorie è materiale inerte, riutilizzabile come sostituto della ghiaia per coprire i rifiuti in discarica.

All'interno della caldaia i fumi caldi provenienti dal combustore entrano in contatto con i tubi dell'acqua e del vapore, ai quali cedono calore. L'acqua in pressione si scalda e, nell'evaporatore, bolle e diventa vapore saturo che viene infine surriscaldato. L'acqua entra in caldaia, alla pressione di 80 bar e a una temperatura intorno a 130 °C. Il vapore esce dalla caldaia a una pressione di 70 bar e una temperatura di circa 460 °C.

Al sistema di trattamento giungono i fumi provenienti dalla caldaia, ai quali sono aggiunti calce idrata e carboni attivi. La calce idrata si combina con le sostanze nocive allo stato gassoso, in particolare l'acido cloridrico e fluoridrico e l'anidride solforosa e solforica, per formare sali di calcio, che diventano polveri poi trattate dal filtro.

I carboni attivi assorbono i microinquinanti residui (tra cui metalli pesanti, diossine e furani) incorporandoli nelle polveri. I fumi, prima di essere convogliati all'esterno attraversano lentamente i filtri a maniche che trattengono le polveri. Sono costituiti da feltri di speciali fibre sintetiche, lunghe 7 m e con un diametro di 13 cm. Ciascuna linea dell'impianto ha un filtro composto da circa 2000 maniche. Lo strato di polveri che si forma sull'esterno delle maniche viene periodicamente rimosso meccanicamente mediante getti di aria compressa e le polveri sono raccolte e trasportate ai siti di stoccaggio.

I fumi depurati fuoriescono dal camino a una altezza di 120 m; qui sono poste a varie quote apparecchiature di monitoraggio che misurano in continuo le concentrazioni di ossigeno ( $O_2$ ), monossido di carbonio (CO), biossido di zolfo ( $SO_2$ ), ossidi di azoto ( $NO_x$ ), acido cloridrico (HCl), polveri totali sospese (PTS) e fini (PM10), carbonio organico totale (COT). Alcune delle misure effettuate non servono solo al controllo delle emissioni per il rispetto dei limiti di legge, ma consentono anche di regolare in modo automatico il dosaggio degli additivi (calce idrata, ammoniaca) per ottimizzare la depurazione dei fumi. L'impianto riesce così a garantire un livello di emissioni inferiore a centrali termiche o elettriche alimentate con combustibili tradizionali a parità di energia elettrica e termica generata.

Dall'impianto, in grado di bruciare 700.000 t/anno di rifiuti e biomasse, è possibile ricavare 400 GWh di elettricità e di calore, corrispondenti a circa un terzo dell'energia immessa in rete in un anno nella città di Brescia.

I rifiuti urbani costituiscono una fonte di energia locale e "rinnovabile" (tanto da essere, in alcune normative, equiparata al solare o alle biomasse) non soggetta a

tensioni di mercato che ne possano condizionare il prezzo. Il loro utilizzo per la produzione di energia consente anche una riduzione del 43% delle emissioni di biossido di carbonio, rispetto all'impiego di combustibili fossili e allo smaltimento dei rifiuti in discarica, così che il sistema termoutilizzatore-teleriscaldamento ha reso Brescia una delle città più avanzate nella riduzione di emissioni di biossido di carbonio, anche a livello internazionale.

## FACCIAMO I CONTI

### Dimensionamento di un pannello fotovoltaico

Il dimensionamento di un impianto fotovoltaico anche di piccole dimensioni (per esempio, per un'abitazione monofamiliare) è un problema interessante perché coinvolge numerose tematiche, dalla fisica alla geografia astronomica, alla geometria.

Ci sono due questioni principali da esaminare: una è la quantità di energia che il Sole fa arrivare al suolo nel luogo d'installazione del pannello. Questa è un'analisi basata su questioni tipicamente geografiche e astronomiche come la latitudine, l'orbita terrestre e l'inclinazione dell'asse terrestre. La seconda è quanta parte di questa energia il pannello riesce a catturare: è un problema un po' di fisica e un po' di geometria per il posizionamento del pannello stesso.

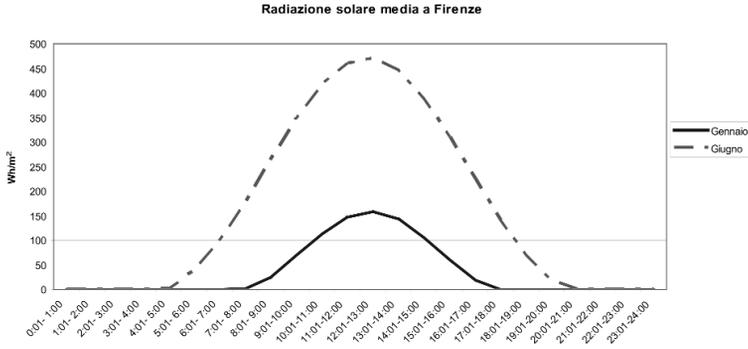
Cominciando dall'inizio, ricordiamo che l'orbita terrestre intorno al Sole è ellittica e quindi in certe stagioni l'energia che raggiunge la terra è maggiore che in altre (al solstizio d'inverno la radiazione è superiore del 7% di quella del solstizio d'estate), c'è però da tener conto che l'asse terrestre è inclinato rispetto al piano dell'orbita, ma soprattutto che la posizione dell'Italia è a una latitudine tra i 35° e i 47° nord e quindi i raggi solari arrivano sempre con una certa inclinazione. Va poi considerata anche la rotazione della Terra attorno al proprio asse, che fa sì che il sole sia visto in posizione diversa durante le ore del giorno e durante i diversi giorni dell'anno.

La formula finale, apparentemente un po' complicata, per calcolare la radiazione  $H_o$ , cioè l'energia solare che arriva su 1 m<sup>2</sup> di superficie nell'ora  $h$  del giorno  $t$  dell'anno in un punto di latitudine  $\varphi$  è la seguente:

$$H_o = C \cdot [\sin \varphi \cdot \sin \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos (15 \cdot (h - 12))]$$

dove la costante  $C$  tiene conto della "costante solare" (1368 W/m<sup>2</sup>) e dell'attenuazione dovuta all'atmosfera e  $\delta$  è la declinazione (posizione del sole a mezzogiorno rispetto al piano dell'equatore, che varia ancora sinusoidalmente con il giorno  $t$  dell'anno tra  $\pm 23,45^\circ$  per l'inclinazione dell'asse terrestre). Al di là della sua lunghezza, la formula ci dice che il valore è una costante per un termine di tipo sinusoidale di periodo un anno (fissata una latitudine,  $\sin \varphi$  e  $\cos \varphi$  sono solo delle costanti).

La Figura 6 mostra per esempio la radiazione media effettivamente registrata a Firenze nei giorni di gennaio e giugno. Sul sito del Ministero dell'Energia statunitense ([apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather\\_data.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data.cfm)) si possono trovare i valori per moltissime città italiane e di tutto il mondo. Infine, il pannello non è sempre perpendicolare alla radiazione, ma forma con es-



**Figura 6.** Andamento della radiazione solare media a Firenze nell'arco di una giornata di gennaio e di una giornata di giugno.

sa un certo angolo  $\beta$ , per cui, se  $H$  è l'energia che arriva al suolo, quella che colpisce il pannello ( $R$ ) è (ricordate il teorema di Gauss?):

$$R = H \text{ sen } \beta.$$

A questo punto, possiamo cercare di capire quanto grande deve essere il nostro pannello per fornire una certa energia (per esempio, 4 kWh/giorno). Per fare questo, generalmente si ricorre all'idea delle "ore di sole equivalenti", cioè si preferisce invece di fare la media sulle 24 ore delle curve del tipo in Figura 6, calcolare a quante ore corrisponderebbe la massima insolazione. Valori tipici sono riportati nella tabella seguente:

Ore sole equivalenti: kWh/m <sup>2</sup> -giorno			
Fascia climatica	Medie di dicembre	Medie di luglio	Media annua
Nord (Milano)	1,3	5,6	3,6
Centro (Roma)	2,7	6,4	4,7
Sud (Trapani)	3,5	7,1	5,4

Per calcolare la potenza di picco dei pannelli che ci servono, ci mettiamo ovviamente nel caso peggiore, cioè con l'insolazione di Dicembre.

La superficie  $S$  dei pannelli è pari all'energia richiesta  $E$  (4 kWh nel nostro esempio) diviso l'energia incidente (per esempio, a Roma) e il rendimento complessivo dell'impianto, che varia tra l'8% e il 6% a seconda che i moduli siano di silicio monocristallino o policristallino:

$$S = E / (H \cdot \text{rendimento impianto}) = 4 / (2,7 \cdot 0,08) \sim 18 \text{ m}^2$$

La potenza di picco  $P$  dell'impianto sarà data dal prodotto del rendimento dei moduli (es. 13% per il silicio monocristallino, 11% per il policristallino) per la superficie:

$$P = \text{rendimento} \cdot S = 0,13 \cdot 18 = 2,4 \text{ kWp.}$$

Notate che i pannelli producono in realtà molta più energia, dato che sono stati dimensionati per soddisfare la domanda nelle condizioni peggiori.

Una valutazione approssimata dell'energia producibile si trova facilmente su Internet per specifiche località (vedi Regione Lombardia, *Bollettino Ufficiale*, III supplemento straordinario, 20 luglio 2007), o per aree geografiche (vedi tabella seguente), così come si trovano calcolatori anche molto dettagliati per il dimensionamento dei pannelli (per esempio: [www.calcolainrete.com](http://www.calcolainrete.com) o [www.portalsole.it](http://www.portalsole.it)).

Energia utile [kWh/m <sup>2</sup> anno]		
Fascia climatica	silicio monocristallino	silicio policristallino
Nord (Milano)	150	130
Centro (Roma)	190	160
Sud (Trapani)	210	180

## DOCUMENTIAMOCI

### **[ec.europa.eu/energy](http://ec.europa.eu/energy)**

È il portale dell'Unione Europea dedicato all'energia. Si trovano molte informazioni riguardo alle strategie e politiche in tema di energia e clima, alle statistiche di produzione e utilizzo dell'energia per tutti i Paesi dell'UE (in particolare si rimanda alla bella pubblicazione annuale *Energy and Transport in Figures*), ai progetti di ricerca e applicativi finanziati dall'UE, alla legislazione europea del settore.

### **[laviadellenergia.it](http://laviadellenergia.it)**

Sito con la storia dell'energia e delle centrali e i dati tecnici territoriali sulla rete di produzione in Lombardia. Immagini, dati e riferimenti anche per visitare tutte le centrali della regione.

### **[www.autorita.energia.it](http://www.autorita.energia.it)**

Sito dell'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas (AEEG), autorità indipendente istituita nel 1995 per regolare e controllare il settore. Il sito fornisce informazioni sulle normative, gli operatori, i prezzi. C'è una buona sezione statistica con dati di produzione e consumo, numero e lunghezza delle interruzioni di fornitura.

### **[www.enel.it](http://www.enel.it)**

Il sito dell'ENEL non fornisce dati di dettaglio, ma molte informazioni aggregate e una serie di articoli su molti dei temi trattati in questo capitolo, così come sull'utilizzo dell'energia elettrica in molti settori diversi. C'è un settore didattico dedicato soprattutto alla scuola primaria.

### **[www.energy.gov](http://www.energy.gov)**

Sito del Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti. Fornisce molte informazioni utili sulla situazione americana, ma anche notizie sull'evoluzione delle tecnologie e sulle azioni di risparmio intraprese. Contiene anche una sezione con materiale didattico dedicata agli studenti.



**www.eurelectric.org**

Sito dell'Associazione Europea dell'Industria Elettrica. Fornisce statistiche comparate sulla produzione e il consumo di elettricità dei Paesi europei e del Mediterraneo, relative agli anni dal 2003 in poi. Ci sono anche numerosi articoli e prese di posizione ufficiali degli industriali del settore da tutta Europa.

**www.gse.it**

Il Gestore Nazionale dei Servizi Elettrici (ex GRTN) mette a disposizione tutti i dati di produzione e consumo per tipologia di fonte e per regione dal 2000, con particolare riguardo alle fonti rinnovabili e alla relative normative, inclusi gli incentivi.



## GLI EFFETTI AMBIENTALI DELLA PRODUZIONE DI ENERGIA: INQUINAMENTO LOCALE

Tutte le tecnologie esaminate nel capitolo precedente – o forse sarebbe più completo dire tutte le azioni dell'uomo – comportano una certa emissione di inquinanti atmosferici: agenti fisici (particolati), chimici e biologici che modificano la naturale composizione dell'atmosfera (anche se sta diventando difficile ritrovare esattamente questa composizione atmosferica in qualsiasi parte del globo si vada). Ciò è dovuto sostanzialmente a tre ragioni, che affronteremo in parte in questo capitolo e in parte nel prossimo.

Per prima cosa, la grandissima parte dell'energia che utilizziamo oggi deriva dalla combustione: se la combustione fosse perfetta, i prodotti sarebbero solo biossido di carbonio (detto anche anidride carbonica) e acqua, ma nella realtà non avviene mai in modo perfetto, perché non si riesce a operare nelle condizioni di temperatura e pressioni ideali.

La seconda ragione è che i combustibili fossili utilizzati non sono puri al 100%, ma il risultato di un processo di estrazione e raffinazione lungo e complesso che non è mai perfetto. Sono quindi rimaste nei combustibili concentrazioni più o meno elevate di impurità che durante la combustione danno luogo a ulteriori composti che sono successivamente emessi.

La terza ragione è che anche i processi che non sfruttano i combustibili fossili richiedono macchine e strutture la cui costruzione e il cui utilizzo comportano, a loro volta, emissioni in atmosfera.

Va poi rilevato che l'impatto ambientale dei sistemi energetici va molto al di là delle emissioni inquinanti in atmosfera, anche se in molti casi questo è l'aspetto ritenuto più significativo. Tra gli altri impatti importanti c'è, per esempio, il problema della contaminazione da idrocarburi, il riscaldamento delle acque da parte delle centrali termoelettriche che le utilizzano per il raffreddamento, la modifica del paesaggio legata alla costruzione di strutture di grandi dimensioni (a volte le ciminiere delle centrali raggiungono altezze di

200 m), i rumori, gli scarichi di inquinanti nelle fognature e così via. Gli stessi impatti relativi alla qualità dell'aria, su cui ci focalizzeremo in questo capitolo data la loro rilevanza per la salute umana, sono dovuti a una grande varietà di fenomeni diversi.

Gli inquinanti possono essere suddivisi in tre categorie. La prima è costituita dai macroinquinanti: sono emessi in grandi quantità dai sistemi di produzione dell'energia e, data appunto la loro massa notevole, possono essere misurati abbastanza precisamente con strumenti che ne rilevano la concentrazione in uscita dalle ciminiere. Di solito si tratta degli inquinanti legati al processo di combustione vero e proprio.

La seconda è costituita dai microinquinanti: sono emessi in quantità estremamente ridotte e, pertanto, molto difficili da misurare. Non per questo sono sostanze meno pericolose, anzi nella maggior parte dei casi si tratta di sostanze tossiche o cancerogene e quindi, nonostante le concentrazioni modeste, potenzialmente assai dannose per la nostra salute.

La terza categoria di inquinanti, detti "secondari", è caratterizzata dal fatto di non essere direttamente emessa, ma di formarsi nell'atmosfera stessa in conseguenza di reazioni chimiche con altri gas, i "precursori". Tipico esempio di inquinante secondario è l'ozono che, negli strati inferiori dell'atmosfera, è frutto di reazioni fotochimiche di altri componenti presenti nel comparto (ossidi di azoto e composti organici volatili). Si parla in questo caso di "ozono troposferico", un inquinante dannoso soprattutto per la vegetazione. A livello stratosferico invece l'ozono è indispensabile perché schermo in parte la Terra dalla radiazione ultravioletta proveniente dal Sole (è a quest'ultimo caso che si riferisce il "buco dell'ozono").

La gran parte dei fenomeni d'inquinamento atmosferico conosciuti si sviluppa nello strato limite planetario (dal livello del mare fino a 500-1000 m di quota), ma importanti alterazioni possono interessare quote più alte della troposfera (fino a 12.000 m di quota) e della stratosfera (fino a 85.000 m) o addirittura l'atmosfera nel suo complesso.

Il fenomeno è stato studiato da tre punti di vista principali:

- l'attività di sorgenti antropiche e naturali che emettono sostanze inquinanti;
- il trasporto, la diffusione, la rimozione e la trasformazione delle sostanze nell'atmosfera, che ne risulta in varia misura alterata;
- l'effetto delle alterazioni indotte sui recettori (uomini, vegetali e materiali) esposti ad atmosfere inquinate.

Le scale spaziali e temporali con cui l'inquinamento si manifesta sono di particolare interesse sia per l'analisi del fenomeno, sia per la predisposizione degli interventi. Anche gli effetti differiscono a seconda dei settori e delle fonti di emissione. I più studiati sono quelli che preoccupano maggiormente sotto il profilo sanitario; anche danni all'agricoltura e ai materiali degli edifici sono stati ampiamente analizzati, mentre solo recentemente si sono iniziati a valutare i danni agli ecosistemi (acidificazione di suoli e danni alle foreste, processi di eutrofizzazione di suoli e acque).

### 1. I meccanismi di trasporto e diffusione

Le condizioni dell'atmosfera giocano un ruolo essenziale nei fenomeni d'inquinamento. Per comprendere come possono essere valutati gli effetti delle emissioni sulla salute e sull'ambiente, occorre tenere presente quali sono i loro meccanismi d'azione e quindi quali metodi possono essere utilizzati per effettuare queste valutazioni. Naturalmente, nel caso di impianti esistenti è possibile anche raccogliere dati sul campo, cosa che non è possibile in fase di analisi di un nuovo progetto.

I meccanismi d'azione e gli effetti delle emissioni in atmosfera sono schematicamente illustrati nella Figura 1. I parametri fisico-chimici

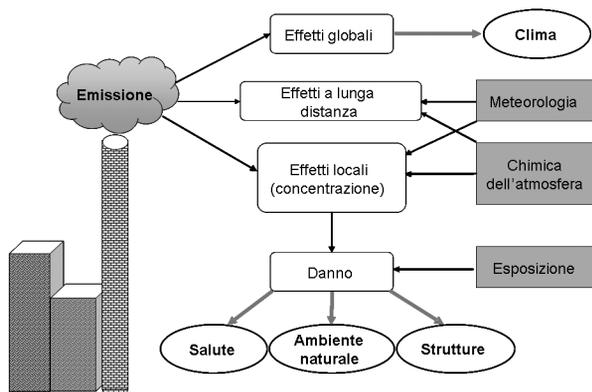


Figura 1. Meccanismi di azione delle emissioni e condizioni che ne determinano gli effetti.



dell'emissione (in particolare, le concentrazioni emesse, l'altezza del camino, la temperatura e la velocità di uscita dei fumi) determinano in primo luogo le modalità di innalzamento del pennacchio e quindi quali strati dell'atmosfera sono interessati. Il fumo di un camino alto 200 m può essere emesso a temperatura di 100 °C e a velocità di 30 m/s e può raggiungere altezze dell'ordine del chilometro. Il diverso grado di miscelazione degli strati determina poi la parte dell'emissione che ricade in un raggio di qualche chilometro dall'impianto e quella che viene invece trasportata più lontano.

Nella suddivisione di queste due frazioni gioca un ruolo fondamentale anche la meteorologia: la temperatura, la direzione e la velocità del vento, la pressione e la stabilità dell'atmosfera. È quindi possibile determinare le concentrazioni al suolo dovute a un'emissione di caratteristiche note solo facendo riferimento a condizioni meteorologiche ben definite (per esempio, quelle dell'area dove si progetta di localizzare l'impianto).

Anche la situazione chimica già presente nell'atmosfera gioca un ruolo importante, sia perché consente di distinguere i casi in cui la nuova emissione va a sommarsi a un inquinamento già presente (e quindi causa un aumento di concentrazioni già elevate), sia perché determina il tipo di reazioni chimiche che l'emissione subisce. Queste giocano un ruolo fondamentale soprattutto nella formazione degli inquinanti secondari che possono essere rilevati anche a distanza notevole dalle sorgenti dei gas precursori. A seconda dei venti, queste distanze possono essere di diverse decine di chilometri e possono anche estendersi in nazioni diverse da quelle che hanno generato le emissioni.

Anche gli inquinanti primari possono essere rilevati a grandi distanze dal punto di emissione, poiché talvolta arrivano così in alto nell'atmosfera da interessare gli strati dove soffiano permanentemente venti a elevata velocità. Si parla in questi casi di "trasporto a lunga distanza", un fenomeno che fa sì che, per esempio, siano rilevate concentrazioni di inquinanti non trascurabili al Plateau Rosa a 3488 m sulle pendici del Cervino a centinaia di chilometri da rilevanti fonti di emissione. La conferma più drammatica di questo fenomeno si è avuta nel 1986 con l'esplosione del reattore nucleare di Černobyl in Ucraina: le elevatissime temperature e la violenza dell'esplosione hanno portato residui radioattivi del reattore fino a quote di 6 km, facendo sì che ricadessero su tutta Europa, Italia compresa, a migliaia di chilometri di distanza e per diversi giorni.





Una volta nota la concentrazione nell'ambiente (che, per quello che si è appena detto, varia continuamente nel tempo e nello spazio a causa dei cambiamenti meteorologici) si può capire abbastanza bene quali siano i danni che essa può provocare alle strutture e alla vegetazione, mentre non è ancora ben definito quali possano essere i danni per la salute umana. Esiste in effetti un altro importante componente del sistema che è rappresentato dalla cosiddetta "esposizione", cioè dai comportamenti assunti in corrispondenza di una determinata concentrazione: per esempio, svolgere attività sportive in presenza di valori elevati di particolato o anche di ozono aumenta chiaramente lo stress subito dal sistema respiratorio e può determinare conseguenze serie in persone che già soffrono di asma.

Va poi rilevato che per quanto riguarda la salute e l'ambiente si è soliti distinguere tra effetti "acuti" e "cronici" dell'inquinamento. Nel primo caso si fa riferimento ai danni derivanti alla salute e agli ecosistemi da una breve esposizione (al più qualche giorno) a elevate concentrazioni di inquinante, mentre nel secondo ci si riferisce a ciò che provocano esposizioni prolungate a concentrazioni mediamente più basse. Quest'ultima situazione è di solito la più grave per quanto riguarda i danni alla vegetazione e naturalmente è l'unica che conta per quanto riguarda le costruzioni. È infine evidente che, dato che per alcuni inquinanti, tra i quali anche il particolato fine e ultrafine, si sono iniziate sistematiche misurazioni solo da qualche decina di anni, non sono oggi disponibili molti dati sperimentali e, anche se la pericolosità del particolato per la salute è ampiamente documentata, è assai difficile giungere a valutazioni precise dei danni che esso comporta. Ancora più difficile è attribuire i danni a una determinata emissione o a un impianto tipo, perché sarebbe necessario conoscere anche la meteorologia locale e l'esposizione della popolazione, dell'ambiente e delle strutture, che sono legate a una precisa localizzazione. Riassumeremo qui di seguito gli effetti noti dei principali macroinquinanti, mentre nel capitolo "Le risposte istituzionali" illustreremo le possibili valutazioni economiche di questi effetti.

## 2. I principali inquinanti legati alla combustione

I principali inquinanti associati alla combustione sono: il particolato (PM), gli ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ ) e di zolfo ( $\text{SO}_x$ ), i composti organici volatili (COV), l'ossido di carbonio (CO), l'ozono



(O<sub>3</sub>), i microinquinanti cancerogeni (il benzene, l'1,3 butadiene e il benzo-a-pirene) e i metalli pesanti.

Negli anni recenti, grazie a strumenti di misura sempre più sofisticati è stato possibile monitorare questi inquinanti con crescente accuratezza, mentre l'uso di nuove tecnologie di combustione e depurazione dei fumi ne ha ridotto sistematicamente le quantità emesse. Per esempio, le emissioni di ossidi di azoto in Italia nel periodo 1990-2008 si sono ridotte del 43% in tutti i settori e in particolare in quelli della produzione di energia e nei trasporti, grazie all'introduzione della marmitta catalitica sulle autovetture.

### 2.1 Il particolato

Particolato, particolato sospeso, pulviscolo atmosferico, polveri sottili, polveri totali sospese (PTS) o PM (dall'inglese *Particulate Matter*) sono termini che identificano comunemente l'insieme delle sostanze sospese in aria. Il particolato è l'inquinante oggi considerato di maggiore impatto nelle aree urbane; è composto da tutte le particelle disperse nell'atmosfera, con un diametro che va da pochi nm fino ai 500 micron ( $\mu\text{m}$ ) e oltre (cioè da miliardesimi di metro a mezzo millimetro).

Si tratta di sostanze allo stato solido o liquido che, a causa delle piccole dimensioni, restano sospese in atmosfera per tempi più o meno lunghi. Non costituiscono quindi un gas, ma un insieme di composti che può contenere sabbie, ceneri, polveri, fuliggine, sostanze silicee di varia natura, sostanze vegetali, composti metallici, fibre tessili naturali e artificiali, sali, elementi come il carbonio o il piombo ecc. In base alla natura e alle dimensioni delle particelle possiamo distinguere:

- gli *aerosol*, costituiti da particelle solide o liquide sospese in aria e con un diametro inferiore a 1 micron ( $1\ \mu\text{m}$ );
- le *foschie*, date da goccioline con diametro inferiore a  $2\ \mu\text{m}$ ;
- le *esalazioni*, costituite da particelle solide con diametro inferiore a  $1\ \mu\text{m}$  e rilasciate solitamente da processi chimici e metallurgici;
- il *fumo*, dato da particelle solide con diametro inferiore ai  $2\ \mu\text{m}$  e trasportate da miscele di gas;
- le *polveri* vere e proprie, costituite da particelle solide con diametro fra  $0,25$  e  $500\ \mu\text{m}$ ;
- le *sabbie*, date da particelle solide con diametro superiore ai  $500\ \mu\text{m}$ .



Le particelle primarie sono quelle emesse direttamente dalle sorgenti naturali e antropiche, mentre le secondarie si originano da una serie di reazioni chimiche e fisiche in atmosfera. Le particelle fini hanno un diametro inferiore a  $2,5 \mu\text{m}$ , le altre sono dette grossolane e sono costituite esclusivamente da particelle primarie. Il particolato che ha un diametro inferiore a  $10 \mu\text{m}$  è detto PM<sub>10</sub>, mentre il PM<sub>2,5</sub>, che costituisce normalmente circa il 60% del PM<sub>10</sub>, è costituito dalle particelle che hanno un diametro inferiore a  $2,5 \mu\text{m}$ .

Le principali fonti naturali di particolato primario sono le eruzioni vulcaniche, gli incendi boschivi, l'erosione e la disgregazione delle rocce, le piante (pollini e residui vegetali), le spore, lo spray marino e i resti degli insetti. Il particolato primario di origine antropica è invece dovuto all'utilizzo di alcuni combustibili fossili (per il riscaldamento domestico, nelle centrali termoelettriche ecc.), alle emissioni degli autoveicoli, all'usura di pneumatici, freni e manto stradale, a vari processi industriali (fonderie, miniere, cementifici ecc.) e anche a varie attività agricole. Il particolato secondario è costituito da particelle fini che si originano in seguito all'ossidazione di varie sostanze, quali il biossido di zolfo e l'acido solfidrico emessi dagli incendi e dai vulcani e gli ossidi di azoto liberati dai terreni e dalle varie sorgenti antropiche.

Si stima che ogni giorno nel mondo siano immesse nell'aria circa 10 milioni t di particolato, il 94% delle quali è di origine naturale. La concentrazione nell'aria di queste particelle è comunque limitata dalla naturale tendenza a depositarsi al suolo per effetto della gravità e dell'azione delle nubi e delle piogge (rimozione umida). Nell'aria pulita in genere la concentrazione di questo inquinante è dell'ordine di  $1-1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Oltre che dalla natura dei venti e dalle precipitazioni, la permanenza in atmosfera è fortemente condizionata dalle dimensioni delle particelle. Quelle che hanno un diametro superiore a  $50 \mu\text{m}$  sono visibili nell'aria e sedimentano piuttosto velocemente, causando fenomeni d'inquinamento su scala molto ristretta. Le più piccole possono rimanere in sospensione per molto tempo; alla fine gli urti casuali e la reciproca attrazione le fanno collidere e riunire assieme, in questo modo raggiungono dimensioni tali da acquistare una velocità di caduta sufficiente a farle depositare al suolo. Le polveri PM<sub>10</sub> possono rimanere in sospensione per 12 ore circa, mentre le particelle con un diametro inferiore a  $1 \mu\text{m}$  fluttuano nell'aria anche per un mese.



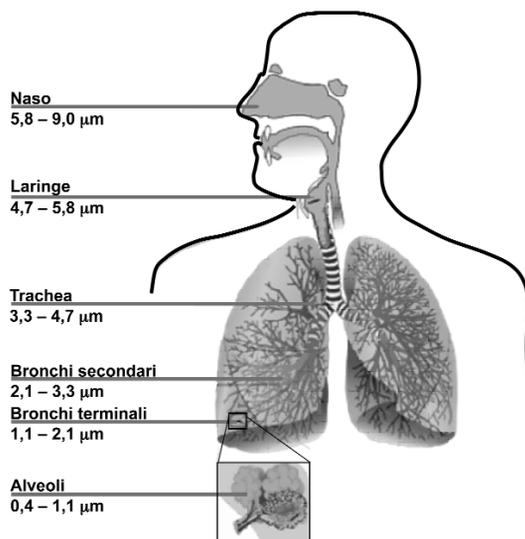
Il particolato emesso dai camini di altezza elevata può essere trasportato dagli agenti atmosferici anche a grandi distanze. Parte dell'inquinamento di fondo riscontrato in una determinata città può quindi provenire da un'industria situata a diversi chilometri dal centro urbano. Nei centri urbani l'inquinamento da polveri fini è essenzialmente dovuto al traffico veicolare e al riscaldamento domestico. Per questo motivo, quando la concentrazione di particolato nell'aria diventa troppo alta, sono decise limitazioni al traffico; in varie nazioni può anche essere imposto un limite alla temperatura del riscaldamento negli ambienti chiusi: 18 °C in Germania o 20 °C in Italia.

### 2.1.1 Effetti del particolato sull'organismo umano

Un individuo adulto respira da 6 a 9 litri d'aria al minuto in condizioni di riposo (9-13 m<sup>3</sup> al giorno), 60 l/minuto in condizioni di attività fisica moderata e 130 l/minuto durante l'attività fisica più intensa. L'inquinamento atmosferico, dunque, influisce soprattutto sull'apparato respiratorio, dal naso e dalla bocca sino agli alveoli polmonari. Il pericolo del particolato deriva dalla sua deposizione lungo le pareti dell'apparato respiratorio: ovviamente, poiché il diametro dell'apparato respiratorio diminuisce dal naso verso gli alveoli, il diametro delle particelle che possono penetrare nell'apparato diminuisce con l'aumentare della profondità.

Come si può osservare nella Figura 2, le particelle di diametro maggiore, tra i 10 e i 4,7 µm si depositano sopra la laringe, nelle vie con diametro maggiore; sotto i 4,7 µm le particelle arrivano sino ai bronchi e sotto l'1,1 µm penetrano fino agli alveoli. Tra le caratteristiche delle particelle che influenzano la loro inalabilità ci sono la dimensione, la forma, la carica elettrica, la densità, l'igroscopia. Purtroppo, è noto che queste caratteristiche sono influenti, ma non si sa bene in quali modi e in quale misura. La proporzione di particelle inalate rispetto al totale presente in sospensione nell'aria dipende dalla velocità e dalla direzione dell'aria, dalla frequenza respiratoria e dalla respirazione dal naso o dalla bocca. Quando la respirazione dalla bocca aumenta (per esempio, durante l'esercizio fisico o la conversazione) diminuiscono le deposizioni nella laringe, mentre aumentano quelle in trachea bronchi e polmoni.

Il particolato che non viene subito espirato non si distribuisce uniformemente lungo tutta la superficie disponibile (in totale si parla di 130-150 m<sup>2</sup>), ma si concentra nei cosiddetti *hot spots*, in corri-



**Figura 2.** Profondità di penetrazione delle particelle in funzione del diametro delle componenti dell'apparato respiratorio (rielaborato da [www.arpa.emr.it/liberiamo](http://www.arpa.emr.it/liberiamo)).

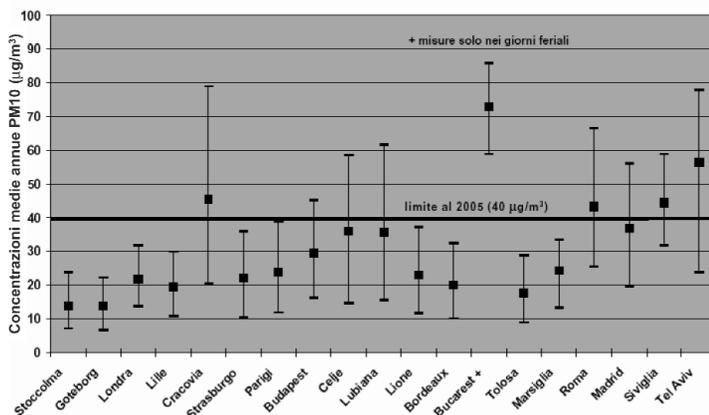
spondenza di biforcazioni, dove l'aria ha maggiore velocità. Se le particelle sono solubili, possono essere assorbite dai tessuti nel punto dove si depositano, provocando danni intorno a tale punto.

Le vie respiratorie sono naturalmente dotate di meccanismi di difesa: la regione nasale è protetta dalla normale pulizia e dagli starnuti; le vie aeree superiori sono rivestite da una mucosa costituita prevalentemente da cellule cigliate (dotate di minuscoli peluzzi) e da cellule caliciformi, che secernono muco: le ciglia si muovono a onda, in maniera coordinata, trasportando la patina di muco nella quale rimangono imprigionate le sostanze estranee fino alla cavità orale, dove sono inghiottite. Tra le cellule della mucosa, inoltre ci sono terminazioni nervose che, se irritate, provocano una contrazione della muscolatura bronchiale e, quindi, la tosse. Tali processi possono richiedere uno o più giorni. Anche nella regione tracheobronchiale l'azione ripulente è affidata alle mucose, che riversano il loro secreto nell'apparato gastrointestinale, entro 24 ore dalla deposizione delle particelle. Nei polmoni le particelle insolubili sono rimosse per fagocitosi dai macrofagi alveolari, oppure entrano nell'interstizio polmonare attraverso un processo di endocitosi per opera di cellule del-

l'epitelio alveolare. Purtroppo le sostanze nocive presenti nel particolato possono danneggiare in vario modo proprio questi meccanismi di difesa, rallentandoli o inibendoli.

### 2.1.2 Valutazioni epidemiologiche

Benché sia difficile generalizzare le conseguenze dell'inhalazione del particolato, l'Organizzazione Mondiale della Sanità ha rilevato che in tutti gli studi compiuti l'aumento di concentrazione nell'ambiente corrisponde a un aumento della mortalità e della morbilità. In particolare, si registrano incrementi delle malattie dell'apparato respiratorio (situazioni di asma e di bronchite) e dell'apparato cardiovascolare (aritmie, aumento della viscosità del sangue) in corrispondenza di esposizioni sia acute (al di sopra di  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), sia croniche (al di sopra di  $40\text{-}50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). I molti studi svolti sugli effetti del particolato sulla salute si sono tuttavia indirizzati per lo più alle frazioni più grossolane, tipicamente il  $\text{PM}_{10}$ , e solo più di recente si è posta attenzione al  $\text{PM}_{2.5}$  e al  $\text{PM}_1$ . Quasi tutti gli studi considerano gli ambienti urbani, dove vive la gran parte della popolazione e dove si registrano già concentrazioni di  $\text{PM}_{10}$  notevolmente elevate. La Figura 3 mostra la concentrazione media annua di diverse città e le relative oscillazioni, paragonata al limite di  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  che dovrebbe essere rispettato a partire dal 2005. Anche a causa di questa localizzazione urbana, la maggior parte degli studi si concentra sugli ef-



**Figura 3.** Concentrazioni medie annue, 10° e 90° percentile di  $\text{PM}_{10}$  in alcune città (tra il 1996 e il 2000). Rielaborazione APAT su dati del progetto APHEIS.



fetti del valore medio annuo dell'inquinamento da PM10. D'altra parte, per mettere in luce le relazioni tra produzione di energia e inquinamento è più significativo concentrarsi sugli effetti di lungo periodo (dell'ordine del ciclo di vita degli impianti) rispetto a quelli a breve, che possono essere causati da situazioni meteorologiche del tutto anomale o da rilasci accidentali di inquinante. Nella complessa situazione che abbiamo brevemente delineato, citeremo solo, a titolo di esempio, le valutazioni a cui sono giunti due studi molto significativi.

Il primo è dell'American Cancer Society e, benché centrato sul problema dei tumori, ha coinvolto circa 1,2 milioni di persone di almeno 30 anni d'età, fumatori e no, con diversi tipi di attività e quindi di esposizione in tutti gli USA. Per 50 aree metropolitane, corrispondenti a circa 300 mila residenti, erano disponibili dati sul particolato che andavano da una concentrazione media annua di PM2,5 di  $9,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  fino a un massimo di  $33,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . I risultati di un periodo di osservazione di 16 anni hanno stimato un incremento della mortalità naturale del 6% per un incremento medio di  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  del PM2,5, e dell'8% per quella cardiovascolare.

Il secondo è uno studio dell'Organizzazione Mondiale della Sanità relativo a Torino, Milano, Genova, Bologna, Firenze, Roma, Napoli e Palermo, dove risiede complessivamente il 15% della popolazione italiana, che ha dato i risultati riportati nella Tabella 1. Le concentrazioni medie (stimate al 1999) andavano dai  $44,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  di Palermo ai  $53,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  di Torino.

È importante notare che questo tipo di valutazioni ha un significato puramente statistico e non si tratta di relazioni che possono essere tradotte in modo meccanico in valori numerici. In effetti, la valutazione è corredata di un "intervallo di incertezza" che serve a capire quale variabilità ci può essere nella stima. Per esempio, un valore mediamente elevato con una variabilità bassa (come quello nella tabella relativo ai giorni di attività ridotta) può essere ritenuto meno critico di un valore più basso, ma con un'elevata variabilità (per esempio, nella stessa tabella, l'aggravamento delle bronchiti croniche che può arrivare, con i limiti di confidenza statistica utilizzati, al 18%). È quindi essenziale che questo tipo di analisi mostri non solo i valori più probabili, ma anche dia un'idea dell'incertezza a essi associata per consentire un'effettiva valutazione dei rischi connessi. Effetti di poco superiori sembrano applicarsi anche al PM2,5, pur su una base sperimentale molto più ridotta.



*Tabella 1. – Effetti di un aumento di  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  della media annua di PM10 in 8 città italiane*

Indicatore	Incremento (%)	Limiti di confidenza al 95%	
Mortalità non accidentale	2,6	0,9	4,3
Ospedalizzazione per problemi respiratori	1,6	1,3	2
Ospedalizzazione per problemi cardiovascolari	0,9	0,6	1,3
Bronchiti croniche (individui > 25 anni)	9,3	0,9	18
Aggravamento asma (individui > 15 anni)	0,4	0	0,8
Giorni di attività ridotta (individui > 20 anni)	9,4	7,9	10,9
Sintomi di problemi respiratori	7	2	11

Al di fuori dell'ambito urbano, le concentrazioni sono di solito al di sotto dei valori che producono effetti percepibili (la concentrazione di fondo di PM10 dovuta ai soli fenomeni naturali si stima intorno ai  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) e la popolazione interessata dall'inquinamento è molto più dispersa. Ciò fa sì che le valutazioni degli impatti del PM10 stmino in ambito extraurbano danni inferiori di oltre due ordini di grandezza rispetto a quelli della popolazione delle città.

Gli effetti del particolato sul clima e sui materiali sono piuttosto evidenti. Il particolato dei fumi e delle esalazioni provoca una diminuzione della visibilità atmosferica; allo stesso tempo diminuisce anche la luminosità assorbendo o riflettendo la luce solare. Negli ultimi 50 anni si è notata una diminuzione della visibilità del 50%; anche questo fenomeno risulta tanto più grave quanto più ci si avvicina alle grandi aree abitative e industriali. Le polveri sospese costituiscono i nuclei di condensazione attorno ai quali si condensano le gocce d'acqua e di conseguenza favoriscono il verificarsi dei fenomeni delle nebbie e delle piogge acide, che comportano effetti di erosione e corrosione dei materiali e dei metalli.

Il particolato inoltre danneggia i circuiti elettrici ed elettronici, insudicia gli edifici e le opere d'arte e riduce la durata dei tessuti. Le polveri (per esempio, quelle emesse dai cementifici) possono depositar-



si sulle foglie delle piante e formare una patina opaca che, schermando la luce, ostacola il processo della fotosintesi.

Gli effetti del particolato sul clima sono invece piuttosto discussi. Sicuramente un aumento del particolato in atmosfera comporta una diminuzione della temperatura terrestre per un effetto di schermatura della luce solare (come vedremo nel capitolo “Energia, effetto serra e cambiamenti climatici”). Tale azione è comunque mitigata dal fatto che le particelle riflettono anche le radiazioni infrarosse provenienti dalla Terra. È stato comunque dimostrato che negli anni immediatamente successivi alle più grandi eruzioni vulcaniche di tipo esplosivo (caratterizzate dalla emissione in atmosfera di enormi quantità di particolato) sono seguiti anni con inverni particolarmente rigidi. Alcune ricerche affermano che un aumento di 4 volte della concentrazione del particolato in atmosfera comporterebbe una diminuzione della temperatura globale del 3,5 °C.

## 2.2 Ossidi di azoto

$\text{NO}_x$  è la sigla generica degli ossidi d’azoto e nel caso d’inquinamento dell’aria sta a indicare l’insieme del monossido di azoto (NO) e del biossido di azoto ( $\text{NO}_2$ ). Il *monossido di azoto* è un gas incolore, insapore e inodore, chiamato un tempo ossido nitrico. È prodotto soprattutto nel corso dei processi di combustione ad alta temperatura assieme al biossido di azoto (che costituisce meno del 5% degli  $\text{NO}_x$  totali emessi), nell’atmosfera è poi ossidato dall’ossigeno e più rapidamente dall’ozono, producendo biossido di azoto. La tossicità del monossido di azoto è limitata, al contrario di quella del biossido di azoto che è invece notevole. Il *biossido di azoto* è di colore giallo-rosso, ha odore forte e pungente e grande potere irritante; è un energico ossidante, molto reattivo e quindi altamente corrosivo; esiste nelle due forme  $\text{N}_2\text{O}_4$  (forma dimera) e  $\text{NO}_2$  che si forma per dissociazione delle molecole dimere. Il colore rossastro dei fumi è dato dalla presenza della forma  $\text{NO}_2$  (quella prevalente) e provoca il ben noto colore giallognolo delle foschie che ricoprono le città a elevato traffico. Rappresenta un inquinante secondario dato che deriva per lo più dall’ossidazione in atmosfera del monossido di azoto. È fondamentale nella formazione dello smog fotochimico, in quanto costituisce l’intermedio di base per la produzione di tutta una serie di inquinanti secondari molto pericolosi, come l’ozono, l’acido nitrico, l’acido nitroso, gli alchilnitrati ecc.



Si stima che gli ossidi di azoto contribuiscano per il 30% alla formazione delle piogge acide (il restante è imputabile al biossido di zolfo e ad altri inquinanti). Da notare che gli ossidi di azoto sono per lo più emessi da sorgenti al suolo e sono solo parzialmente solubili in acqua; questo influenza notevolmente il trasporto e gli effetti a distanza.

Su scala globale si stima che le emissioni di ossidi di azoto naturali e causate dall'uomo siano dello stesso ordine di grandezza (circa 200 milioni t/anno). Le sorgenti naturali sono costituite essenzialmente dalle decomposizioni organiche anaerobiche che riducono i nitrati a nitriti, dall'azione dei fulmini, dagli incendi e dalle emissioni vulcaniche. La principale fonte antropica di ossido di azoto è data dalle combustioni ad alta temperatura, come quelle che avvengono nei motori degli autoveicoli: l'elevata temperatura che si origina durante lo scoppio provoca la reazione fra l'azoto dell'aria e l'ossigeno formando monossido di azoto; la quantità prodotta è tanto più elevata quanto maggiore è la temperatura di combustione e quanto più veloce è il successivo raffreddamento dei gas, che impedisce la decomposizione in azoto e ossigeno. Quando i fumi si mescolano all'aria allo scarico si forma una significativa quantità di biossido di azoto per ossidazione del monossido. Negli ultimi anni le emissioni antropiche di ossidi di azoto sono aumentate enormemente, soprattutto a causa dell'aumento del traffico, che ha accresciuto i livelli di concentrazione nelle aree urbane.

Quando l'inquinamento è dovuto a un rilascio accidentale, la concentrazione dell'inquinante nell'aria cala rapidamente nel giro di 2-5 giorni: infatti, l'ossido di azoto è sempre rimosso per ossidazione. Nelle atmosfere inquinate in modo continuativo si assiste invece a un ciclo giornaliero di formazione d'inquinanti secondari: il monossido di azoto viene ossidato tramite reazioni fotochimiche (catalizzate dalla luce) a biossido di azoto; si forma così una miscela NO-NO<sub>2</sub>, che raggiunge il picco di concentrazione nelle zone e nelle ore di traffico più intenso. Attraverso una serie di altre reazioni catalizzate dalla luce solare si giunge alla formazione di ozono e di composti organici ossidanti (smog fotochimico), ma durante la notte queste sostanze decadono formando composti organici nitrati, perossidi e aerosol acidi. Una situazione del genere si verifica specialmente nelle città a elevato traffico e molto soleggiate.

La concentrazione di fondo del monossido di azoto in atmosfera varia da 0,2 a 10 µg/m<sup>3</sup>. Per il biossido di azoto, molto più pericoloso per la salute, l'OMS raccomanda 200 µg/m<sup>3</sup> come limite guida ora-

rio e  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  come limite per la media annuale. Gli effetti del biossido di azoto si manifestano generalmente parecchie ore dopo l'esposizione, così che spesso le persone non si rendono conto che il loro malessere è dovuto all'aria inquinata respirata.

L'inquinamento da biossido di azoto ha un impatto sulla vegetazione di minore entità rispetto al biossido di zolfo. In alcuni casi, brevi periodi di esposizione a basse concentrazioni possono incrementare i livelli di clorofilla; lunghi periodi causano invece la senescenza e la caduta delle foglie più giovani. Il meccanismo principale di aggressione comunque è costituito dall'acidificazione del suolo; gli inquinanti acidi causano un impoverimento del terreno per la perdita di ioni calcio, magnesio, sodio e potassio e conducono alla liberazione di ioni metallici tossici per le piante. Da notare che l'abbassamento del pH compromette anche molti processi microbici del terreno, fra cui l'azotofissazione. Gli ossidi di azoto e i loro derivati danneggiano anche edifici e monumenti, provocandone un invecchiamento accelerato, in molti casi irreversibile.

### 2.3 Ossidi di zolfo

Normalmente gli ossidi di zolfo presenti in atmosfera sono l'anidride solforosa ( $\text{SO}_2$ ) e l'anidride solforica ( $\text{SO}_3$ ). Questi composti sono anche indicati con il termine comune  $\text{SO}_x$ . L'anidride solforosa, o biossido di zolfo, è un gas incolore, irritante, non infiammabile, molto solubile in acqua e dall'odore pungente; dato che è più pesante dell'aria tende a stratificarsi nelle zone più basse. Rappresenta a livello globale l'inquinante atmosferico per eccellenza essendo il più diffuso, uno dei più aggressivi e pericolosi, emesso in maggior quantità dalle sorgenti antropogeniche e quindi di gran lunga il più studiato.

Le emissioni naturali di biossido di zolfo sono principalmente dovute all'attività vulcanica (circa 20 milioni t/anno). Le emissioni causate dall'attività dell'uomo rappresentano più di 150 milioni t/anno e sono dovute principalmente ai combustibili fossili solidi e liquidi (carbone, petrolio, gasolio) e derivano dall'ossidazione dello zolfo in essi contenuto come impurità. Oltre il 90% del biossido di zolfo è prodotto nell'emisfero Nord. L'emissione in Italia è dovuta per il 5% circa al riscaldamento domestico, per il 40% ai processi industriali e per il 50% alle centrali termoelettriche, perché i combustibili a basso tenore di zolfo non sono facilmente disponibili e i processi di desolforazione sono costosi.

La concentrazione di fondo è stata valutata attorno a 0,2-0,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mentre nelle aree urbane si possono raggiungere i 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; nelle grandi città industrializzate e in via di sviluppo sono spesso rilevati anche livelli di 300  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (dati dell'Organizzazione Mondiale della Sanità, 1998). Il biossido di zolfo permane in atmosfera per 1-4 giorni subendo reazioni di trasformazione, principalmente di ossidazione ad acido solforico che ricade in forma di nebbie o piogge acide. Gli ossidi di zolfo di notte sono anche assorbiti dalle goccioline di acqua presenti nell'aria dando origine a un aerosol che determina foschia mattutina.

L'alta reattività lo rende un composto estremamente irritante. Per l'elevata solubilità in acqua il biossido di zolfo è facilmente assorbito dalle mucose del naso e del tratto superiore dell'apparato respiratorio, così per fortuna solo quantità molto ridotte raggiungono gli alveoli polmonari, ma è stato notato un effetto sinergico con le polveri sospese per la capacità che queste hanno di veicolare gli inquinanti nelle zone più profonde dell'apparato respiratorio.

A basse concentrazioni gli effetti del biossido di zolfo sono principalmente legati a patologie dell'apparato respiratorio – bronchiti, asma e tracheiti – e a irritazioni della pelle, degli occhi e delle mucose. Analisi epidemiologiche hanno evidenziato un aumento dei ricoveri ospedalieri, specie di anziani e bambini, in presenza di concentrazioni superiori a 0,3  $\text{mg}/\text{m}^3$ . Il caratteristico odore pungente del biossido di zolfo è percepito dal naso alla concentrazione di 0,8-2,6  $\text{mg}/\text{m}^3$ . A questi livelli bisogna raggiungere una zona non contaminata, tenendo sul naso e sulla bocca un panno umido o, per esposizioni lunghe, utilizzare una maschera antigas. Brevi esposizioni a concentrazioni di 3  $\text{mg}/\text{m}^3$  provocano un aumento del ritmo respiratorio e del battito cardiaco; concentrazioni superiori provocano irritazioni agli occhi, al naso e alla gola, oltre all'aumento della frequenza cardiaca.

Gli effetti corrosivi dell'acido solforico si riscontrano anche sui materiali da costruzione, sui metalli e sulle vernici. L'acido solforico trasforma i carbonati insolubili dei monumenti e delle opere d'arte in solfati solubili che vengono dilavati dalla pioggia.

L'azione principale operata ai danni dell'ambiente da parte degli ossidi di zolfo consiste nell'acidificazione delle precipitazioni meteorologiche con la conseguente compromissione dell'equilibrio degli ecosistemi interessati. Il biossido di zolfo a basse concentrazioni provoca un rallentamento nella crescita delle piante, mentre ad alte con-

centrazioni ne altera la fisiologia in modo irreparabile e ne provoca la morte. Nelle foglie, il biossido di zolfo viene trasformato in acido solforoso e solfiti, dai quali per ossidazione si generano i solfati (la forma in cui lo zolfo viene metabolizzato nelle piante). Quando il livello di anidride solforosa nell'aria diviene insostenibile, nelle foglie si accumulano inutilizzati i solfiti, che ad alta concentrazione causano la distruzione della clorofilla, il collasso delle cellule e la necrosi dei tessuti. Le foglie presentano fra i margini e le nervature aree irregolari di necrosi di colore bianco, giallo o marrone; nelle conifere diviene marrone l'apice degli aghi. Questi effetti aumentano quando si è in presenza di un'umidità relativa elevata, alte temperature, intensa luminosità e anche nel caso in cui le piante siano vecchie. L'effetto dell'esposizione prolungata ad anidride solforosa è più difficile da rilevare: consiste in una serie di alterazioni fisiologiche fra le quali la riduzione della crescita e della riproduzione e la senescenza anticipata. L'effetto sulle piante è particolarmente accentuato quando all'anidride solforosa si accompagna la presenza di ozono.

#### 2.4 *Composti organici volatili*

I composti organici volatili (COV o VOC nella sigla inglese) includono gruppi diversi di sostanze con comportamenti fisici e chimici differenti: sia gli idrocarburi contenenti carbonio e idrogeno come unici elementi (alcheni e composti aromatici), sia i composti contenenti ossigeno, cloro o altri elementi tra cui il carbonio e l'idrogeno, come aldeidi, eteri, alcoli, esteri, clorofluorocarburi (CFC) e idroclorofluorocarburi (HCFC). Secondo la normativa (art. 268 del Decreto Legislativo 152/2006) sono definiti composti organici volatili, "tutti quei composti organici che abbiano a 293,15 K (20 °C) una pressione di vapore di 0,01 kPa o superiore". Oltre a essere pericolosi, i COV concorrono alla produzione dello smog fotochimico attraverso un complesso processo che coinvolge gli ossidi di azoto e porta alla formazione di perossidi organici molto aggressivi e di ozono.

I COV sono contenuti in prodotti e materiali molto comuni: possono liberarsi, per esempio, dai materiali di costruzione come schiume isolanti, pitture, moquette, linoleum, vernici, legni della carpenteria o dei pavimenti, per periodi che vanno da qualche mese a qualche anno. Anche le bombolette spray (insetticidi, cosmetici ecc.), le colle, i prodotti di pulizia (detergenti, decapanti, smacchiatori, diluenti, alcol da ardere, acquaragia ecc.) costituiscono delle fonti permanenti di emissione di COV.

Tutti i COV hanno la proprietà comune d'evaporare facilmente a temperatura ambiente e di diffondersi nell'aria sotto forma di gas. La concentrazione dei COV all'interno delle abitazioni è generalmente superiore a quella dell'ambiente esterno. In casa è possibile accorgersi subito di una forte presenza di COV grazie al loro forte odore, spesso anche pungente.

Il contatto con i COV avviene principalmente attraverso le vie respiratorie. Anche un contatto cutaneo con prodotti ricchi in COV o con biancheria e lenzuola contaminate può causare irritazioni alla pelle o reazioni allergiche. L'esposizione ai COV può provocare, secondo la durata e la concentrazione, effetti acuti (irritazioni agli occhi, al naso e alla gola, mal di testa, nausea, vertigini, asma) ed effetti cronici (danni ai reni, al fegato, al sistema nervoso centrale e, nel caso del benzene e della formaldeide, anche il cancro). Le persone più predisposte ad ammalarsi sono quelle con problemi respiratori, i bambini, gli anziani e i soggetti sensibili ai composti chimici.

### *2.5 Monossido di carbonio*

Il monossido di carbonio (CO), o ossido di carbonio o ossido carbonico, è un gas inodore, incolore, insapore e velenoso. Si miscela bene con l'aria, con cui forma facilmente miscele esplosive, e con polveri metalliche producendo metallo-carbonili tossici e infiammabili. Può reagire con molte altre sostanze e, per le sue caratteristiche, rappresenta un inquinante molto insidioso, soprattutto nei luoghi chiusi dove può accumularsi in concentrazioni letali. Purtroppo sono frequenti i casi di avvelenamento e gli incidenti anche mortali imputabili alle stufe o agli scaldabagni difettosi o non controllati.

Il monossido di carbonio è tossico perché si lega saldamente agli atomi di ferro nell'emoglobina del sangue e forma un complesso molto più stabile di quello formato dall'ossigeno, la carbossiemoglobina, che ostacola il rilascio di ossigeno ai tessuti e determina un'insufficiente ossigenazione del cervello e quindi uno stato di incoscienza; in casi gravi (concentrazioni di 2000-4000 ppm pari allo 0,2%-0,4%) può portare alla morte. I primi sintomi dell'avvelenamento sono l'emicrania e un senso di vertigine; purtroppo il gas provoca anche sonnolenza e questo impedisce spesso alle vittime di avvertire il pericolo e di cercare aria meno tossica.

La popolazione urbana, spesso soggetta a lunghe esposizioni a concentrazioni decisamente più basse, è a rischio di una lenta intossica-



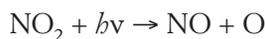
zione che prende il nome di “ossicarbonismo” e si manifesta con sintomi nervosi e respiratori. L'esposizione a monossido di carbonio comporta inoltre l'aggravamento delle malattie cardiovascolari e un aggravamento delle condizioni circolatorie in generale. Il Decreto Ministeriale n. 60 del 2002, emanato per ottemperare alle direttive europee, pone come limite della media massima giornaliera 10 mg/m<sup>3</sup>.

## 2.6 Ozono

L'ozono (O<sub>3</sub>) è un inquinante secondario derivato dall'ossidazione di altre sostanze. I principali inquinanti primari che concorrono alla sua formazione sono gli ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>), i composti organici volatili (COV), il monossido di carbonio (CO) e il metano (CH<sub>4</sub>).

Per comprendere meglio la formazione dell'ozono nella parte più bassa dell'atmosfera (ozono troposferico) sarebbe necessario analizzare in dettaglio il ciclo degli ossidi di azoto, in particolare del biossido di azoto (NO<sub>2</sub>). Qui ci limitiamo ad alcuni concetti di base, anche perché le reazioni che partecipano alla formazione dell'ozono troposferico sono numerose e non tutte perfettamente note.

L'NO<sub>2</sub> assorbe la radiazione ultravioletta che penetra l'atmosfera e, a una lunghezza d'onda tra 295 e 430 nm, dissocia il biossido di azoto (fotodissociazione), liberando un atomo di ossigeno:



dove  $h\nu$  rappresenta la radiazione solare. A sua volta l'ossigeno monoatomico reagisce con l'ossigeno molecolare per produrre ozono:



dove M rappresenta un generico catalizzatore della reazione. Il ciclo si chiude con l'ossidazione del monossido di azoto in biossido di azoto:



Poiché quest'ultima reazione è veloce, la concentrazione di ozono nell'atmosfera urbana non può aumentare fino a che gran parte del monossido di azoto non è convertito in biossido di azoto. Ciò spie-



ga in parte il fatto che le concentrazioni di ozono nelle aree urbane, dove avvengono notevoli emissioni di monossido di azoto, siano inferiori rispetto alle aree suburbane sottovento, dove il biossido di azoto è trasportato e quindi dissociato con conseguente formazione di ozono.

Ancor più che per il particolato, la formazione dell'ozono risulta non lineare rispetto ai suoi precursori, infatti:

- raramente uguali variazioni di  $\text{NO}_x$  e COV producono medesime variazioni delle concentrazioni di  $\text{O}_3$ ;
- le variazioni spaziali tendono a essere molto più gradualità di quelle degli inquinanti primari.

La concentrazione di ozono troposferico varia anche molto a seconda della zona geografica, dell'ora del giorno, del periodo dell'anno, delle condizioni meteorologiche e dell'altitudine. Alle nostre latitudini si stima una concentrazione di fondo compresa tra 0,03 e 0,07 parti per milione (ppm). Nell'ultimo secolo si è notata una tendenza alla crescita, che in corrispondenza delle aree urbane e industriali può essere anche al ritmo dell'1-2% all'anno.

L'ozono, incolore ma con odore pungente, induce una serie di effetti piuttosto ampia in dipendenza dalla concentrazione. Come per il particolato, gli effetti dell'ozono sull'uomo sono principalmente a carico dell'apparato respiratorio, ma si osserva anche irritazione agli occhi. Le soglie critiche sono all'incirca le seguenti: sotto 0,02-0,05 ppm non si rilevano effetti; oltre 0,05 ppm si verificano irritazioni al naso e alla gola; tra 1 e 3 ppm, estremo affaticamento e mancanza di coordinazione e, per concentrazioni ancora superiori, può insorgere un edema polmonare.

Le caratteristiche di potente ossidante dell'ozono si ripercuotono pesantemente anche sull'ambiente, soprattutto ai danni della vegetazione, comprese le coltivazioni: accanto alle sostanze responsabili delle piogge acide, l'ozono è una delle principali cause del declino delle foreste, riducendo la crescita delle piante e provocandone l'invecchiamento precoce. L'ozono intacca infatti l'apparato fogliare: i cloroplasti diventano più fragili e si rompono facilmente, facendo diminuire sensibilmente la capacità di svolgere la fotosintesi, inoltre altera il bilancio ionico, con conseguenze sul metabolismo proteico e sui livelli di ATP, il composto ad alta energia richiesto da molte importanti reazioni metaboliche. L'invecchiamento precoce della pianta è causato da un fenomeno di clorosi: l'esposizione all'ozono pro-

voca fra le nervature lesioni di colore marrone che allargandosi possono ricoprire tutta la foglia e farla cadere; le piante più vecchie sono quelle colpite prima. Molti studi hanno dimostrato che l'esposizione a elevate concentrazioni per breve tempo provoca i danni maggiori; le esposizioni a livelli più bassi e costanti, invece, sono meno dannose.

### 3. Gli effetti delle deposizioni acide

L'inquinamento atmosferico, oltre che sulla salute umana, ha impatti notevoli sul funzionamento degli ecosistemi e sulla conservazione dei manufatti. In Europa più dell'80% delle foreste di conifere e circa il 40% delle foreste decidue sono soggette a un carico inquinante eccessivo. Segni di declino sono stati riconosciuti nelle foreste di Francia, Germania, Austria, Svizzera e Italia settentrionale. Questo declino è stato almeno in parte ricondotto all'azione di  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_3$ , oltre che alle deposizioni acide, che derivano comunque dalle emissioni di ammoniaca e di ossidi di zolfo e di azoto attraverso una serie di reazioni chimiche in atmosfera.

Le deposizioni acide si verificano in tre forme: deposizione umida (pioggia, neve o grandine), deposizione secca (particolato, gas o vapore), deposizione per mezzo di nubi o nebbia (specialmente a quote elevate o in zone costiere). Le deposizioni acide influenzano la qualità delle acque superficiali e dei suoli. L'acidificazione delle acque interne ha effetti notevoli sulla vita di diversi organismi oltre che sulla qualità delle acque, producendo anche notevoli danni economici. Le piogge acide provocano l'abbassamento del pH e l'aumento delle concentrazioni di alluminio, con notevoli impatti sulle specie acquatiche. Con pH inferiori a 5 la gran parte delle uova dei pesci non si schiude e pH inferiori sono letali per i pesci stessi. In genere, all'aumentare dell'acidità di laghi e fiumi, la biodiversità si riduce. Gli effetti sugli ecosistemi d'acqua dolce sono stati particolarmente evidenti in Scandinavia e in Scozia, ricche di laghi e fiumi.

Per quanto riguarda le foreste, gli effetti indiretti tramite l'acidificazione del suolo sono probabilmente più importanti, anche se i danni possono essere causati anche direttamente dall'esposizione agli inquinanti. Uno studio retrospettivo dei dati pubblicati dal 1931 nella parte occidentale degli Stati Uniti ha messo in evidenza che le località più sensibili sono state danneggiate dalle precipitazioni acide 20 o 40 anni fa. La lisciviazione di nutrienti essenziali quali calcio e ma-

gneseo a causa dell'acidificazione dei suoli provoca una profonda alterazione dei cicli dei nutrienti della foresta, inoltre in suoli con scarse capacità di tamponamento dell'acidità si può verificare la mobilitazione dell'alluminio e alte concentrazioni di alluminio nel suolo danneggiano le radici e l'attività della flora microbica.

Gli effetti delle piogge acide sugli edifici forniscono uno dei più chiari esempi di danno legato all'utilizzo dei combustibili fossili. Si possono infatti verificare la scoloritura, il deterioramento dei rivestimenti, la perdita di dettaglio delle sculture e degli ornamenti esterni e, a volte, anche cedimenti strutturali. La pioggia acida attacca le più svariate strutture edili, dai ponti in acciaio ai monumenti antichi migliaia di anni, con gravi danni al patrimonio culturale. L'azione corrosiva si esercita su molti materiali e i suoi effetti si possono facilmente individuare con il passare degli anni. Pietre calcaree e marmo sono particolarmente sensibili alla loro azione. Un caso famoso è quello della cattedrale di Colonia, le cui strutture interne sono in eccellenti condizioni, mentre quelle esterne hanno subito seri danneggiamenti a causa dell'inquinamento atmosferico degli ultimi 100 anni.

#### **4. Come valutare gli effetti delle emissioni dai camini di una centrale**

Per valutare gli effetti dell'emissione di un determinato inquinante dal camino di una centrale, e quindi calcolare la concentrazione nell'ambiente a partire dalla concentrazione in uscita, nella stragrande maggioranza dei casi non è possibile usare una procedura sperimentale. Salvo, infatti, le rarissime circostanze in cui è possibile rilasciare un tracciante inerte e osservare successivamente quale sia la sua concentrazione in un intorno di qualche chilometro dal camino, bisogna ricorrere a modelli matematici su computer che ricostruiscano i principali fenomeni che hanno luogo nell'ambiente e che possono essere sintetizzati in:

- innalzamento del pennacchio in base alla velocità e alla temperatura di uscita del fumo;
- trasporto da parte del vento, dispersione causata dalla turbolenza dell'aria e diffusione dell'inquinante nell'atmosfera in base al gradiente di concentrazione;
- eventuali trasformazioni fisiche (per esempio, deposizione) o chimiche, come quelle che abbiamo visto per il particolato e l'ozono.

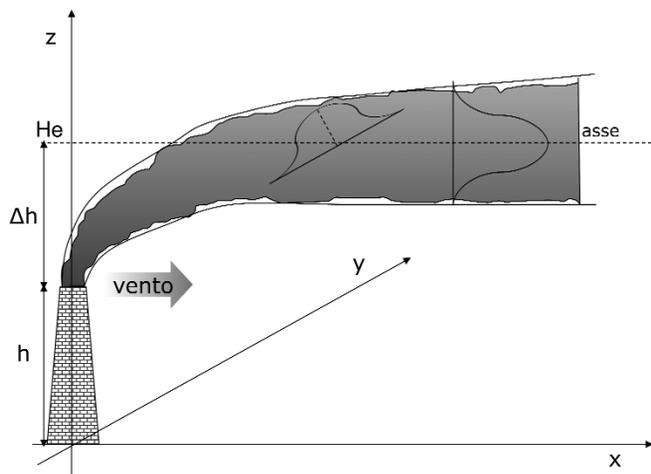


Figura 4. Schema delle concentrazioni del pennacchio “gaussiano.”

Si capisce facilmente come l’elaborazione del modello matematico richieda un enorme numero d’informazioni: per esempio, le condizioni meteorologiche e le eventuali altre emissioni in tutti i punti dell’area di studio. Modelli di questo tipo esistono, come quelli messi a punto dall’Environmental Protection Agency (EPA, [www.epa.gov](http://www.epa.gov)) degli Stati Uniti o dal Air Resources Board della California ([www.arb.ca.gov](http://www.arb.ca.gov)), ma sono troppo complicati per essere descritti in questa sede. Tuttavia, per cercare di comprenderne le caratteristiche e le limitazioni, illustreremo qui un caso semplice e forse anche per questo molto utilizzato: quello dei cosiddetti “modelli gaussiani”. Questo modello del pennacchio di inquinante si ricava analiticamente risolvendo l’equazione di trasporto e diffusione in condizioni meteorologiche e di emissione stazionarie, quando cioè non ci sono variazioni significative per qualche ora. Più queste variazioni sono importanti, minore è l’affidabilità del modello e meglio sarebbe utilizzare modelli che tengano conto dell’evoluzione nel tempo, specialmente delle condizioni meteorologiche.

Immaginando nell’intorno del camino un sistema di riferimento in cui l’asse  $x$  sia posto nella direzione del vento e  $z$  rappresenti la quota (Figura 4), e supponendo che il fenomeno più rilevante sia il trasporto dovuto al vento e che il suolo rifletta perfettamente l’inqui-

nante, la concentrazione  $c(x, y, z)$  di un inquinante non reattivo in un punto  $(x, y, z)$  del dominio, supposto piano, è data dalla formula:

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi V\sigma_y(x)\sigma_z(x)} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y(x)}\right)^2\right) \left[ \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z-He}{\sigma_z(x)}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{z+He}{\sigma_z(x)}\right)^2\right) \right]$$

In questa equazione,  $Q$  è il flusso di inquinante emesso (per esempio, in grammi al secondo),  $V$  rappresenta la velocità del vento,  $He$  l'altezza efficace del pennacchio (cioè l'altezza alla quale l'asse del pennacchio, esaurita la spinta d'innalzamento, diviene parallelo al suolo) e  $\sigma_y(x)$  e  $\sigma_z(x)$  sono le funzioni di dispersione (in pratica, le deviazioni standard di due gaussiane) che dipendono dalla distanza  $x$  dal punto di emissione.

L'equazione può apparire complicata, ma possiamo immediatamente vedere che:

- *La concentrazione risulta proporzionale all'emissione.* Ciò deriva dall'ipotesi che l'inquinante non sia reattivo e quindi la sua concentrazione non vari a causa delle reazioni chimiche in atmosfera. In questo caso l'effetto di più emissioni può essere calcolato come la somma degli effetti calcolati separatamente per ciascuna sorgente. Come ulteriore conseguenza, i calcoli possono essere fatti per un'emissione qualsiasi e poi si può applicare una semplice proporzionalità per ottenere le concentrazioni dovute a qualunque altro valore di emissione.
- *La concentrazione è inversamente proporzionale alla velocità del vento.* Ciò porta a due conseguenze: il modello non può essere utilizzato in condizioni di calma di vento, condizione che si verifica facilmente, per esempio, nella Pianura Padana. All'aumentare della velocità del vento la concentrazione diminuisce in ogni punto, ma la forma del pennacchio non cambia e quindi il massimo della concentrazione al suolo continua a essere alla stessa distanza dalla sorgente, pur se con concentrazione ridotta.
- *La forma del pennacchio è determinata sostanzialmente dalle funzioni di dispersione,* le quali sono, a loro volta, definite in base alle condizioni di stabilità dell'atmosfera e quindi sono delle funzioni note della distanza  $x$  dalla sorgente. La stabilità atmosferica è definita in base alle condizioni di temperatura e, di solito, suddivisa in 6 classi denominate da A a G, dalla più instabile (elevata dispersione, pennacchio molto ampio), alla più stabile (bassa dispersione, pennacchio ristretto).



Gli effetti ambientali della produzione di energia: inquinamento locale

153

Fissate quindi le condizioni meteorologiche, tutto il termine di destra non è altro che il prodotto dell'emissione  $Q$  per una funzione, nota, di  $x$ .

In generale, quando l'atmosfera è più stabile, il massimo delle concentrazioni si verifica a distanze maggiori, mentre nel caso di maggiore instabilità e quindi di maggior rimescolamento dell'aria, le maggiori ricadute sono più vicine al punto di emissione. Il modello è giudicato normalmente attendibile per valutare gli impatti sulla popolazione e sull'ambiente nel raggio di alcuni chilometri. Esamineremo più in dettaglio alcuni risultati di questo modello nella sezione "Facciamo i conti".

In situazioni geografiche diverse dal terreno pianeggiante, sulla riva del mare o ancora nelle valli, dove la meteorologia ha caratteristiche peculiari, occorre correggere la formula precedente. Sono comunque stati realizzati programmi di calcolo che tengono conto di queste situazioni specifiche.

Un caso particolarmente comune in molte parti d'Italia e che si può risolvere molto facilmente è quello della cosiddetta "inversione termica", per cui in determinate condizioni la temperatura dell'aria, invece di diminuire con la quota, può riprendere ad aumentare per brevi tratti. L'inversione termica impedisce al pennacchio di innalzarsi ulteriormente e causa la situazione di "fumigazione", che può aumentare notevolmente la concentrazione al suolo. Per replicare questa situazione, non si fa altro che immaginare che alla quota di inversione il pennacchio venga riflesso completamente verso il basso; tutta l'emissione rimane quindi intrappolata tra il suolo e lo strato di inversione, che può essere a qualche centinaio di metri di quota, e le concentrazioni che si verificano al suolo sono molto più elevate.

## 5. L'inquinamento da idrocarburi

Per quanto le emissioni in atmosfera dei processi di combustione costituiscano un problema d'impatto ambientale molto sentito per gli effetti diretti che possono avere sulla salute dell'uomo e sugli ecosistemi, c'è tutta una serie di altri impatti che non va assolutamente trascurata. In tutta la filiera per l'approvvigionamento dei combustibili fossili si svolgono attività (processi estrattivi, trasporto e stoccaggio di petrolio e carbone) che possono produrre danni all'ambiente.



### 5.1 I pericoli del trasporto via mare

La maggior parte del petrolio, per esempio, è trasportata su petroliere, una parte delle quali sono ancora a singolo scafo (saranno bandite entro la fine del 2010 dai traffici commerciali), vecchie e piuttosto malridotte, battenti bandiere di Paesi nei quali normative e controlli di sicurezza sono meno stringenti. Quando si verificano naufragi o incidenti, spesso per imperizia o errori dell'equipaggio, qualche volta per pura fatalità, la fuoriuscita di parte o di tutto il carico può avere effetti devastanti.

Liberato nell'ambiente marino, il greggio si allarga rapidamente a macchia d'olio spinto dai venti e dalle correnti, stratificandosi in base alla densità. Le frazioni più volatili evaporano in pochi giorni perdendo rapidamente di massa; le frazioni intermedie rimangono nelle acque superficiali e vengono disperse dal moto ondoso e degradate lentamente attraverso processi fisici, chimici e biologici naturali a opera di funghi, batteri e alghe. Le frazioni più pesanti formano grumi catramosi più difficili da degradare biologicamente che poi affondano lentamente. Il petrolio catturato nei sedimenti dei fondali marini può rimanere in uno stato "dormiente" per lunghissimo tempo e poi tornare in circolazione anche anni dopo (per esempio, a causa di mareggiate) ed esprimere ancora la sua tossicità.

Ricoprendo il piumaggio degli uccelli, il petrolio ne impedisce il volo e il nuoto e riduce la capacità isolante rendendoli più vulnerabili alle escursioni termiche ambientali. Lo stesso avviene quando imbratta la pelliccia di mammiferi marini come foche e lontre. Quando gli animali lo ingeriscono nel tentativo di pulire piume o pelliccia, il petrolio risulta tossico e può danneggiare reni, fegato e apparato digerente, inoltre può impedire l'alimentazione. Il petrolio penetra nei pesci attraverso le branchie e può essere assorbito attraverso la pelle da rettili marini come le tartarughe. L'esposizione agli idrocarburi policiclici aromatici del greggio può interferire con i cicli riproduttivi per anni, generare problemi nello sviluppo embrionale e nella fase di accrescimento e aumentare la suscettibilità agli agenti infettivi e parassitari.

Oltre agli aspetti ecologici, notevoli possono essere anche i danni causati direttamente all'industria turistica e a quella della pesca che rischiano di vedere compromessa la propria attività anche per anni dopo la fuoriuscita di petrolio.

L'incidente più noto è probabilmente quello della *Exxon Valdez*, superpetroliera di 200.000 t di stazza, che il 24 marzo 1989, per un mi-



sto di negligenza dell'equipaggio e d'incomprensioni con la guardia costiera, s'incagliò in una scogliera dello stretto di Prince William nel golfo dell'Alaska e disperse in mare oltre 38 milioni litri di petrolio (circa 250.000 barili), inquinando 1900 km di coste di un'area pressoché incontaminata. Devastanti furono gli effetti immediati dell'incidente: morirono 25.000 uccelli marini, 2800 lontre, 300 foche, 250 aquile di mare, circa 22 orche. Importanti anche gli effetti di medio e lungo periodo: la pesca di aringhe e salmoni, per esempio, fu compromessa per diversi anni. Nel 1991 la Exxon Mobil, proprietaria della nave, fu condannata in sede civile e penale per oltre 1 miliardo di dollari, il maggior risarcimento mai registrato per un disastro industriale. Le operazioni di ripulitura delle coste costarono alla Exxon circa 2 miliardi di dollari, coperti in gran parte delle assicurazioni.

Altri incidenti tristemente famosi sono quello della *Erika* nel 1999 con 20.000 t disperse nel golfo di Biscaglia, quello della *Jessica* nel 2002 con 600.000 litri riversati sulle coste delle isole Galapagos, quello della *Prestige* con 77.000 t rovesciate in mare nel 2002 nei pressi delle coste francesi. Sulle coste italiane si ricorda l'incidente della *Haven* nel 1991 che riversò 50.000 t di greggio nel golfo di Genova. Almeno una cinquantina di altri incidenti di rilevanti proporzioni sono stati registrati negli ultimi 30 anni e, nonostante l'adozione di misure di sicurezza sempre più stringenti, il settore del trasporto navale di greggio rimane fortemente a rischio sia per l'enorme quantità di petrolio movimentato su petroliere (qualcosa come 2 milioni di barili al giorno), sia per la presenza di tante "carrette del mare" di dubbio proprietà, in cattivo stato e qualche volta, come nel caso della *Jessica*, persino prive di assicurazione.

Questo problema è particolarmente sentito nel Mediterraneo, che attraverso il canale di Suez costituisce la rotta favorita per le petroliere cariche di greggio e petrolio raffinato. Il traffico petrolifero nel Mediterraneo, il più consistente tra tutto il trasporto marittimo di merci, rappresenta infatti circa il 20% del traffico mondiale e ammonta a circa 42 milioni t/anno (nel 2006) con una movimentazione di oltre 800 mila barili/giorno (quasi 100 mila t/giorno), che richiedono oltre 4000 viaggi navali e altrettanti viaggi di ritorno con cisterne scariche.

Con 17 raffinerie, 14 porti petroliferi e oltre 2.300.000 barili lavorati ogni giorno (un quarto del totale del Mediterraneo), l'Italia è il Paese più esposto al rischio incidenti, seguito da Francia e Spagna.



Tra i quattro maggiori porti petroliferi europei che si affacciano sul Mediterraneo ben tre si trovano in Italia, con una quantità complessiva di greggio importato di 94 milioni t/anno.

È da notare che, per quanto rilevanti, le fuoriuscite accidentali di idrocarburi rappresentano solo una piccola quota del totale degli scarichi dovuti al traffico marittimo. Oltre l'80%, infatti, è determinata da operazioni di routine, in particolare dal lavaggio delle cisterne delle acque di zavorramento (utilizzate per stabilizzare le petroliere fra un carico di greggio e l'altro) o da attività illegali e comportamenti criminosi, soprattutto nei pressi degli impianti di raffinazione. Le cisterne, infatti, dovrebbero essere lavate in porti attrezzati con sistemi di recupero e trattamento delle acque di scolo, ma spesso questo non viene fatto a causa del costo elevato dell'operazione e quindi, in assenza di controlli da parte delle capitanerie di porto, le cisterne finiscono per essere sistematicamente lavate in mare.

Negli anni '80 questa dispersione d'idrocarburi in mare era stimata in circa lo 0,2% del carico trasportato: in media a livello mondiale 8-20 milioni di barili, di cui un milione di barili nel solo Mediterraneo. Questa quota si è probabilmente ridotta a causa di normative sempre più stringenti, ma secondo i dati forniti da UNEP/MAP si ritiene possibile che ancora circa 100.000 t di greggio siano disperse nel mare Mediterraneo per attività illegali e operazioni di lavaggio. Quantità impressionanti che sono purtroppo confermate dalla densità di catrame pelagico ai livelli più alti del mondo.

### *5.2 L'inquinamento causato da oleodotti, pozzi, depositi e raffinerie*

Il trasporto tramite oleodotto è molto più caro del trasporto via nave a causa degli elevati costi di realizzazione dell'opera, tuttavia risulta non meno problematico a causa della difficoltà di assicurare la manutenzione e la sicurezza di un'infrastruttura che può svilupparsi per centinaia o migliaia di chilometri. Per esempio, gli oleodotti che attraversano il delta del Niger, in Nigeria, sono strutture a tratti fatiscenti in cui si producono continuamente perdite nell'ambiente causate da crepe. Fra gli incidenti rilevanti si ricorda quello che nell'ottobre del 1994 ha interessato l'oleodotto di Usinsk, presso il Circolo Polare Artico, quando fuoriuscirono 60-80.000 t di greggio che devastarono i delicati ecosistemi della tundra e della taiga siberiana. La falla creatasi nell'oleodotto Francia-Germania nell'agosto 2009 ha provocato una perdita di 4000 m<sup>3</sup> di petrolio su 2



ettari della riserva naturale di Coussouls de Crau, in Provenza, una zona ad alta protezione di grande valore ecologico.

Servitù di accesso, opere accessorie, aree di stoccaggio, mancato smantellamento e recupero a fine vita hanno indotto fenomeni accentuati di contaminazione ed elevati livelli di degrado della qualità ambientale presso i pozzi di estrazione del greggio, soprattutto quando i giacimenti sono situati in aree remote di Paesi in via di sviluppo privi di una normativa di tutela ambientale e di efficaci sistemi di monitoraggio e controllo. La contaminazione di suoli e falde è un rischio spesso presente anche in corrispondenza degli impianti di deposito e raffinazione di idrocarburi. In questi casi, la fuoriuscita di petrolio è in genere dovuta a cattiva progettazione, gestione e manutenzione degli impianti di trivellazione, estrazione e trattamento (come quelli per la separazione del petrolio dall'acqua) e dalla dispersione criminale nell'ambiente di residui e sottoprodotti meno pregiati.

## 6. Altri impatti e strumenti per la valutazione

Naturalmente gli impatti ambientali non si fermano alla sola contaminazione da idrocarburi. Anche le attività minerarie estrattive di carbone e uranio possono risultare problematiche, soprattutto se condotte senza l'adesione fedele a codici etici riguardanti sia gli aspetti ambientali in senso stretto, sia gli aspetti sociali, in particolare la sicurezza e il rispetto dei diritti dei lavoratori e delle comunità locali.

Lo scavo di miniere superficiali o sotterranee di carbone implica sempre un livello più o meno spinto di alterazione o distruzione dell'ambiente naturale, l'accumulo di rifiuti di lavorazione, residui, scarti, la formazione di polveri, l'inquinamento delle acque superficiali e di falda causato dal drenaggio acido o dalle concentrazioni piuttosto elevate di acido solforico in alcuni tipi di carbone. Emissioni di polveri acide possono verificarsi anche durante le fasi di trasporto e di stoccaggio. Per quanto riguarda le emissioni in atmosfera nei processi di combustione del carbone, oltre ai "normali" inquinanti trattati nella prima parte di questo capitolo, il carbone contiene anche tracce di metalli, come alluminio, ferro, mercurio e perfino di elementi radioattivi che possono concentrarsi sia nei fumi, sia nelle ceneri e nei residui di combustione che devono quindi essere adeguatamente monitorati e trattati.



Neppure l'idroelettrico è esente da impatti, soprattutto nel caso della realizzazione di bacini artificiali di grandi dimensioni. Nei Paesi in via di sviluppo la storia dell'idroelettrico è tristemente costellata dalla continua denuncia di soprusi, intimidazioni, violenze. Fra il 1980 e il 1982 in Guatemala furono massacrati quasi 400 indigeni maya achì che si opponevano alla costruzione della diga di Chixoy. Anche la realizzazione della diga delle Tre Gole in Cina ha suscitato preoccupazioni per gli impatti sul microclima e la biodiversità locale e ha costretto oltre un milione di abitanti ad abbandonare le proprie terre. Anni prima la diga di Assuan in Egitto è stata duramente contestata per aver inondato 650.000 ettari di territorio con aree di grandissimo interesse archeologico.

Anche la realizzazione d'impianti di taglia più piccola non è comunque esente da problemi, soprattutto legati alla necessità di assicurare, come abbiamo visto nel capitolo precedente, una portata minima vitale dei corsi d'acqua interessati dalle opere idrauliche, in accordo con la direttiva quadro sulle acque (2000/60/EC) dell'Unione Europea.

Fotovoltaico ed eolico presentano un rilevante impatto paesaggistico mentre gli effetti sull'avifauna dei parchi eolici sono stati ridimensionati, anche se si ritiene ragionevole evitare di costruire parchi eolici proprio sulle rotte dei migratori soprattutto quando queste sono conosciute e documentate con buona precisione.

Oltre agli impatti ambientali macroscopici specifici di particolari tipologie di fonti energetiche, esistono naturalmente una serie di altri effetti prodotti genericamente dalle attività di realizzazione degli impianti: per esempio, la preparazione del sito, la cantierizzazione, la realizzazione di servitù, la messa in opera, la gestione degli impianti, l'accumulo e il trattamento dei rifiuti e delle acque di scolo, lo smantellamento a fine vita ecc. Alcuni di questi impatti sono presenti per tutta la durata dell'opera, altri solo o principalmente nella fase di costruzione, ma non per questo sono meno importanti, in quanto possono comunque generare effetti duraturi se non permanenti e irreversibili.

### *6.1 La valutazione e la gestione degli impatti ambientali*

L'approccio di "analisi del ciclo di vita" (LCA, dall'inglese *Life Cycle Assessment*) è utilizzato per la valutazione delle prestazioni ambientali e dei ritorni energetici e dei costi, lungo tutta la filiera di produzione dell'energia, dalle prime fasi esplorative ed estrattive



fino allo smantellamento degli impianti e alla valutazione degli effetti ambientali della produzione durante la loro vita utile.

In materia di interventi obbligatori, in Europa esiste da anni una legislazione piuttosto articolata riguardante la valutazione di impatto ambientale (VIA) delle opere in progetto; la valutazione ambientale strategica (VAS) su area vasta, non della singola opera ma di un insieme di interventi sul territorio; l'IPPC (dall'inglese, *Integrated Prevention and Pollution Control*) che, a differenza della VIA, si applica anche a impianti esistenti; la Direttiva Europea Seveso per gli impianti industriali a rischio d'incidente rilevante connessi a determinate sostanze pericolose.

Per quanto riguarda gli strumenti ad adesione volontaria, vanno citate le diffuse norme internazionali della famiglia ISO14000 dell'International Standard Organization per la gestione della qualità ambientale e il regolamento europeo "*Eco-management and Audit Scheme*" (EMAS), più rigoroso e stringente delle norme ISO14001. La gestione degli aspetti ambientali delle attività produttive è naturalmente molto importante, in quanto anche il migliore impianto può avere malfunzionamenti se non correttamente mantenuto. Del resto, siccome non si può mai eliminare completamente il rischio d'incidenti, è opportuno che esistano procedure per organizzare prontamente operazioni di emergenza quando si verifica un problema.

Tutti questi strumenti – assieme a una serie ulteriore di norme settoriali specifiche, come quelle per la sicurezza degli impianti nucleari o le norme internazionali per la sicurezza della navigazione – hanno come fine la protezione dell'ambiente, il controllo del rischio d'incidenti o d'inquinamento cronico, la riduzione della produzione di rifiuti ed emissioni e del consumo di risorse naturali, l'aumento dell'efficienza dei processi di produzione evitando gli sprechi e favorendo il recupero.

Non ultimo in ordine di importanza è l'obiettivo di molte di queste norme di assicurare il più possibile la comunicazione degli aspetti ambientali significativi, garantire un dialogo aperto con tutti gli interessati, porre le condizioni per un'ampia partecipazione del pubblico e favorire la trasparenza dei processi decisionali.

Nelle decisioni su dove collocare un impianto si riscontrano spesso problemi di scala diversa, come l'esigenza di garantire la produzione di energia a livello nazionale e quella di tutelare la salute e il benessere delle popolazioni locali. È quindi fondamentale che queste de-



cisioni siano prese con la massima consapevolezza non solo dei benefici industriali diretti di un certo impianto, ma anche dei possibili costi ambientali, sociali ed economici di breve e lungo periodo, sostenuti da tutti gli interessati su scala locale come su scala regionale, nazionale e internazionale, confrontandosi anche con l'alternativa di non realizzarlo, di realizzarlo in altro luogo oppure con fonti o tecnologie differenti.

## DIAMOCI DA FARE

### **Dal caminetto alle caldaie a pellet**

Camini e stufe per il riscaldamento domestico alimentati a legna sono una tradizione molto antica in diverse regioni italiane, oltre che il sistema di riscaldamento più diffuso nei Paesi in via di sviluppo. La loro presenza è entrata a far parte anche della letteratura: Ippolito Nievo (*Confessioni d'un italiano*, 1858) ricordava, per esempio, che "la cucina di Fratta e il suo focolare sono i monumenti più solenni che abbiano mai gravato la superficie della terra". Anche la pubblicità, quando vuole suggerire un'idea di serenità e calore, utilizza l'immagine della legna che arde nel camino. Si tratta però di un'immagine che non ha alcuna base tecnica, dato che sia dal punto di vista energetico, sia da quello ambientale questi metodi di riscaldamento non hanno caratteristiche molto positive.

Le prestazioni di un sistema di riscaldamento vanno ovviamente valutate in base alla richiesta di calore per la volumetria che deve essere servita e dipendono dal numero di ore di funzionamento, dalla zona climatica e dalla destinazione d'uso dell'edificio. Per una valutazione di massima si può ipotizzare un fabbisogno energetico specifico annuo di 30-50 kWh/m<sup>3</sup>, con una potenza da installare tra i 15 e i 25 W/m<sup>3</sup> (queste valutazioni saranno approfondite nel capitolo "Risparmio energetico, usi finali e trasporti"). Un'altra caratteristica importante di qualsiasi sistema di riscaldamento è l'ampia variabilità del carico termico, che dipende dalle condizioni climatiche e anche dal comportamento dell'utente. Un sistema di riscaldamento deve quindi essere scelto anche tenendo conto della flessibilità di funzionamento rispetto alla potenza nominale. Per migliorare appunto la flessibilità, una caldaia a biomasse può essere affiancata da una caldaia di tipo convenzionale a gasolio o a metano, da una seconda caldaia a biomasse oppure da un serbatoio di accumulo del calore.

I moderni sistemi di riscaldamento utilizzano biomasse ligno-cellulosiche pretrattate come i pellet (cilindretti di segatura compressa piuttosto omogenee e standardizzate), e il cippato (piccole scaglie di legno, dalle caratteristiche molto variabili a seconda della provenienza). Il principale vantaggio di questi combustibili rispetto alla tradizionale legna in ciocchi è che permettono di alimentare le caldaie in modo automatico, mediante un serbatoio per lo stoccaggio del combustibile. I pellet (grazie alla maggiore omogeneità e compattazione) hanno una densità energetica maggiore rispetto al cippato e, di conseguenza, richiedono un volume di accumulo di dimensioni inferiori.



Di seguito descriveremo brevemente i più diffusi sistemi di riscaldamento a legna dal punto di vista delle loro prestazioni e li confronteremo con le alternative più moderne, basandoci sui risultati di uno studio recente, il progetto Kyoto Lombardia (2004-2007), coordinato dalla Fondazione Lombardia per l'Ambiente ([www.flanet.org](http://www.flanet.org)).

### **Caminetti**

Il caminetto tradizionale, a focolare aperto, fornisce calore principalmente per irraggiamento. Il focolare è sormontato da una cappa, dalla presa d'aria e da un semplice sistema di regolazione del tiraggio. L'aria calda sviluppata a seguito della combustione, più leggera dell'aria circostante, provoca un moto ascendente dei fumi, che sono convogliati allo sbocco del camino. La grande dispersione di energia che avviene in questo modo fa sì che il rendimento di questi caminetti sia inferiore al 20%. Ciò significa che, per fornire una certa energia termica, il camino brucia una quantità notevole di combustibile producendo di conseguenza emissioni elevate. Questi problemi possono essere in parte ridotti con un caminetto ventilato, che riscalda l'aria anche attraverso uno scambiatore di calore; questo tipo di caminetto può essere a circolazione naturale o forzata, nel caso in cui sia installato un ventilatore.

Esistono anche caminetti da incasso, a focolare chiuso, rivestiti internamente di piastre di ghisa o di materiale ceramico refrattario, chiusi da uno sportello in vetro ceramico. Possono essere inseriti all'interno di camini esistenti e permettono un aumento del rendimento, che può arrivare fino al 70%. L'aria si scalda entrando in contatto con le piastre in ghisa e viene inviata alle stanze mediante ventilatori e apposite canalizzazioni.

Il camino può anche riscaldare l'acqua di un circuito, per esempio, a termosifoni. Se dotato di centralina elettronica di regolazione e di un sistema di pompaggio per l'acqua, il rendimento può raggiungere l'80%, con circa tre quarti del calore ceduto all'acqua e la parte restante ceduta per irraggiamento all'ambiente dove si trova il caminetto.

### **Le stufe a legna**

La stufa differisce dai caminetti per il focolare generalmente chiuso e le conseguenti ampie superfici di scambio che diffondono calore sia per irraggiamento, sia per convezione. Possono però essere associate a un caminetto con fiamma a vista e riscaldare l'aria, che passa nell'intercapedine tra il focolare e il rivestimento, per convezione naturale o forzata da ventilatori.

### **Stufa a pellet e a cippato**

Sono sistemi con alimentazione automatica del combustibile, di pezzatura più o meno omogenea, che assicura un'elevata autonomia di funzionamento. La stufa può essere ad aria (in questo caso il meccanismo prevalente di trasmissione del calore è la convezione) o ad acqua (in questo caso circa il 70% del calore prodotto viene ceduto all'acqua del circuito dei termosifoni). Nell'ultimo caso è



possibile anche il riscaldamento diretto dell'acqua calda per usi sanitari. Il consumo orario, che varia in base al potere calorifico del combustibile e ai rendimenti di conversione, è mediamente pari a circa 0,25 kg/h per kW di potenza termica nominale. I sistemi più avanzati sono dotati di una regolazione continua del flusso di combustibile tramite un microprocessore per il controllo della temperatura e della concentrazione di ossigeno nei fumi.

Alcuni modelli sono provvisti di una funzione di mantenimento braci, che ne mantiene accesa una piccola quantità durante le pause di funzionamento, facilitando così il riavvio dell'impianto. Le fasi iniziali di funzionamento, in cui il sistema (camera di combustione e scambiatori di calore) è freddo, sono infatti le più critiche sia come rendimenti, sia come emissioni di inquinanti.

Caldaie a cippato e pellet sono disponibili sul mercato con potenze molto varie: da valori bassi fino a 200-300 kW, adatte a installazioni di tipo condominiale.

La Tabella 2 riassume i rendimenti caratteristici dei sistemi di combustione a biomassa di tipo domestico, evidenziando il netto incremento di efficienza nel passaggio da sistemi tradizionali a sistemi di nuova generazione. Questi miglioramenti sono dovuti in particolare alla progettazione della camera di combustione e alla realizzazione di sempre più sofisticati sistemi di controllo automatico.

Per quanto riguarda le emissioni atmosferiche, le moderne caldaie sono progettate perché si abbia una buona combustione della legna con emissioni comparabili alle caldaie convenzionali alimentate a gas. Il progetto Kyoto Lombardia ha stimato i valori medi dei fattori di emissione, riportati in Tabella 3, per diversi sistemi di combustione e diversi inquinanti. Risulta anche qui che, a parità di

*Tabella 2. - Rendimenti dei sistemi di combustione domestici*

	Rendimento %	
	min	max
Caminetto ventilato (aperto)		15
Stufa a legna	15	30
Stufa caminetto		75-80
Termo caminetto		80
Caldaia a tronchetti		40
Caldaia a legna automatica	60	85-90
Caldaia a cippato	60	75
Caldaia a fiamma inversa e doppia combustione		80
Caldaia a fiamma inversa e doppia combustione con microprocessore		90
Caldaia a pellet moderna con microprocessore		90

Tabella 3. - Fattori di emissione dei principali inquinanti della combustione domestica di legna

Sistema di combustione Inquinante	Camino aperto	Camino chiuso	Stufa tradizionale	Stufa innovativa	Stufa a pellet	Piccoli boiler	Boiler innovativi
PTS (g/GJ)	750	300	750	300	60	250	10
PM10 (g/GJ)	700	300	500	150	-	100	10
PM2.5(g/GJ)	700	300	-	300	-	100	10
CO (g/GJ)	5000	2700	4600	950	300	4000	-
COV (g/GJ)	1700	1600	900	200	-	950	220
PCDD/Fs (ng/GJ)	800	-	700	-	-	60	-

PTS: polveri totali sospese

energia prodotta, le emissioni dei sistemi più moderni sono inferiori, anche di un ordine di grandezza, rispetto ai sistemi più tradizionali per tutti gli inquinanti, inclusi diossine e furani (PCDD/Fs).

Se fosse quindi possibile sostituire tutti i vecchi sistemi di combustione con altri più moderni e avanzati, si potrebbero realizzare notevoli risparmi energetici e riduzioni di emissioni di inquinanti. Per esempio, per la Lombardia, il progetto citato ha stimato una minor emissione di 7000 t/anno di particolato (quasi il 30% delle emissioni complessive del 2005). Ciò ridurrebbe inoltre di ben 2.300.000 t/anno (il 2,6% del totale) le emissioni di biossido di carbonio equivalente, che, come vedremo in dettaglio nel prossimo capitolo, è un'altra delle rilevanti conseguenze negative della produzione di energia mediante combustione.

## FACCIAMO I CONTI

### Le concentrazioni al suolo

Vogliamo calcolare con il modello gaussiano presentato a p. 149 la concentrazione al suolo di un inquinante, per esempio di  $\text{NO}_x$ , di cui trascuriamo le trasformazioni chimiche, 3 km sottovento alla ciminiera. L'altezza efficace  $H_e$  si può calcolare con diverse formule basate sulla temperatura e la velocità di uscita dei fumi. Per i valori dell'emissione di una normale centrale termoelettrica, l'innalzamento iniziale può essere di 2-300 m sopra l'altezza della ciminiera.

Immaginiamo quindi le seguenti condizioni:

- Emissione  $Q$ : 100 g/s
- Altezza efficace  $H_e$ : 300 m
- Classe di stabilità atmosferica D
- Velocità del vento  $V$ : 3 m/s

Se l'emissione è su un terreno aperto, in campagna, le formule che si utilizzano per il calcolo di  $\sigma_y(x)$  e  $\sigma_z(x)$  sono riportate nella Tabella 4.

Tabella 4. - Dispersione orizzontale e verticale in funzione della distanza e della classe di stabilità su terreni aperti

Classe di stabilità	$\sigma_y(x)$	$\sigma_z(x)$
A	$0,22x (1 + 0,0001x)^{-1/2}$	$0,20x$
B	$0,16x (1 + 0,0001x)^{-1/2}$	$0,12x$
C	$0,11x (1 + 0,0001x)^{-1/2}$	$0,08x (1 + 0,0002x)^{-1/2}$
D	$0,08x (1 + 0,0001x)^{-1/2}$	$0,06x (1 + 0,0015x)^{-1/2}$
E	$0,06x (1 + 0,0001x)^{-1/2}$	$0,03x (1 + 0,0003x)^{-1}$
F	$0,04x (1 + 0,0001x)^{-1/2}$	$0,016x (1 + 0,0003x)^{-1}$

Assumendo  $x=3000$  m e classe D, otteniamo:

$$\begin{aligned}\sigma_y(x) &= 0,08x (1 + 0,0001x)^{-1/2} = 210,5 \text{ m} \\ \sigma_z(x) &= 0,06x (1 + 0,0015x)^{-1/2} = 76,7 \text{ m}\end{aligned}$$

A questo punto possiamo porre, per esempio,  $z=1$  m (cioè, calcoliamo la concentrazione a 1 m dal suolo) e inserire tutti i valori nella formula. Se poniamo  $y=0$  (cioè ci mettiamo esattamente sottovento al punto di emissione), il primo esponenziale diventa 1 e quindi otteniamo:

$$\begin{aligned}c(3000, 0, 1) &= \frac{100}{2\pi \cdot 3 \cdot 210,5 \cdot 76,7} \left[ \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{1-300}{76,7}\right)^2\right) + \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{1+300}{76,7}\right)^2\right) \right] \\ &= 0,33 \cdot 0,96 \cdot 10^{-6} = 0,32 \cdot 10^{-6} \text{ g/m}^3 = 0,32 \text{ g/m}^3\end{aligned}$$

Se invece ci spostiamo di 100 m dall'asse del vento e quindi  $y=100$  m, dobbiamo moltiplicare il termine appena ottenuto per il risultato del primo esponenziale che vale:

$$\exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y(x)}\right)^2\right) = \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{100}{210,5}\right)^2\right) = 0,89$$

quindi la concentrazione è pari all'89% di quella lungo la direzione del vento, mentre a 500 m, la concentrazione è solo il 6% di quella sopra calcolata.

#### Dalle concentrazioni istantanee alle medie annuali

Il modello gaussiano rappresenta, come si è detto nel paragrafo 4, una particolare situazione stazionaria dal punto di vista meteorologico e delle emissioni. Per quanto riguarda l'emissione, un'ipotesi di questo tipo è senz'altro accettabile in quanto, anche se l'emissione è variabile nel corso dell'anno, ci si pone di so-



lito nelle condizioni di emissione più elevate, in modo da rappresentare la condizione più critica. Per quanto riguarda le condizioni meteo, non è chiaro a priori quale possa essere la condizione più critica e inoltre spesso le norme e gli effetti sulla salute sono relativi ai valori medi annuali.

Come trasformare i valori calcolati su una situazione di breve periodo in valori medi? Si procede di solito nel modo seguente. Si definisce, per l'area che si vuole analizzare, un certo numero, di solito dell'ordine di alcune centinaia, di situazioni da valutare, ciascuna identificata da una classe di stabilità atmosferica, una classe di velocità e direzione del vento, un intervallo di altezze di inversione termica. Suddividendo, per esempio, in 8 classi la velocità del vento, in 16 settori la sua direzione, in 10 strati le possibili altezze d'inversione termica e tenendo conto delle 6 classi di stabilità, si otterrebbero  $8 \times 16 \times 10 \times 6 = 7680$  situazioni diverse. In effetti, molte di queste combinazioni non si verificano mai in pratica e quindi il numero di valutazioni da compiere può essere notevolmente minore.

Per ciascuna di queste situazioni  $i$  occorre comunque disporre della probabilità di accadimento  $p_i$  alla quale corrisponde in ogni punto una concentrazione  $c_i(x, y, z)$  calcolata dal modello. La concentrazione media annua  $C(x, y, z)$  è quindi valutabile come

$$C(x, y, z) = \sum_i p_i c_i(x, y, z)$$

In pratica, disponendo di una serie abbastanza lunga di misure effettuate ogni 3 ore, per esempio, per 2 anni, si stima la probabilità  $p$  di avere velocità del vento di 1 m/sec, direzione NNE, inversione a 1000 m e classe di stabilità A, calcolando quante volte si è verificata questa situazione (chiamiamo questo valore  $n_{\text{occorrenze}}$ ) rispetto al totale degli intervalli di 3 ore nei due anni; quindi

$$p = n_{\text{occorrenze}} / (8 \cdot 365 \cdot 2).$$

## DOCUMENTIAMOCI

### [www.ajdesigner.com/phpdispersion/point\\_space\\_equation.php](http://www.ajdesigner.com/phpdispersion/point_space_equation.php)

Sito che mette a disposizione le equazioni per calcolare diverse componenti relative alla dispersione degli inquinanti in atmosfera (altezza efficace, coefficienti di dispersione, formula gaussiana ecc.).

### [www.ambiente.regione.lombardia.it/inemar/webdata/main.seam?cid=403](http://www.ambiente.regione.lombardia.it/inemar/webdata/main.seam?cid=403)

INEMAR è l'inventario delle emissioni inquinanti in atmosfera della Regione Lombardia; è gestito da ARPA Lombardia e Regione Lombardia. Le emissioni sono classificate per settore e per provincia.

### [www.geos.ed.ac.uk/abs/research/micromet/java/plume.html](http://www.geos.ed.ac.uk/abs/research/micromet/java/plume.html)

A questo indirizzo è possibile scaricare "Environmental Pollution 3: Dispersion Modelling", un programma in Java che mostra come il modello gaussiano del





pennacchio può essere utilizzato per stimare le concentrazioni a terra di inquinanti derivanti da una sorgente di emissione.

**[www.minambiente.it](http://www.minambiente.it)**

Sul sito del ministero dell'Ambiente è possibile scaricare la *Relazione sullo stato dell'ambiente*, che dedica una sezione alle emissioni di sostanze inquinanti, al loro impatto e al loro andamento negli anni.

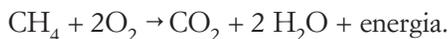
**[www.sinanet.apat.it/it](http://www.sinanet.apat.it/it)**

Il sito Sinanet fa parte della Rete del Sistema Informativo Nazionale Ambientale. Fornisce banche dati e mappe relative alla qualità dell'aria e alle emissioni in atmosfera in Italia. Sono disponibili anche i fattori di emissione di inquinanti per tipo di veicolo, tecnologia e ciclo di guida.



# ENERGIA, EFFETTO SERRA E CAMBIAMENTI CLIMATICI

Come abbiamo visto, il consumo di energia nel mondo è in rapido aumento e l'80% dell'energia mondiale è prodotto da combustibili fossili. Petrolio, carbone e gas naturale sono sfruttati per produrre energia attraverso una reazione di combustione. Per esempio, per il metano, questa reazione si può scrivere:

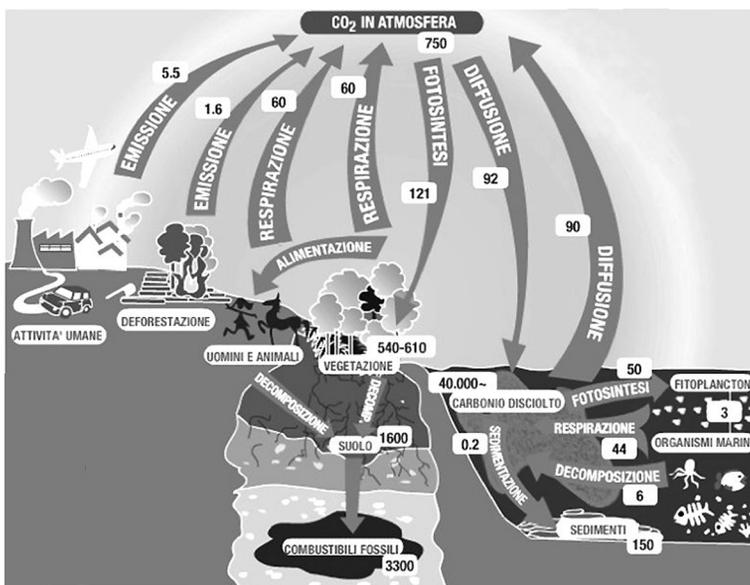


In pratica, tutti i combustibili fossili, che sono composti del carbonio (C), si associano all'ossigeno dell'atmosfera ( $\text{O}_2$ ) e danno come prodotti: energia, acqua ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e biossido di carbonio ( $\text{CO}_2$ ), comunemente chiamato anche anidride carbonica.

Dato il grande consumo di energia che caratterizza oggi il nostro pianeta, l'utilizzo di questi combustibili rappresenta in assoluto la maggiore fonte di emissione di  $\text{CO}_2$  di origine antropica, con oltre 25 Gt (gigatonnellate) emesse nel 2004. Questa enorme quantità di biossido di carbonio va ad alterare il cosiddetto "ciclo del carbonio", cioè il naturale flusso di questo elemento tra tutti i comparti dell'ecosistema planetario.

## 1. Il ciclo del carbonio

Nella Figura 1 sono rappresentati i principali scambi di carbonio tra tutti i componenti del mondo che ci circonda e il contenuto stimato di carbonio in ciascuno di questi. La maggior parte del carbonio non è in atmosfera, ma nelle rocce e negli idrocarburi della crosta terrestre e negli oceani. Un'altra parte importante è quella contenuta nello strato superficiale dei suoli e nella biosfera. Esiste uno scambio continuo di carbonio tra l'atmosfera, la vegetazione e il suolo attraverso la fotosintesi delle piante. Analogamente, esiste uno scambio continuo tra l'atmosfera e gli oceani, dovuto sia



**Figura 1.** Rappresentazione schematica del ciclo globale del carbonio. Flussi in PgC/anno e comparti in PgC. (fonte: www.consumieclima.org)

alla diffusione sia alla fotosintesi delle alghe e degli altri organismi viventi. Si tratta di flussi molto grandi, dell'ordine delle decine di gigatonnellate l'anno. Questi flussi sono rimasti sostanzialmente in equilibrio, se pur con qualche oscillazione, per migliaia o forse milioni di anni: il carbonio che entrava in ciascuno di questi comparti attraverso un certo meccanismo di scambio ne usciva nella stessa quantità mediante un altro meccanismo. La vegetazione, per esempio, attraverso la fotosintesi assorbiva carbonio dall'atmosfera e prima lo trasformava in biomassa poi, alla morte della pianta, lo restituiva in parte all'atmosfera e in parte al suolo. È proprio questo meccanismo che ha consentito, in tempi lunghissimi, la formazione dei depositi di idrocarburi.

Negli ultimi 150 anni l'attività umana è intervenuta a modificare sempre più rapidamente questi scambi e, in particolare, ad aumentare i flussi dalla vegetazione e dalla terra verso l'atmosfera. Con la deforestazione si libera, infatti, una parte del carbonio immagazzinato nella vegetazione (si stima un flusso di circa 1,5 Gt di carbonio l'anno), mentre l'utilizzo dei combustibili fossili rimuove circa 6



Gt/anno dai depositi sotterranei. Una parte di questi flussi sembra sia compensata da un aumentato assorbimento degli oceani, ma una parte, che si stima intorno alle 3 Gt/anno, va ad aggiungersi a quella presente in atmosfera, che nel 2008 ha raggiunto le 800 Gt, pari a una concentrazione di 386 ppmv (parti per milione in volume) di biossido di carbonio (vedi la scheda: "Facciamo i conti").

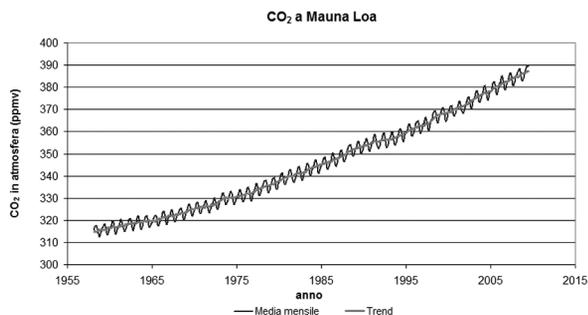
L'effetto dell'azione dell'uomo non è quello di "produrre" carbonio, cosa che, come tutti sanno, non è possibile ("Nulla si crea e nulla si distrugge", diceva Lavoisier, che era un chimico), ma di estrarre il carbonio in tempi relativamente brevi, dell'ordine degli anni, da depositi nei quali si è accumulato in tempi dell'ordine delle migliaia o dei milioni di anni. Il deposito dell'aumentato flusso di carbonio è l'atmosfera e dunque è in questo comparto che sono stati rilevati i cambiamenti più significativi.

Le misure della concentrazione di biossido di carbonio in atmosfera sono iniziate già da vari anni e, grazie a complesse indagini, siamo riusciti a risalire anche alle concentrazioni presenti milioni di anni fa. Disponendo di questi dati possiamo allora indagare la "storia" della concentrazione atmosferica di biossido di carbonio.

Per esempio i valori rilevati dall'osservatorio di Mauna Loa, nelle isole Hawaii, lontano da insediamenti umani rilevanti e quindi ritenuti rappresentativi della situazione del pianeta, mostrano che la concentrazione in atmosfera del biossido di carbonio ha uno spiccato andamento stagionale (Figura 2). In primavera-estate, grazie all'intensa attività fotosintetica delle piante, diminuisce e aumenta nel resto dell'anno per il prevalere della respirazione cellulare.

Anche in Italia sono presenti due stazioni specifiche per la misurazione della concentrazione atmosferica di biossido di carbonio: una sull'Appennino Tosco-Emiliano in vetta al monte Cimone a 2165 m (il Centro Aeronautica Militare di Montagna, CAMM) e una sull'isola di Lampedusa (stazione dell'ENEA); la prima rileva dati di biossido di carbonio dal 1979, la seconda dal 1992. Entrambe le stazioni fanno parte, assieme a molte altre distribuite su tutto il globo terrestre, dell'Osservatorio Atmosferico Globale (Global Atmosphere Watch, GAW) dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale delle Nazioni Unite (WMO), che si occupa di mettere a confronto dati provenienti da tutto il mondo relativi ai gas serra. Per far questo, tutte le stazioni che fanno parte della rete rilevano i dati usando gli stessi metodi, che sono standardizzati a livello internazionale.





**Figura 2.** Valori mensili delle concentrazioni di biossido di carbonio (in ppmv) misurati presso l'Osservatorio di Mauna Loa dagli anni '70 a oggi. La linea scura mostra il trend delle osservazioni.

Negli ultimi 150 anni l'aumento della concentrazione di biossido di carbonio è stato molto più rapido e intenso che durante le naturali oscillazioni storiche. In Figura 3 è rappresentato l'andamento della concentrazione di biossido di carbonio in atmosfera a partire da 10.000 anni fa. Si osserva che fino a 150 anni fa circa la concentrazione è sempre stata inferiore a 280 ppmv. Se però guardiamo il pannello piccolo in cui sono ingranditi i dati dal 1750 a oggi, osserviamo anche che rispetto al 1950 la concentrazione si è impennata da circa 280 ppmv ai valori attuali di circa 380 ppmv: insomma, negli ultimi 50 anni la concentrazione atmosferica di biossido di carbonio ha raggiunto valori mai toccati prima! Inoltre, il tasso di crescita della concentrazione di CO<sub>2</sub> degli ultimi 10 anni (in media pari a 1,9 ppmv per anno per il periodo 1995-2005) è il maggiore di quelli registrati da quando si misurano in continuo i parametri dell'atmosfera (1,4 ppmv per anno per il periodo 1960-2005).

Come è possibile sapere quale era la concentrazione atmosferica di biossido di carbonio migliaia di anni fa, quando non c'era nemmeno l'uomo e, figuriamoci, gli strumenti di misurazione?

Il metodo più attendibile e usato per analizzare la composizione chimica dell'atmosfera del lontano passato è quello di estrarre dai ghiacciai e dalle calotte polari lunghe carote di ghiaccio. Per esempio, il 21 dicembre 2004 a Dome Concordia, in Antartide, i ricercatori del progetto EPICA (European Project for Ice Coring in An-

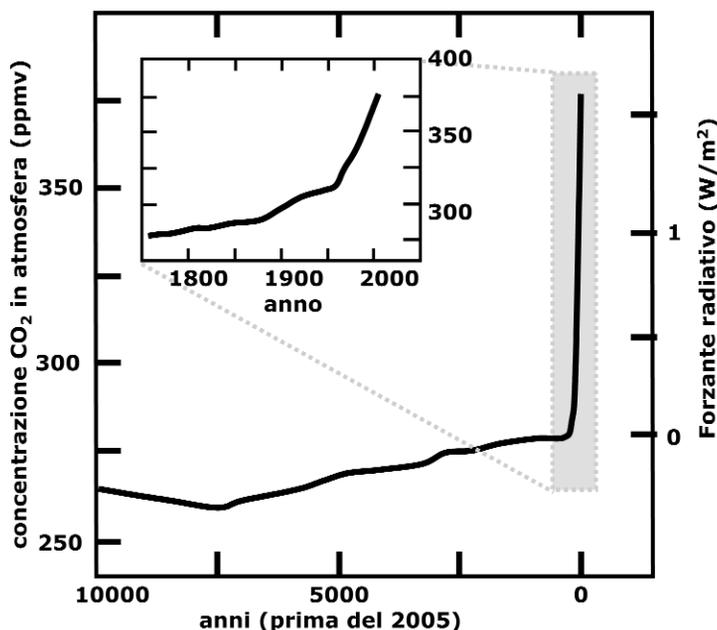


Figura 3. Variazione della concentrazione di biossido di carbonio a partire da 10.000 anni fa (fonte: IPCC WGI, 2007).

tartica), al quale l'Italia partecipa attivamente, hanno concluso una perforazione della calotta glaciale estraendo una carota di ghiaccio proveniente dalla profondità di 3270 m (pensate che il Monte Bianco è alto 4810 m!). Nei diversi strati di questa carota di ghiaccio sono rimaste intrappolate bollicine dell'aria presente al tempo della formazione del relativo strato. Il contenuto di queste microscopiche bollicine può essere analizzato e datato sulla base della sua profondità nella carota di ghiaccio. A oggi siamo già in grado di ricostruire la concentrazione di gas in atmosfera di 600.000 anni fa, ma grazie alla carota di Dome Concordia arriveremo presto a 740.000 anni.

Oltre all'analisi della composizione gassosa delle bollicine d'aria nelle carote di ghiaccio, un modo alternativo per studiare la composizione dell'atmosfera del passato è utilizzare altre variabili, dette *proxy* (che significa: sostituto, delegato), strettamente legate a essa. Sono di questo tipo gli anelli degli alberi fossili, i sedimenti marini e lacustri, i coralli che possono essere datati attraverso l'analisi dei rapporti fra le concentrazioni di isotopi di uno stesso elemento, come



l'ossigeno o il carbonio. Ovviamente l'affidabilità e la precisione di queste valutazioni sono decisamente minori di quelle dei dati strumentali e la loro disponibilità è limitata geograficamente. Tuttavia, rimangono una fondamentale (e per ora unica) fonte d'informazione per lo studio dell'atmosfera del remoto passato.

## 2. L'effetto serra

Il biossido di carbonio è un normale componente dell'atmosfera, un gas inerte, inodore e incolore al quale siano abituati da quando abbiamo cominciato a respirare. Perché ce ne dobbiamo occupare?

Se la Terra fosse priva di atmosfera sarebbe praticamente una palla di ghiaccio: con un semplice ragionamento termodinamico non è difficile ricavare che la sua temperatura media superficiale sarebbe pari a circa  $-18^{\circ}\text{C}$ . Questo valore renderebbe chiaramente impossibile la vita così come noi oggi la conosciamo.

Per fortuna la Terra, a differenza della Luna, ha una massa tale da garantire un'attrazione gravitazionale sufficiente a contrastare in modo efficace i movimenti casuali delle molecole di gas e a trattenerle vicino alla superficie terrestre. In questo modo si è formata l'atmosfera che gioca un ruolo fondamentale nel mantenere la temperatura media del nostro pianeta attorno ai  $15^{\circ}\text{C}$ .

Per mantenere questo equilibrio termico, l'energia fornita alla Terra dalla radiazione solare deve essere bilanciata da un'uguale quantità di energia emessa sotto forma di radiazione infrarossa (quindi calore) dalla Terra stessa. Parte di questa radiazione riflessa attraversa l'atmosfera e si perde nello spazio, mentre un'altra porzione, maggiore della precedente, è nuovamente riflessa dall'atmosfera verso la Terra. È proprio questa radiazione che rimane intrappolata nell'atmosfera che mantiene la nostra temperatura normale e produce quello che viene chiamato "effetto serra".

Assumendo pari a 100 unità la radiazione solare incidente:

- 23 unità sono assorbite dall'atmosfera (19 da vapor acqueo, ozono e pulviscolo, 4 dalle nuvole);
- 31 unità sono riflesse come onde corte, cioè la luce visibile, da nubi, ghiacciai, mari e da altri corpi riflettenti della superficie terrestre;
- 46 unità sono assorbite dalla superficie terrestre. Per mantenere la temperatura terrestre mediamente costante, bisogna che ci sia





un flusso uscente dalla superficie terrestre pari anch'esso a 46 unità, di cui 7 unità vanno a riscaldare direttamente l'atmosfera (calore sensibile); 24 unità sono utilizzate per l'evaporazione delle masse d'acqua (calore latente) nel relativo ciclo; 15 unità sono reirraggiate dalla Terra sotto forma di onde lunghe infrarosse (calore): una parte di queste onde lunghe (6 unità) sono catturate dalle nubi, dal vapor d'acqua e dai gas serra che trattengono questo calore nell'atmosfera.

Anche l'atmosfera (nubi, vapor d'acqua e vari gas componenti) è all'incirca in equilibrio termico: poiché riceve 23 unità direttamente dal Sole e 37 dalla Terra (6 come onde lunghe, 7 come calore sensibile e 24 come calore latente), ci deve essere necessariamente un'emissione di 60 unità verso lo spazio esterno e, infatti, 20 unità sono emesse sotto forma di onde lunghe dalle nubi e 40 dal vapor d'acqua, dall'ozono e dal biossido di carbonio.

Come già accennato, oltre al biossido di carbonio, esistono in atmosfera altri gas serra con una capacità di trattenere il calore molto più elevata, ma presenti in concentrazioni assai più basse: il metano ( $\text{CH}_4$ ), il protossido di azoto ( $\text{N}_2\text{O}$ ), i clorofluorocarburi (CFC), l'ozono troposferico ( $\text{O}_3$ ). Per definire l'apporto di ciascuno di questi gas, si fa riferimento al loro potenziale di riscaldamento globale (*global warming potential*, GWP). Questo valore rappresenta il rapporto fra il riscaldamento globale causato in un determinato periodo di tempo (di solito 100 anni) da un chilogrammo del particolare gas e quello provocato da un chilogrammo di biossido di carbonio. Così, il GWP del biossido di carbonio è ovviamente unitario, il metano ha GWP pari a 21, molto più alto quindi di quello del biossido di carbonio, il protossido d'azoto ha GWP pari a 310, mentre i clorofluorocarburi hanno un GWP che varia da 5000 fino a 12.100. Questo significa che anche piccolissime quantità di CFC possono esercitare un effetto serra non trascurabile. Per misurare il potenziale di riscaldamento globale di un'emissione di vari gas serra si utilizza l'equivalente in biossido di carbonio, espresso in "tonnellate di biossido di carbonio equivalente", calcolato come la somma dei prodotti delle tonnellate di ciascun gas emesso per il rispettivo GWP.

Abbiamo già visto che l'utilizzo dei combustibili fossili, la deforestazione e, più in generale, il cambio di uso del suolo sono le attività antropiche maggiormente responsabili dell'emissione di  $\text{CO}_2$  nel-





l'atmosfera. Il metano, invece, deriva dalla decomposizione di materia organica: le discariche di rifiuti, gli allevamenti zootecnici intensivi, le risaie sono le principali attività antropiche che ne causano l'emissione in atmosfera. Il protossido d'azoto, prodotto dall'attività batterica, deriva principalmente dalle attività agricole e zootecniche.

### 3. Le evidenze scientifiche del riscaldamento globale

A questo punto possiamo affermare che l'aumento della concentrazione di biossido di carbonio e degli altri gas serra nell'atmosfera può alterare gli equilibri naturali e incrementare la radiazione riflessa verso la Terra, in ultima analisi il calore trattenuto dall'atmosfera. Un gran numero di misurazioni dirette e indirette mostrano inequivocabilmente che la concentrazione di biossido di carbonio nell'atmosfera sta certamente aumentando ed è cresciuta in modo molto chiaro e significativo rispetto alle concentrazioni in epoca preindustriale. Questo è vero anche per gli altri gas serra, in particolare metano e protossido di azoto, le cui emissioni sono aumentate clamorosamente negli ultimi 150 anni. Si tratta di capire se questo aumento ha già comportato o può comportare un innalzamento misurabile e significativo della temperatura del nostro pianeta.

Per comprendere se ciò si è effettivamente verificato, dobbiamo innanzitutto avere a disposizione dati numerosi e affidabili sulla temperatura atmosferica con cui indagare se il suo valore medio è variato nel tempo come la concentrazione atmosferica di biossido di carbonio, e, nel caso, se le due variazioni sono legate tra loro.

#### 3.1 *Le stime della temperatura sulla Terra*

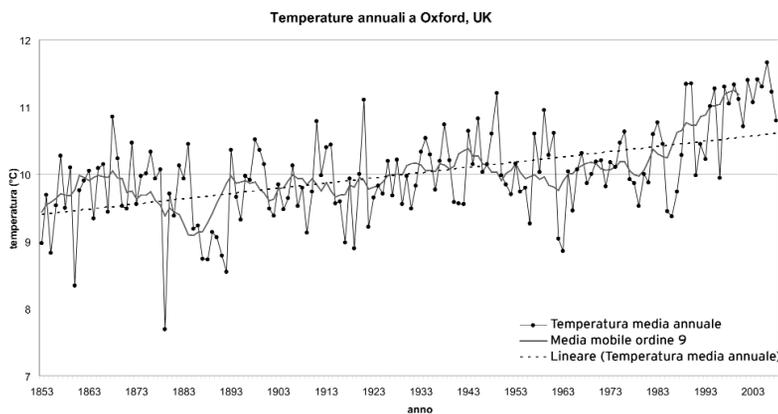
È però importante rendersi conto che la grandezza "temperatura media della Terra" non esiste fisicamente e che le misure di cui possiamo disporre sono solo misure di temperatura in un dato punto del globo e in uno specifico istante di tempo. È poi facilissimo constatare che, misurando la temperatura nello stesso luogo in istanti diversi o misurandola nello stesso istante in luoghi diversi si riscontra un'estrema variabilità. Basta pensare, per esempio, alle variazioni stagionali della temperatura o alle differenze che vediamo nella nostra città da un anno all'altro. Ci sono poi fenomeni più complessi. Il clima sulle rive del mare o di grandi laghi è meno caldo d'e-



state e meno freddo d'inverno rispetto alle città dell'entroterra, poiché l'acqua ha una capacità termica molto superiore all'aria e si riscalda e si raffredda più lentamente, moderando gli sbalzi termici. Un altro fenomeno è quello delle "isole di calore" nelle aree densamente urbanizzate: le superfici asfaltate e i muri delle case assorbono calore che restituiscono molto lentamente all'ambiente, riscaldandolo; inoltre l'intensità del traffico automobilistico, il riscaldamento domestico e la presenza di stabilimenti industriali riscaldano ancora più l'aria delle aree urbane.

Occorre quindi fare riferimento a stazioni di misura che siano sufficientemente lontane dai centri abitati e comunque poco influenzate dalla presenza dell'uomo. Stazioni di questo tipo possono trovarsi in montagna o in mezzo agli oceani. Per ciascuna di esse, occorre tener conto che le temperature "normali" (cioè la media di quelle registrate su un intervallo di tempo sufficientemente lungo) sono assai diverse, perché come si sa la temperatura in generale decresce con la quota sul livello del mare.

Per capire meglio quali sono i problemi legati agli andamenti della temperatura, esaminiamo la Figura 4 in cui è riportata la serie di misure strumentali della temperatura di Oxford, una delle più lunghe del mondo. A Oxford sono stati infatti misurati il minimo e il massimo della temperatura tutti i giorni dall'inizio del 1850. La figura rappresenta i valori medi annuali (pallini e linea chiara). Benché si



**Figura 4.** Temperature a Oxford in Inghilterra dal 1850 a oggi. Con i punti sono indicate le medie annuali; con la linea continua è indicata la media mobile di ordine 9; con la linea tratteggiata è indicata la tendenza di lungo periodo.

osservi abbastanza facilmente che l'andamento è tendenzialmente crescente, è molto difficile valutare l'entità di tale aumento, dato che i valori cambiano significativamente ogni anno.

Per analizzare questo tipo di dati, di solito si utilizzano i cosiddetti "filtri", vale a dire medie mobili che calcolano il valore in ciascun anno come la media della temperatura dell'anno stesso e degli 8 anni vicini (i 4 precedenti e i 4 successivi). Si ottiene così la linea scura in Figura 4, che come si vede presenta una variabilità molto minore. Portando all'estremo questo tipo di procedimento, si può determinare la linea retta che si avvicina meglio ai dati dell'intera serie e che quindi filtra tutta la variabilità a eccezione dei cambiamenti di lungo periodo. È la linea tratteggiata nella Figura 4 che ci consente di dire che negli ultimi 150 anni a Oxford c'è stato un aumento di temperatura di circa 1 °C.

Queste considerazioni sono importanti perché ci consentono di capire che le valutazioni relative alla temperatura (e a tutte le variabili climatiche in generale) sono in effetti solo delle *stime* ottenute mediante qualche tipo di elaborazione matematica e statistica a partire dai dati misurati. Come tali, sono frutto di una certa interpretazione del fenomeno e hanno un'incertezza intrinseca; per ridurla è necessario operare su un numero di dati annuali molto elevato. La WMO adotta, infatti, la convenzione di parlare di clima prendendo in considerazione intervalli temporali di 30 anni. L'andamento degli ultimi tre o quattro anni, quelli di cui ci ricordiamo meglio, e le frasi fatte del tipo "Non è mai stato così freddo" o "Non ci sono più le mezze stagioni" possono essere usate nelle discussioni tra amici, ma non negli studi sul clima!

Un'ulteriore difficoltà nella misura e valutazione delle temperature nasce dal fatto che, per evidenti ragioni storiche, molte misure di temperatura sono state, soprattutto nel passato, prese in ambito urbano, dove per la formazione delle isole di calore di solito si registrano temperature maggiori. Si potrebbe allora pensare che i dati di temperatura registrati dai termometri nelle varie località e che testimoniano il riscaldamento globale siano viziati dall'effetto isola di calore perché presi in ambiente urbano. Va tuttavia detto che l'effetto di isola di calore cresce, ma si livella verso un valore massimo al crescere dell'area urbanizzata: questo effetto, quindi, era già presente e aveva espresso gran parte della sua potenzialità quando è stata avviata la misurazione della temperatura in molti osservatori in ambito urbano, soprattutto in Europa, dove i fenomeni di urbanizzazio-



ne sono fortemente radicati nei secoli. Quindi, l'incremento della temperatura osservato chiaramente negli ultimi 50-100 anni non è se non in minima parte ascrivibile all'effetto di isola di calore.

Inoltre, gli scienziati che studiano il clima sono ben coscienti di questi e di altri problemi, come i cambiamenti delle tecnologie per misurare la temperatura, gli errori sistematici dovuti al posizionamento degli strumenti o quelli accidentali legati alla precisione e periodica manutenzione delle apparecchiature. Di conseguenza, gli esperti del settore applicano rigorose tecniche matematiche per rendere omogenee le serie storiche proprio al fine di eliminare possibili fonti di errore nella valutazione degli andamenti spaziali e temporali. Del resto, anche le temperature misurate in stazioni oceaniche molto lontane dai centri abitati mostrano tendenze all'aumento analoghe a quelle misurate nelle stazioni terrestri.

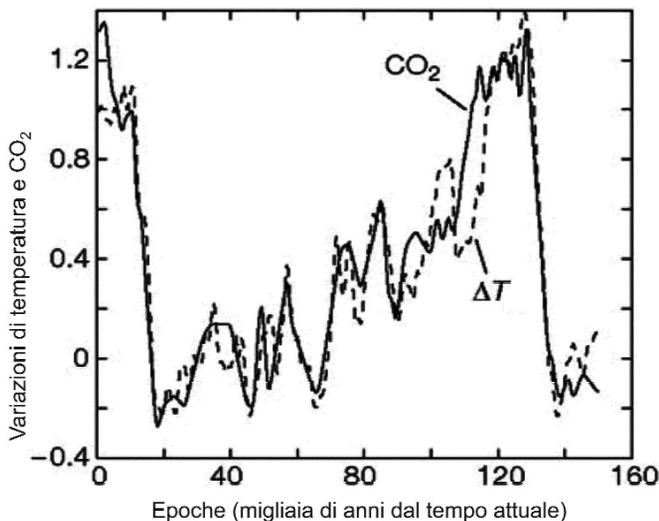
### 3.2 I "termometri naturali"

Esiste tutta una serie di "termometri naturali" che testimonia del progressivo mutamento del clima. Alcune specie animali e vegetali rispondono velocemente alle variazioni del clima. Si tratta in genere di specie con un ciclo di vita molto breve e con elevata sensibilità alle condizioni climatiche; tipicamente gli insetti rispondono a queste caratteristiche. Si è osservato, per esempio, che alcune specie di farfalle hanno modificato la propria distribuzione spaziale assecondando le variazioni del clima: la *Argynnis paphia* nei Paesi scandinavi si è spostata verso nord (quindi verso temperature più basse) abbandonando la parte meridionale della Svezia divenuta più calda. La *Heodes tityrus* invece ha lasciato le porzioni più meridionali del suo habitat in Catalogna per colonizzare nuove aree a nord dei Pirenei in Francia. Questi comportamenti sono veri e propri segnali delle nuove condizioni climatiche e, in particolare, dell'aumento della temperatura. Tuttavia, come vedremo nel paragrafo 4, dedicato agli impatti dei cambiamenti climatici, non tutte le specie sono in grado di adattarsi e questo può avere effetti molto negativi sulla biodiversità.

### 3.3 La correlazione biossido di carbonio-temperatura

Date quindi le serie storiche di biossido di carbonio e temperatura, vediamo se è possibile affermare che esiste un legame tra queste due grandezze. Nella Figura 5 sono riportati gli andamenti della concentrazione media globale di biossido di carbonio e la va-





**Figura 5.** Andamento normalizzato della concentrazione di biossido di carbonio (linea continua) e della variazione di temperatura dell'emisfero australe (linea tratteggiata). **Fonte:** Cuffey & Vimeux, *Nature*, 2001.

riazione della temperatura media dell'emisfero australe stimate negli ultimi 160.000 anni. Si nota facilmente che le due grandezze sembrano evolvere in modo assai simile (entrambe sono "normalizzate" in modo da avere la stessa media).

Di solito, non ci si accontenta di valutare le cose "a occhio". Si cerca piuttosto di definire qualche indicatore quantitativo del legame tra due grandezze, in questo caso le temperature e le concentrazioni medie. L'indicatore più utilizzato in questi casi è la "correlazione": un indicatore statistico che è tanto più vicino a 1 quanto più due variabili tendono a differire dalla propria media contemporaneamente e della stessa entità relativa. Al contrario, se l'indicatore è prossimo a 0, significa che le due grandezze si allontanano dalla propria media in tempi diversi e quindi non sembrano evolvere congiuntamente, ovvero non esiste un legame di relazione fra loro. Si tratta quindi di un indicatore molto sintetico (un solo numero) della variabilità congiunta di due serie di dati: il suo valore, nel caso dei dati in Figura 5 è abbastanza elevato (vicino a 0,7). Ciò tuttavia non indica necessariamente quale delle due sia la causa dell'altra o se esiste una terza variabile che influenza entrambe.

Proprio per cercare, da un lato, di definire scientificamente i termini del problema e, dall'altro, di comprendere quali potessero essere le politiche di intervento, nel 1988, l'Organizzazione Meteorologica Mondiale e il Programma Ambientale delle Nazioni Unite hanno istituito il Comitato Intergovernativo per lo studio dei Cambiamenti Climatici (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC). L'IPCC è formato da oltre 1200 scienziati di diversi Paesi e ha il compito di fornire tutte le informazioni scientifiche, tecniche e socioeconomiche rilevanti per la comprensione e la quantificazione del rischio di cambiamento climatico dovuto alle attività umane, delle sue conseguenze e delle opzioni per mitigarle. La creazione dell'IPCC è stata fondamentale per consentire un'ampia collaborazione a livello mondiale, cioè proprio alla scala giusta per affrontare il problema. L'IPCC non conduce direttamente ricerche, né raccoglie dati climatici, piuttosto basa il proprio lavoro principalmente sulla revisione critica di pubblicazioni scientifiche e tecniche per capire sempre meglio i cambiamenti climatici e stendere dei rapporti periodici. L'IPCC ha pubblicato quattro importanti rapporti di valutazione nel 1990, nel 1995, nel 2001 e nel 2007. Nel 2007 l'IPCC ha vinto il premio Nobel per la pace "per gli sforzi per costruire e diffondere una maggiore conoscenza sui cambiamenti climatici causati dall'uomo, e per aver gettato le basi per le misure necessarie per contrastare tali cambiamenti".

Anche grazie alla gigantesca opera di sintesi costituita dai rapporti IPCC, attualmente le idee sono molto più chiare di quanto non lo fossero anche solo pochi anni fa. In particolare, il rapporto pubblicato nel febbraio 2007 contiene un certo numero di affermazioni e di previsioni, per ciascuna delle quali è fornito un grado di affidabilità, sulla base delle conoscenze scientifiche attuali. Le conclusioni principali sono che:

- le concentrazioni in atmosfera di biossido di carbonio e altri gas serra sono certamente aumentate per cause antropiche;
- con un'affidabilità molto elevata (*very high confidence*) si può dire che le attività umane hanno un effetto riscaldante sul clima;
- alcuni effetti del cambiamento climatico in atto sono evidenti e misurati, sia a livello climatico sia a livello ecologico.

Nonostante tutti questi segnali, l'ipotesi di un riscaldamento globale causato dalle attività umane ha suscitato, negli ultimi anni, ampio dibattito all'interno della comunità scientifica e dei media. Un re-

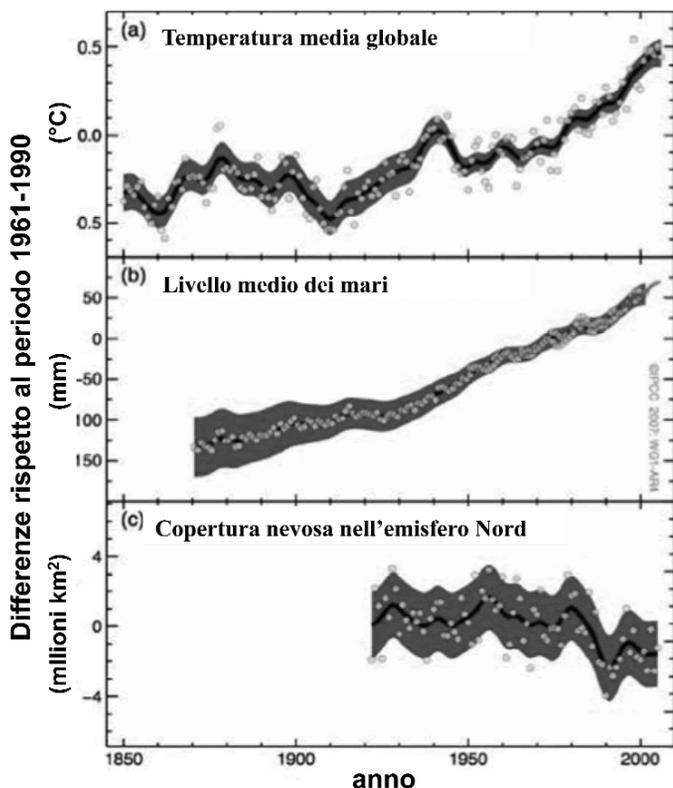
cente libro di Stefano Caserini, *10 miti sul clima: piccola guida all'informazine sui cambiamenti climatici* (2009) ha raccolto numerosi elementi delle discussioni che si sono svolte in Italia.

#### 4. Gli impatti dei cambiamenti climatici

Le affermazioni e le previsioni del rapporto IPCC del 2007 sono documentate dai dati mostrati in Figura 6. Si tratta degli andamenti della temperatura media terrestre (in alto), del livello medio dei mari (al centro), della superficie coperta dalla neve nell'emisfero Nord (in basso). Si noti che tutti i grafici sono scritti in termini di "anomalie", cioè come differenze rispetto alle medie del periodo 1961-1990. Se quindi la temperatura media degli anni intorno al 2000 corrisponde al valore  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ciò significa che in quegli anni c'è stato circa mezzo grado in più rispetto ai 30 anni precedenti. In effetti, negli anni dal 1995 al 2006 si sono verificati gli undici anni più caldi dal 1850. Si noti comunque che il trentennio considerato come base era già stato più caldo di gran parte del periodo precedente. In linea con le tendenze osservate a scala globale, in Italia la temperatura è aumentata di circa  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

##### 4.1 Su oceani e ghiacciai

Negli ultimi 100 anni anche la temperatura media globale degli oceani è aumentata, almeno fino alla profondità di 3000 m: l'oceano assorbe più dell'80% del calore aggiunto al sistema climatico. La temperatura media globale della superficie terrestre è aumentata di  $0,74\text{ }^{\circ}\text{C}$  nel periodo 1906-2005, ma il trend degli ultimi 50 anni è in accelerazione con una proiezione di crescita pari a  $1,28\text{ }^{\circ}\text{C}$  per secolo. La crescita totale del livello del mare per il XX secolo è stata stimata pari a 17 cm (intervallo di incertezza 12-22 cm), ma anche in questo caso il fenomeno è in una fase di accelerazione e le proiezioni basate sui dati degli ultimi 50 anni forniscono una tendenza di crescita pari a 31 cm per secolo. L'aumento del livello medio dei mari è causato da due fattori: lo scioglimento dei ghiacci terrestri (in Groenlandia e in Antartide) e la dilatazione termica che, benché piccola in sé, sulle enormi masse d'acqua che costituiscono gli oceani agisce in modo non trascurabile. Invece, lo scioglimento dei ghiacci marini del Polo Nord, benché decisamente rilevante, non può comportare alcuna variazione di volume delle acque in cui erano comunque ghiacci galleggianti.



**Figura 6.** Andamento della temperatura media globale, del livello medio dei mari e della copertura nevosa dell'emisfero Nord dal 1850 al 2005. **Fonte:** IPCC, 2007.

L'analisi della Figura 6 ci consente qualche ulteriore considerazione. I punti, corrispondenti ai dati misurati, hanno una variabilità elevata da un anno all'altro e quindi ne sono state fatte delle medie (linee centrali scure) e una valutazione della variabilità (banda grigia). L'ampiezza della banda serve per dare un'indicazione dell'incertezza delle nostre conoscenze; nel caso della temperatura e del livello del mare si va restringendo negli anni più recenti grazie a una maggiore affidabilità delle misure, ma non potrà mai scomparire del tutto, perché rappresenta anche la variabilità intrinseca del fenomeno considerato. Nel caso della superficie innevata, infatti, non c'è alcuna riduzione dell'incertezza, anche se si nota abbastanza chiaramente che c'è una certa tendenza alla diminuzione.

Lo scioglimento dei ghiacciai alpini è un fenomeno ben noto e in corso già da diversi decenni. Il ghiacciaio della Marmolada nelle Dolomiti, per esempio, dal 1905 si è ritirato di circa 650 m sul fronte centrale, 400 m su quello occidentale e 380 m su quello orientale. Questo fenomeno è purtroppo generalizzato, come ha mostrato la ricerca condotta della Fondazione Lombardia per l'Ambiente secondo cui 70 ghiacciai lombardi, su 71 monitorati, appaiono in netto regresso. Per esempio, in un arco di 95 anni, i dati del ghiacciaio dei Forni (Ortles-Cevedale), il più vasto delle Alpi lombarde, mostrano un regresso totale di circa 1,7 km; se si tiene conto anche dei rari dati della seconda metà dell'Ottocento si arriva a un regresso di circa 2,6 km.

#### 4.2 *Sulla meteorologia*

Una causa di questo regresso, sempre legato all'aumento della temperatura, è stata la diminuzione delle precipitazioni nevose: negli ultimi vent'anni di poco inferiore al 20%, con punte del 40% nelle località a bassa quota; la quantità di acqua immagazzinata nella neve è così diminuita. Questi fenomeni influiscono a loro volta sul regime idrico durante il periodo di scioglimento delle nevi e potranno determinare in futuro una riduzione della ricarica delle falde.

Un'altra importante conseguenza dei cambiamenti climatici è la variazione della distribuzione delle precipitazioni, cioè intensità e durata. Tipicamente si osservano piogge più brevi e più intense e periodi più lunghi senza precipitazioni. Per capire le possibili conseguenze, si pensi che il territorio italiano è caratterizzato da un elevato rischio alluvionale e da un'elevata instabilità idrogeologica. Negli ultimi 30 anni, l'Italia è stato il primo Paese europeo per numero di vittime e il secondo Paese, dopo la Francia, per numero di eventi estremi. Secondo l'Agenzia Europea dell'Ambiente, dal 1990 il numero di eventi estremi in Europa è raddoppiato e la media annuale dei danni è aumentata da 5 a 11 miliardi di euro. Le inondazioni, ogni anno, rappresentano un terzo del totale degli eventi, causando la metà dei decessi e un terzo dei danni economici.

L'aumento dei fenomeni estremi non è solo un problema europeo: dal 1970, i cicloni tropicali hanno aumentato la loro attività soprattutto nel Nord Atlantico. Tutti ricordano l'uragano Katrina che nella tarda estate 2005 ha devastato parte della costa del Golfo del Messico negli Stati Uniti, colpendo in particolare gli Stati del Mississippi e della Louisiana. A New Orleans l'uragano ha provocato la rot-



tura degli argini che proteggevano la città dalle acque dei canali che affluiscono al lago Pontchartrain, causando l'inondazione dell'80% del territorio urbano. I costi di Katrina sono stati elevatissimi: almeno 1836 morti e danni per più di 100 miliardi di dollari.

Tuttavia i danni dovuti agli eventi estremi, come uragani o inondazioni, non dipendono solo dall'intensità del fenomeno naturale, ma anche dalla densità e dal valore delle strutture costruite dall'uomo che essi incontrano sulla loro strada e quindi danneggiano. L'urbanizzazione selvaggia delle rive dei fiumi che ha avuto luogo un po' in tutto il mondo, dall'Italia al Bangladesh, fa sì che, da una parte, le grandi piogge non siano più trattenute dal terreno e dalla vegetazione, ma possano scorrere molto rapidamente su superfici impermeabili, dall'altra, ci siano tantissime strutture costruite molto vicino all'acqua, che quindi sono immediatamente colpite in caso di episodi di questo tipo.

Anche le ondate di calore sono eventi estremi. Negli ultimi 100 anni il numero di giorni freddi e di gelo è diminuito, mentre sono aumentati sia il numero di giorni in cui la temperatura supera i 25 °C, sia il numero di ondate di calore. L'ondata di calore del 2003, con temperature di 4 °C al di sopra della media stagionale per tre mesi consecutivi, ha causato 7000 morti in Italia. Condizioni simili si sono verificate in altre regioni europee.

Questi eventi tendono a diventare sempre più frequenti con l'aumentare delle temperature e il loro impatto è maggiore nelle aree urbane, dove si somma l'effetto dell'isola di calore. Allo stesso tempo le ondate di calore e l'aumento di temperatura portano a un maggiore uso dell'aria condizionata (nel 2003 la vendita di condizionatori per uso domestico è salita del 45% rispetto all'anno precedente) e, quindi, della domanda di energia elettrica. La rete elettrica deve quindi adattarsi a soddisfare picchi di domanda, pena l'aumento del rischio di blackout (quello dell'estate 2003 causò danni economici nel solo settore industriale italiano pari a circa 400 milioni di euro). L'aumento dei consumi energetici nel periodo estivo (ormai comparabili se non superiori a quelli invernali) è un problema non marginale per un Paese come l'Italia in cui la capacità produttiva fatica a soddisfare la crescente domanda energetica.

Una variazione del regime delle precipitazioni (nella direzione di un aumento della frequenza delle piogge brevi e intense e di un prolungamento dei periodi siccitosi), può comportare una riduzione, anche a parità di precipitazioni annuali, della reale capacità di gene-



razione di energia dei bacini idroelettrici a causa della difficoltà di garantire un sufficiente invaso nei periodi in cui è maggiore il picco di domanda energetica. Inoltre, la riduzione delle precipitazioni nevose (a causa di temperature invernali sempre più miti) può indurre una sensibile diminuzione degli apporti al sistema idrico di superficie e a quello delle acque sotterranee. Al contrario, inverni più miti hanno il vantaggio di ridurre i consumi per riscaldamento con una conseguente riduzione delle emissioni inquinanti in atmosfera, a partire dalle polveri fini che in tante occasioni hanno fatto decidere il blocco del traffico.

Lo stress termico legato alle ondate di calore e quello idrico conseguente alla diminuzione delle precipitazioni e quindi alla riduzione della disponibilità idrica nel periodo estivo (momento del picco della domanda) possono ripercuotersi negativamente anche sulla produzione agricola, soprattutto nei mesi più critici, giugno e luglio, e nelle zone tradizionalmente caratterizzate da deficit idrico nel periodo estivo, per esempio, la Bassa padana. Le colture di mais e orticole sono quelle più colpite dai cambiamenti climatici.

#### 4.3 *Sugli ecosistemi*

I cambiamenti climatici possono modificare la composizione, la produttività e la struttura degli ecosistemi. Molte specie animali e vegetali possono riprodursi e svilupparsi con successo solo all'interno di un determinato intervallo di temperature e di precipitazioni; analogamente, le condizioni meteo-climatiche influenzano sulla disponibilità di risorse alimentari e sulla distribuzione geografica delle specie. Il riscaldamento globale ha impatto sulla struttura e sul funzionamento degli ecosistemi terrestri, sulla fisiologia e sulle fasi di sviluppo delle specie vegetali e animali, sugli areali di distribuzione delle specie. Le specie possono rispondere alle variazioni climatiche adattandosi alle nuove condizioni attraverso la selezione di varianti genetiche la cui fisiologia permetta la sopravvivenza nelle nuove condizioni. Risposte alternative o complementari sono l'anticipazione o il ritardo di eventi come l'accoppiamento e la nascita dei cuccioli, la fioritura o la colorazione autunnale delle foglie, oppure anche la migrazione verso latitudini (o per le specie acquatiche verso profondità) dove le condizioni sono ancora adeguate o lo sono diventate. Quando invece il cambiamento ambientale non permette l'adattamento o la migrazione, la specie può ridursi fino all'estinzione locale o addirittura globale.



In particolare, in risposta ai cambiamenti climatici, l'areale di distribuzione potenziale delle specie si sposta verso latitudini e altitudini maggiori. Poiché l'areale di molte specie animali è strettamente legato a quello di un particolare tipo di vegetazione, lo spostamento dell'areale dipende anche dallo spostamento della vegetazione. Molte specie animali e vegetali, dai molluschi ai mammiferi e dalle erbe agli alberi, hanno spostato i loro areali verso i poli (mediamente di 6,1 km per decennio) alla ricerca di temperature più fresche.

Si prevede che nei nostri parchi nazionali alcune specie, come gli stambecchi, si ritireranno verso quote più elevate, cercando temperature medie inferiori. Su molte cime alpine è stato già osservato uno spostamento delle specie vegetali di 1-4 m per decennio verso l'alto. Anche nel sud della Svizzera si sta assistendo a un cambiamento della vegetazione: piante decidue autoctone lasciano il posto a sempreverdi esotiche che meglio si adattano alle nuove temperature più elevate. L'invasione di specie esotiche è stata recentemente documentata anche per il Mediterraneo in cui sono stati trovati pesci provenienti dai mari del sud: per esempio, i barracuda nel Mar Ligure.

Per quanto riguarda le variazioni nel tempo degli eventi del ciclo di vita, quelli primaverili, quali la fioritura, la deposizione delle uova, la riproduzione, avvengono con sempre maggiore anticipo (2-3 giorni di anticipo per decennio). Gli eventi autunnali, invece, come la colorazione e successiva caduta delle foglie negli alberi decidui, avvengono in ritardo.

Le modificazioni del clima hanno conseguenze anche sulla disponibilità delle risorse necessarie alla vita delle specie animali e vegetali. Per esempio, alle latitudini settentrionali, inverni più miti potrebbero aumentare la possibilità di piogge sopra il suolo ricoperto di neve e, di fatto, creare enormi problemi agli erbivori che si nutrono di licheni. Infatti, l'infiltrazione di acqua piovana attraverso la neve causa lo scioglimento dello strato di neve a contatto con il suolo che quando le temperature scendono (per esempio, di notte) si trasforma in ghiaccio e forma una copertura impenetrabile che impedisce agli animali di accedere al cibo. Inoltre, le temperature più alte promuovono la crescita di funghi e muffe tossiche tra i licheni.

Gli scienziati sono molto impegnati nello studiare quali potranno essere gli impatti del clima sulle specie e sulla biodiversità. Alcune stime globali dell'estinzione di specie a causa dei cambiamenti climatici indicano che entro il 2050 tra il 18% (in uno scenario più ottimista) e il 35% (in uno scenario più pessimista) delle specie potrebbe



estinguersi. Sono cifre incredibili! Anche se gli autori di questo studio avessero sbagliato di un ordine di grandezza, si tratterebbe della perdita di centinaia di migliaia di specie!

#### 4.4 *Le conseguenze sulla società*

Abbiamo qui tracciato un quadro sintetico degli impatti dei cambiamenti climatici con l'intenzione di mostrare, da un lato, quanto sia complesso identificare e valutare le conseguenze sulla nostra società e sull'ambiente e, dall'altro, quanto possano essere gravi e irreversibili alcuni impatti, in particolare l'estinzione di specie viventi. Inoltre, gli effetti dei cambiamenti climatici si sovrappongono e interagiscono con tutti quegli elementi strutturali che caratterizzano un territorio: densità ed età media della popolazione, utilizzo del suolo, grado di urbanizzazione, domanda di energia, stabilità idrogeologica, produttività agricola, presenza di beni artistici e naturali da salvaguardare, inquinamento.

Tutte queste pressioni possono agire indipendentemente o in associazione l'una con l'altra. Per esempio, l'aumento degli eventi estremi combinato alle modifiche di uso del suolo ha come conseguenza l'aggravamento degli effetti di alluvioni, frane, eventi meteorologici intensi, siccità. Studiare i cambiamenti climatici futuri e le loro conseguenze permette di individuare quali comparti del patrimonio ecologico, del capitale umano e delle capacità produttive di un dato territorio sono più a rischio e devono essere salvaguardati.

L'impatto della maggior concentrazione di gas serra non riguardano, quindi, soltanto le temperature o altri parametri climatici. È per questo motivo che in ambito scientifico si parla da sempre non di riscaldamento globale, ma piuttosto di cambiamenti climatici: non è un caso che il già citato Intergovernmental Panel on Climate Change è per l'appunto una commissione intergovernativa sui "cambiamenti climatici".

## 5. Scenari futuri

Il clima, in realtà, ha sempre subito e continuerà a subire cambiamenti dovuti a cause naturali: mutamenti d'intensità della radiazione solare, eruzioni vulcaniche, fluttuazioni naturali del sistema climatico in sé. Tuttavia le cause naturali da sole non riescono a spiegare l'attuale riscaldamento globale e la comunità scientifica concorda nel ritenere che la causa principale di questo processo siano le

emissioni di gas serra dovute alle attività umane. È quindi necessario cercare di capire quali saranno gli effetti delle emissioni di gas serra in atmosfera e come si modificherà di conseguenza la Terra e la nostra vita. Le previsioni sono molto difficili a causa dell'estrema complessità del problema e dell'impossibilità di compiere esperimenti che possano ragionevolmente rappresentare tutte le relazioni tra le variabili coinvolte.

### 5.1 Che cos'è e come funziona un modello matematico del clima?

Per comprendere e prevedere il clima dei prossimi 50-100 anni sulla base delle emissioni di gas serra che si verificheranno, l'unico mezzo a nostra disposizione è costituito dai modelli matematici. Questi permettono di simulare il sistema climatico terrestre grazie alla rappresentazione delle leggi fisiche e delle interazioni chimiche che lo caratterizzano. I dati su processi e interazioni sono forniti dai risultati di esperimenti in laboratorio e da misure sul campo. Per elaborare l'enorme mole di dati, parametri e calcoli sono necessari i più potenti computer.

I modelli climatici, detti AOGCM (sigla di *Atmosphere-Ocean General Circulation Models*), sono modelli complessi che al loro interno comprendono modelli dei comparti che costituiscono il sistema climatico o influiscono su di esso, come schematizzato nella Figura

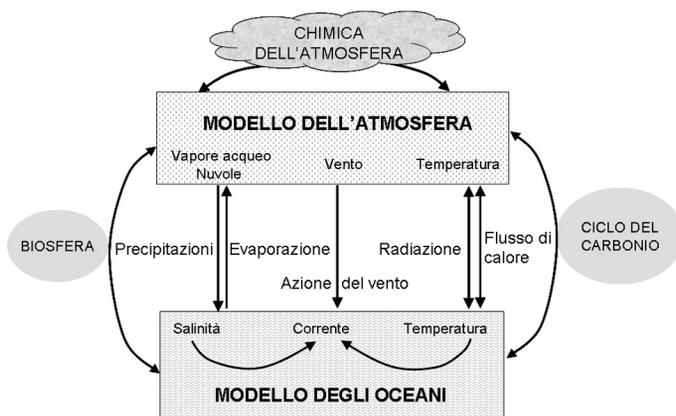


Figura 7. Schema di un modello climatico.

7: il modello dell'atmosfera, degli oceani, della biosfera e del ciclo del carbonio. Il modello del comparto relativo all'oceano è composto, per esempio, da un modello matematico che ne descrive la temperatura, le correnti, la salinità e così via. Analogamente il comparto della biosfera descrive l'uso del suolo; particolare attenzione è dedicata alle foreste per la loro fondamentale capacità di assorbire biossido di carbonio nella materia organica tramite la fotosintesi, da un lato, e di rilasciare in atmosfera enormi quantità di  $\text{CO}_2$  a seguito d'incendi o di deforestazione, dall'altro. Il modello tiene conto anche dei fenomeni che legano tra loro tutti i comparti, come le precipitazioni o l'evaporazione o i flussi di carbonio. Nonostante i progressi fatti nella descrizione e simulazione del clima, mancano ancora alcuni pezzi importanti da descrivere: per esempio, ci sono notevoli incertezze sulle retroazioni (*feedback*) clima-ciclo del carbonio e sugli effetti dei cambiamenti delle calotte polari.

Proviamo a capire meglio come sono caratterizzati i comparti del modello: per ognuno si scrive una serie di equazioni (differenziali) che traducono le tradizionali leggi della fisica e della chimica. Le leggi più utilizzate sono:

- la legge di Newton:  $F = ma$ ;
- la legge dei gas perfetti:  $PV = nRT$ ;
- la formula dell'accelerazione di Coriolis (che traduce l'effetto della rotazione della Terra):  $a = -2\omega v$ ;
- la conservazione dell'energia espressa dalla prima legge della termodinamica;
- le equazioni che esprimono i cambiamenti di stato dell'acqua (solido, liquido, vapore);
- le leggi che esprimono la trasmissione del calore (convezione, irraggiamento ecc.).

Queste leggi definiscono ciò che accade in un punto della superficie o dell'atmosfera della Terra e, per comprendere la situazione complessiva, andrebbero applicate con continuità a tutta la sua superficie (oceani compresi) e all'atmosfera. Tuttavia, poiché ciò non è possibile, si ricorre a un'approssimazione, detta "discretizzazione". Si suddivide cioè la superficie della Terra e la sua atmosfera in porzioni, dette "celle", sia in orizzontale sia in verticale, e si effettuano i calcoli soltanto nei vertici di queste celle che costituiscono la cosiddetta "griglia" (o grigliato). La discretizzazione comporta che il modello non può fornire alcuna informazione su eventuali situazioni di-

verse che si verificano all'interno di ogni cella, cioè a una scala più piccola di quella adottata per la discretizzazione; perciò i fenomeni che si possono effettivamente valutare devono almeno coinvolgere aree della dimensione delle celle. Per capire l'importanza della discretizzazione, si pensi che fino allo scorso decennio l'Italia settentrionale era rappresentata in un'unica cella comprendente le Alpi e la Pianura Padana: il risultato era la rappresentazione, evidentemente irrealistica, di quest'area come un unico altipiano.

Nei modelli più recenti questo problema è stato risolto. L'evoluzione dei sistemi di calcolo ha permesso, infatti, di sviluppare modelli climatici sempre più complessi. Per esempio, in dieci anni il modello sviluppato dall'inglese Hadley Centre for Climate Prediction and Research è aumentato in complessità nella rappresentazione orizzontale dello spazio (oggi le griglie hanno un lato di 135 km), verticale dell'atmosfera (da 19 a 28 strati) e dell'oceano (da 20 a 40 strati). La complessità, inoltre, è aumentata perché i modelli più recenti comprendono la descrizione dei numerosi fenomeni che avvengono all'interno della cella: per esempio, le reazioni chimiche nell'atmosfera, la circolazione negli oceani, l'interazione con i sistemi biotici, gli aerosol e così via.

Esistono poi metodi di regionalizzazione del clima (detti di *down-scaling*) che permettono di descrivere il sistema climatico su aree geografiche più piccole (per esempio, l'Europa e non più la Terra) in modo da utilizzare griglie più fini, con 30 km di lato invece di 135. Questo permette di tenere conto dei fenomeni che avvengono a scala locale e influiscono sul clima.

In ogni caso, la risoluzione adottata dai modelli è un compromesso tra la precisione dei risultati e il tempo di calcolo necessario alla loro esecuzione. Questi calcoli sono, infatti, estremamente lunghi e necessitano dei più veloci computer disponibili. Una batteria di supercalcolatori (tra i quali, per esempio, il Fujitsu VPP 5000 installato alla sede di Météo France a Toulouse che ha una velocità di 250 miliardi di operazioni al secondo, cioè 250 Gigaflop) ha lavorato per ben 42.600 ore (quasi 5 anni di tempo di calcolo complessivo distribuito su vari processori) per preparare gli scenari che sono stati analizzati nel IV rapporto dell'IPCC!

Una volta scritte le equazioni e fissata la risoluzione, il modello deve venire "calibrato" (o "tarato"). Ciò significa che, utilizzando i dati raccolti, si "aggiustano" tutti i parametri del modello in modo da rappresentare al meglio le situazioni verificatesi nel passato.

Successivamente il modello è utilizzato per capire cosa succederà nel futuro in corrispondenza di un determinato “scenario”, cioè di una serie di ipotesi, riguardanti, per esempio, i futuri consumi di energia e le relative emissioni di gas serra e le loro conseguenze. Alcuni scenari immaginano la stabilizzazione o riduzione delle emissioni: per esempio, grazie alla diffusione di fonti rinnovabili e del risparmio energetico. Altri scenari ipotizzano che le emissioni continuino ad aumentare: per esempio, a causa del continuo aumento dei consumi di energia.

Il modello non è quindi usato per fare previsioni precise, ma principalmente per capire quali possono essere le conseguenze di determinate azioni o eventi. I suoi risultati vanno quindi interpretati con occhio critico, perché dipendono non solo dalle approssimazioni proprie del modello (per esempio, il numero necessariamente limitato di variabili considerate, la discretizzazione spaziale e l'incertezza su molte leggi fisiche che governano i fenomeni a scala planetaria), ma anche dalla formulazione degli scenari (cioè delle evoluzioni attese delle emissioni da gas serra). Pur con queste limitazioni, i modelli climatici risultano fondamentali nello studio dei cambiamenti climatici perché sono l'unico strumento di cui oggi disponiamo per valutare quantitativamente l'effetto della riduzione o dell'aumento delle emissioni.

### *5.2 Che cosa prevedono gli scenari dell'IPCC*

I modelli calcolano dunque le conseguenze determinate da un dato scenario di emissione di gas serra basato su considerazioni sociali, economiche e politiche, che possono includere diverse (o anche nessuna) iniziative sul clima. Tra gli scenari possibili c'è ovviamente anche quello che tutto continui secondo gli attuali andamenti, i principali dei quali sono stati esaminati nei capitoli precedenti.

È importante ricordare che, in base al compromesso fra tempi di calcolo e discretizzazione spaziale, le proiezioni climatologiche fornite dai modelli sono da ritenersi valide su una scala superiore a quella della maglia spaziale su cui sono calcolate: in pratica, nel caso di una discretizzazione di  $30 \times 30$  km, oggi una delle più precise, le caratteristiche del clima stimate dai modelli si possono ritenere affidabili su un'area di 4 o 5 volte superiore, vale a dire che sono da considerarsi come le statistiche medie del clima su un'area di circa 5000 km<sup>2</sup>. Dal momento che alcuni fenomeni meteorologici cambiano

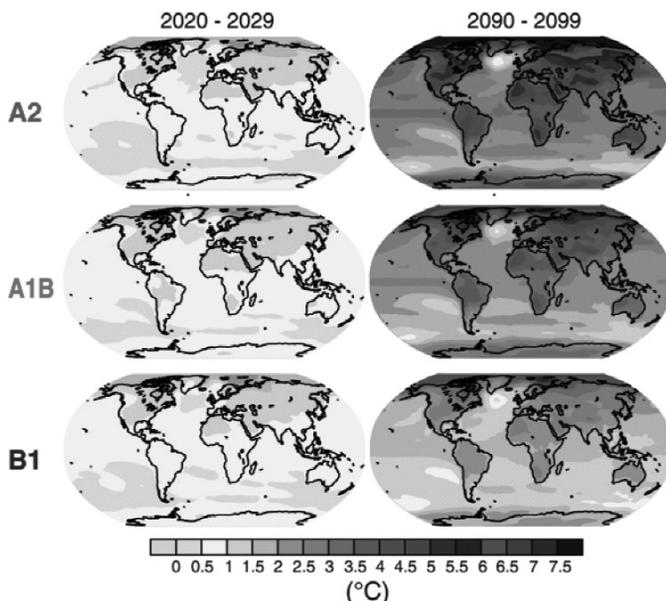
molto da zona a zona (come la pioggia, ma anche come la temperatura a seconda del versante o del livello di esposizione), si comprende come sia ancora difficile valutare la situazione su scala estremamente dettagliata per capire come in futuro sarà il tempo, per così dire, proprio a casa mia.

Tenendo conto di queste difficoltà, il progetto europeo Ensemble lanciato nel 2004 ha analizzato le proiezioni di una serie di modelli emissivi e climatologici per verificare la consistenza delle valutazioni basate su ipotesi e tecniche di simulazione differenti. I risultati preliminari di questo progetto sono sostanzialmente concordi con quelli del quarto rapporto dell'IPCC pubblicato nel 2007, che sono riassumibili nei nove punti qui di seguito descritti.

1. L'aumento delle temperature (massime, medie e minime) superficiali della Terra nei prossimi 20 anni potrebbe essere di
  - di 0,2 °C per decennio secondo gli scenari di emissione considerati;
  - di 0,1 °C per decennio se la concentrazione di tutti i gas serra e degli aerosol fosse tenuta costante alle concentrazioni dell'anno 2000.

Il riscaldamento sarà massimo alle latitudini più settentrionali e minimo sopra l'oceano meridionale e il Nord Atlantico. Alcuni di questi risultati sono rappresentati nella Figura 8 e mostrano chiaramente che ci si attende un riscaldamento diverso tra le alte e le basse latitudini. La figura mostra anche come i risultati dei modelli cambino al variare degli scenari, identificati dalle sigle B1, A1B e A2. Lo scenario B1 prevede che nel futuro siano adottate politiche di riduzione delle emissioni e, infatti, gli aumenti di temperatura sono più contenuti rispetto agli altri due scenari. Lo scenario A2 invece ipotizza l'aumento dell'utilizzo di fonti fossili e quindi delle emissioni di gas serra in atmosfera; di conseguenza, l'aumento di temperatura è molto più significativo che negli altri due scenari. Lo scenario A1B si colloca a metà tra il B1 e l'A2.

2. Il caldo continuerà a sciogliere i ghiacci. Si assottiglierà lo strato di ghiaccio del Polo Nord e si ritireranno molti ghiacciai. Il ghiaccio marino artico potrà sparire quasi completamente alla fine dell'estate a partire dalla fine del XXI secolo. Anche la copertura nevosa delle montagne continuerà a diminuire.
3. Il livello del mare continuerà ad aumentare. Lo scioglimento dei ghiacci e l'espansione termica delle acque oceaniche (causata dal-



**Figura 8.** Variazioni rispetto alle medie 1980-99 delle temperature terrestri alla superficie previste per l'inizio (2020-29) e la fine (2090-99) del XXI secolo. A colori più scuri corrispondono aumenti di temperatura maggiori. Le sigle A2, A1B e B1 indicano scenari emissivi diversi (fonte: IPCC WGI, 2007).

la loro maggiore temperatura) provocherà un innalzamento del livello del mare compreso tra i 18 e i 59 cm alla fine del secolo (a seconda dello scenario considerato). Molte città (come Venezia, Amsterdam, New York, Tokyo, Atene), molte regioni costiere e piccole isole saranno totalmente o parzialmente sommerse dall'acqua. Vi sarà intrusione di acqua salata nelle foci dei fiumi e nelle riserve di acqua potabile.

4. Varierà la distribuzione delle precipitazioni. Le precipitazioni (pioggia e neve) aumenteranno alle alte latitudini e diminuiranno nella maggior parte delle aree subtropicali. In Europa aumenteranno a nord e diminuiranno a sud. Ci saranno conseguenze anche sulla qualità dell'aria, poiché un aumento della stabilità atmosferica e la diminuzione della copertura nuvolosa possono portare a un'intensificazione delle reazioni fotochimiche alla base della produzione di particolato fine secondario durante il periodo invernale e dell'ozono troposferico durante il periodo esti-



vo, vanificando così in parte l'effetto delle misure volte al contenimento dell'inquinamento atmosferico.

5. Aumenteranno gli eventi estremi come inondazioni, uragani, siccità e ondate di calore. Sono state già registrate siccità più lunghe e di maggior intensità in aree sempre più estese a partire dagli anni '70, soprattutto nelle zone tropicali e subtropicali. Sono stati osservati anche con maggior frequenza le ondate di calore e gli eventi di abbondanti precipitazioni che danno luogo a inondazioni. Il rapporto dell'IPCC afferma che, per queste variazioni relative all'accadimento di eventi estremi, l'influenza delle attività umane è "più probabile che non". Ciò significa che occorre continuare le osservazioni e le analisi dei dati futuri per arrivare a conclusioni scientificamente più certe, ma che in ogni caso una componente antropica sembra assodata.
6. Gli oceani diverranno più acidi. L'aumento della concentrazione di biossido di carbonio nell'atmosfera causa l'acidificazione delle acque oceaniche, fenomeno che interferisce con i processi di calcificazione di moltissimi organismi e che può avere drammatiche conseguenze per coralli, plancton e numerose specie acquatiche. In effetti, il pH alla superficie degli oceani è già diminuito di 0,1 unità rispetto al periodo preindustriale. Le conseguenze non sono ancora note e sono attualmente oggetto di ricerca scientifica: è possibile che gli organismi inferiori, come il fitoplancton e lo zooplancton, abbiano margini di adattamento dal momento che hanno cicli vitali piuttosto brevi. Molti organismi a livelli trofici superiori, invece, come molluschi e pesci, hanno una fase larvale che può essere verosimilmente influenzata da questa riduzione del pH con effetti potenzialmente devastanti sulla demografia di queste specie che non hanno possibilità di adattamento sulle scale temporali su cui avvengono questi fenomeni.
7. Molte piante e animali migreranno o si estingueranno perché non potranno sopravvivere alle nuove temperature. Saranno più colpite le specie che si trovano nelle aree più vulnerabili all'aumento delle temperature (le cime delle montagne, le aree alle latitudini maggiori, le porzioni di mare delimitate dalla terraferma): tutte queste specie non potranno infatti spostarsi e occupare nuovi areali. Gli effetti di altre attività umane, come l'alterazione degli habitat o l'introduzione di specie invasive, amplificheranno ulteriormente le conseguenze dei cambiamenti climatici sulle specie e sugli ecosistemi.





8. Si ridurrà probabilmente la disponibilità idrica e quindi l'attività agricola e la carenza di cibo e di acqua si diffonderà in molte parti del pianeta a causa dell'aumento dei periodi di siccità. La Pianura Padana, per esempio, potrebbe diventare meno adatta all'agricoltura e comunque richiederà cambiamenti nei tipi di colture. In generale, inverni meno rigidi potranno permettere un'anticipazione della fine dello stato vegetativo, della germogliazione e della fioritura e quindi più raccolti in un anno. Tuttavia il deficit idrico legato a una diminuzione delle precipitazioni potrebbe inficiare la produzione agricola. Le simulazioni e gli studi di laboratorio mostrano inoltre che le ondate di calore possono provocare uno stress termico nelle piante tale da bloccare la crescita, anche in presenza di adeguata disponibilità d'acqua, vanificando così i benefici portati da temperature invernali più miti. Non ultimo, la mancanza di gelate e, in generale, un aumento delle minime invernali, può avvantaggiare non solo le piante, ma anche i loro parassiti, con conseguente perdita di raccolti o necessità di ricorrere a pesticidi con effetti potenzialmente dannosi sull'ambiente.
9. L'aumento di frequenza degli eventi estremi, in particolare delle ondate di calore, potrà avere un impatto sulla salute. Esiste, infatti, una chiara e provata relazione fra ondate di calore ed episodi sanitari, ricoveri ospedalieri e decessi della popolazione di ultrasettantacinquenni. Analisi specifiche indicano un effetto rilevante della temperatura sui ricoveri per patologie cardiovascolari e respiratorie. Fondamentale è la durata dell'ondata di calore dal momento che la persistenza di questo fenomeno per più giorni consecutivi genera uno stress fisiologico con conseguenti effetti deleteri sullo stato di salute complessivo. Per i ben noti fenomeni d'invecchiamento che interessano tutta Italia, la fascia più anziana della popolazione è destinata a raddoppiare nei prossimi decenni, aumentando quindi i soggetti potenzialmente a rischio. Dal punto di vista sanitario, preoccupazioni sono già emerse a causa dell'anticipazione della fioritura e del termine dello stato vegetativo di betulle, noccioli, ontani e platani dovuta a inverni sempre più miti, con la conseguente produzione di sostanze allergeniche. Ci sono anche preoccupazioni legate alla diffusione di malattie tropicali a causa dello spostamento degli insetti che ne sono i vettori: per esempio della zanzara anofele che può trasportare il parassita





della malaria. Anche se questa minaccia potrebbe non interessare i Paesi occidentali grazie al livello di igiene e agli interventi sanitari, potrebbe invece aggravare la situazione in molti Paesi in via di sviluppo.

Tutti questi cambiamenti avranno costi notevoli in termini economici, ecologici e sociali. Inoltre, anche se smettessimo di emettere gas serra e le concentrazioni in atmosfera si stabilizzassero, il riscaldamento globale e l'innalzamento del livello del mare continuerebbero per almeno un millennio. Ciò è dovuto alle lunghe scale temporali associate ai processi climatici e al ciclo del carbonio: occorrono, infatti, molti anni per rimuovere dall'atmosfera i gas serra emessi. È quindi indispensabile cominciare ad agire il più presto possibile: il risultato delle nostre azioni attuali avrà effetti che coinvolgeranno per moltissimo tempo le generazioni future.

#### DIAMOCI DA FARE

##### **Cattura e stoccaggio del biossido di carbonio**

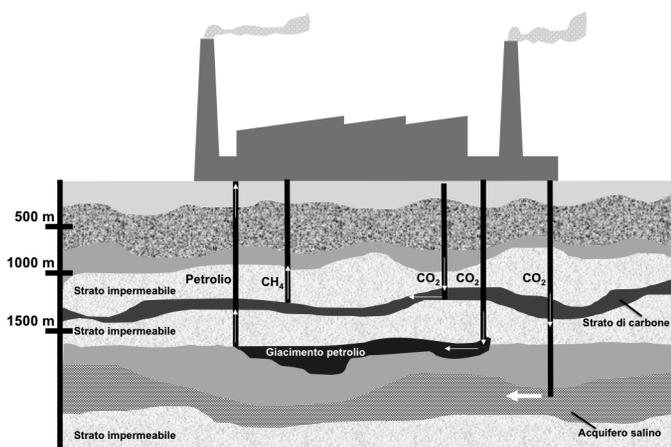
Il processo della cattura e sequestro del carbonio (CCS, sigla di *Carbon Capture and Storage*) consiste nella separazione del biossido di carbonio ( $\text{CO}_2$ ) dalle fonti industriali ed energetiche, nel suo trasporto a un sito di stoccaggio e nell'isolamento a lungo termine in formazioni geologiche, come mostrato in Figura 9. Il CCS consente di catturare e immagazzinare in profondità il biossido di carbonio prodotto da impianti a combustibile fossile, impedendogli così di raggiungere l'atmosfera. La tecnologia utilizzata per lo stoccaggio del biossido di carbonio è relativamente assestata, perché riprende quella utilizzata dall'industria petrolifera per aumentare l'estrazione di petrolio e dall'industria del gas naturale per il suo stoccaggio.

La cattura del biossido di carbonio può avvenire alla sorgente dell'emissione (centrali elettriche a carbone o biomassa, industrie che emettono grandi quantità di biossido di carbonio, impianti di produzione d'idrogeno da combustibili fossili) attraverso tre modalità principali.

La prima è la cattura postcombustione e consiste nella separazione del biossido di carbonio dai fumi generati dalla combustione, preventivamente depurati mediante gli attuali sistemi di trattamento. Tale separazione avviene utilizzando un solvente che assorbe il biossido di carbonio a bassa temperatura dai fumi e lo rilascia successivamente per riscaldamento, generando un flusso di biossido di carbonio pressoché puro.

Nella cattura precombustione invece il biossido di carbonio è rimosso prima della combustione. La gassificazione del combustibile fossile con ossigeno e il successivo trattamento del gas generato produce un flusso costituito da idrogeno e  $\text{CO}_2$ ; il biossido di carbonio è separato e l'idrogeno è utilizzato per la genera-





**Figura 9.** Il CCS consiste nella cattura del biossido di carbonio da centrali elettriche o da altre grosse fonti industriali di emissione e nel suo stoccaggio per lunghi periodi (migliaia di anni) in formazioni geologiche (Fonte: [www.wri.org](http://www.wri.org)).

zione elettrica in un ciclo combinato o per altri usi come vettore energetico. Infine, con la ossicombustione, il combustibile fossile è alimentato al combustore con ossigeno anziché aria, generando un flusso gassoso costituito principalmente da biossido di carbonio e vapore d'acqua che in parte è ricircolato al combustore. Il vapore d'acqua è separato per condensazione e il flusso di biossido di carbonio concentrato può essere compresso e stoccato.

Le tecnologie a oggi disponibili sono in grado di catturare circa l'85-95% del biossido di carbonio. Tuttavia bisogna tener conto dell'aumento di produzione di  $\text{CO}_2$  per la perdita di efficienza dell'impianto a causa del consumo energetico richiesto dallo stoccaggio e dalla compressione del biossido di carbonio stesso: una centrale elettrica dotata di un sistema di CCS (con accesso a un sito di stoccaggio nell'oceano o nel sottosuolo) avrebbe bisogno approssimativamente del 10-40% di energia in più di una centrale equivalente senza CCS.

Dopo che è stato catturato, il biossido di carbonio è compresso e trasportato per lo stoccaggio nelle formazioni geologiche (giacimenti di gas e di petrolio, bacini carboniferi e formazioni saline profonde), nell'oceano (rilascio diretto nella colonna d'acqua o sul pavimento profondo oceanico), in carbonati minerali. Nella Tabella 1 sono riportate le capacità di stoccaggio globale del biossido di carbonio nei vari mezzi. I siti nell'oceano e nel sottosuolo hanno enormi potenzialità di stoccaggio. Per avere un termine di confronto, si consideri che le emissioni antropogeniche attuali ammontano a circa 8,5 GtC all'anno (1 GtC = 1 miliardo di tonnellate carbonio, equivalente a 3,7 Gt  $\text{CO}_2$ ).

Tabella 1. - Capacità globale di stoccaggio di biossido di carbonio

Opzioni di sequestro	Capacità di stoccaggio globale (GtC)
Oceano	1000-10.000
Formazioni saline profonde	100-10.000
Giacimenti di petrolio e gas naturale in via di esaurimento	100-1000
Giacimenti di carbone	10-1000
Terrestre	10-100

Per quanto riguarda i rischi legati al CCS, i ricercatori ritengono siano moderati e comunque comparabili con quelli di analoghe attività industriali (stoccaggio sotterraneo di gas naturale). Per minimizzarli, è comunque fondamentale che esista un'adeguata regolamentazione e che i progetti siano realizzati secondo le migliori pratiche. Lo sviluppo di linee guida per la scelta del sito, il monitoraggio e l'assistenza a lungo termine delle tecnologie CCS è essenziale perché queste tecnologie siano sicure e socialmente accettabili.

Uno dei più importanti siti di cattura e stoccaggio di carbonio è Sleipner Vest in Norvegia. Dal 1996 ogni anno in questo sito sono stoccate nella falda acquifera, a più di 800 m sotto il fondale marino, un milione di tonnellate di biossido di carbonio provenienti dall'estrazione di gas naturale sullo stesso sito di Sleipner della Statoil (compagnia petrolifera norvegese). Il progetto di cattura e stoccaggio di carbonio ha preso il via nel 1990 e ha interessato la Statoil sia perché il gas naturale estratto conteneva biossido di carbonio al 9%, una percentuale elevata per il consumo senza trattamento, sia perché in Norvegia era in vigore una tassa sulle emissioni di CO<sub>2</sub>. La Statoil decise quindi di separare il biossido di carbonio e di iniettarlo nel sottosuolo, migliorando la qualità del gas estratto ed evitando di pagare la tassa sul biossido di carbonio. Per farsi un'idea di quanto sia stato complicato realizzare questo progetto, basta pensare al fatto che tutte le strutture di separazione, cattura e iniezione nel sottosuolo dovevano essere sufficientemente compatte da stare su una piattaforma in mezzo al Mare del Nord e distante 250 km dalla costa. Il sito è ovviamente costantemente monitorato e studiato e, secondo gli scienziati, il biossido di carbonio lì immagazzinato resterà nel sottosuolo per migliaia di anni. La stratificazione del suolo è, infatti, composta da una roccia porosa impregnata di acqua salina, che si trova al di sotto di uno strato spesso 800 m di solida roccia che impedisce qualunque rilascio verso l'atmosfera.

In Germania opera dal 2008 un sito per lo studio del funzionamento di centrali elettriche con separazione dei flussi di biossido di carbonio. L'impianto di Schwarze Pumpe, della Vattenfall AB, è la prima centrale di energia elettrica da 30 MW in cui è prevista la cattura di CO<sub>2</sub>. Si tratta di un impianto pilota per ap-

plicazioni future di taglia ben più grande (250-350 MW). L'impianto è alimentato a lignite e carbone. A oggi, 240 t di biossido di carbonio al giorno, separate dai gas di scarico e portate allo stato liquido, sono trasportate in cisterne a 350 km di distanza dall'impianto per essere iniettate in un giacimento di gas naturale esaurito.

Un altro importante progetto per la ricerca e lo sviluppo del CCS è il sito di Weyburn-Midale ([www.ptrc.ca/weyburn\\_overview.php](http://www.ptrc.ca/weyburn_overview.php)) in Canada. Si tratta di un giacimento petrolifero in fase di esaurimento in cui da 30 anni, per aumentare la produzione di petrolio, è stato iniettato biossido di carbonio nel suolo. Il sito è quindi molto importante per monitorare lo stato del sottosuolo e del sistema di stoccaggio.

Nel 2008 erano stoccate mediante CCS complessivamente meno di 0,1 GtC/anno, ma c'è grande fiducia nelle possibilità di sviluppo di questa tecnologia, soprattutto perché è compatibile con i tradizionali metodi di produzione dell'energia. Si presta quindi a essere utilizzata su impianti esistenti, in particolare su quelli a carbone, il combustibile fossile con riserve più abbondanti e distribuite, ma che genera le maggiori emissioni di biossido di carbonio. Il CCS è destinato quindi a giocare un ruolo importante nel panorama energetico dei prossimi anni.

## FACCIAMO I CONTI

### Emissioni - concentrazioni - assorbimenti

#### 1. Come passare da emissioni a concentrazioni in atmosfera

Molte stazioni meteo sparse per il mondo rilevano la concentrazione atmosferica di CO<sub>2</sub> e la sua misura è espressa in termini di concentrazione, cioè in ppmv (parti per milione in volume). Nel 2008 la concentrazione media di biossido di carbonio in atmosfera era pari a 386 ppmv, il che significa che in 1 milione di molecole di aria ci sono 386 molecole di CO<sub>2</sub>.

Poiché fare i conti in termini di molecole richiede numeri molto grandi, utilizzeremo come unità di misura la mole (unità di misura del Sistema Internazionale), una quantità di sostanza in grammi pari al peso atomico della sostanza stessa. Per esempio, una mole di CO<sub>2</sub> pesa 44 g, perché il peso atomico del carbonio (C) è 12 e quello dell'ossigeno (O), di cui la molecola contiene 2 atomi, è 16: quindi  $12 + 2 \cdot 16 = 44$ .

Una mole di qualsiasi sostanza contiene, com'è noto, sempre lo stesso numero di molecole. Questo numero, detto numero di Avogadro, è pari a  $6,022 \cdot 10^{23}$  (600.000 miliardi di miliardi!).

Il peso totale dell'atmosfera è pari a:  $5,14 \cdot 10^{21}$  g e il peso medio di una mole di aria atmosferica è pari a 28,96 g quindi il numero totale di moli presenti in atmosfera è pari a:

$$5,14 \cdot 10^{21} / 28,96 = 1,77 \cdot 10^{20} \text{ moli.}$$

A questo punto, possiamo calcolare l'aumento di concentrazione causato dalle emissioni annuali di carbonio generate dall'utilizzo di combustibili fossili, che nel 2007 sono state stimate pari a  $8,5 \cdot 10^9$  t carbonio equivalenti.

Dato che in ogni mole di biossido di carbonio sono presenti 12 g di carbonio, il numero totale di moli di CO<sub>2</sub> emesse è

$$8,5 \cdot 10^{15} \text{ g} / 12 \text{ g} = 7,08 \cdot 10^{14}$$

Poiché abbiamo calcolato che il numero totale di moli presenti in atmosfera è pari a  $1,77 \cdot 10^{20}$ , il numero di moli di biossido di carbonio (per ogni milione di moli d'aria) dovute alle emissioni provenienti dai combustibili fossili è pari a:

$$7,08 \cdot 10^{14} / (1,77 \cdot 10^{20}) \cdot 10^6 = 3,99 \text{ ppm}$$

Tuttavia non tutto quanto viene emesso si aggiunge a quanto è già presente in atmosfera e una parte dell'emissione è assorbita dai diversi comparti ambientali che entrano nel ciclo del carbonio.

## 2. Come assorbire tutte le emissioni?

Immaginiamo a questo punto di voler annullare l'effetto delle nostre emissioni piantando un certo numero di alberi a rapido accrescimento, come i pioppi, che catturano il biossido di carbonio nei processi di fotosintesi clorofilliana per la produzione di nuova biomassa. Quanti ne dovremmo piantare ogni anno?

Poiché l'accumulo di biomassa non è costante durante la vita di una pianta, il numero di pioppi necessario dipenderà anche dall'orizzonte temporale che scegliamo per compensare l'emissione: immaginiamo di voler fare tutto in un anno e quindi di dover piantare al 1 gennaio tutti i pioppi necessari ad assorbire le emissioni nel corso dello stesso anno.

La relazione che lega la biomassa  $B(t)$  di un albero alla sua età  $t$  è di tipo esponenziale e dice sostanzialmente che, nel tempo, la pianta non può che raggiungere una dimensione massima  $B_{\infty}$ . Di solito, si assume la relazione seguente

$$B(t) = B_{\infty} \cdot (1 - e^{-\alpha t})$$

dove il tempo  $t$  è misurato in anni e, per il pioppo euroamericano, si ha  $B_{\infty} = 1151$  kg di sostanza secca per albero e la costante che esprime la velocità di crescita è  $\alpha = 0,082$  anni<sup>-1</sup>.

Naturalmente, per altre specie, questi dati potrebbero essere abbastanza diversi. Per ogni grammo di sostanza secca prodotto attraverso la fotosintesi, un albero assorbe circa 1,83 g di CO<sub>2</sub>, cioè  $1,83 \cdot 12/44 = 0,5$  g di carbonio.

Per assorbire tutta l'emissione annua, occorre quindi una crescita di sostanza secca

$$8,5 \cdot 10^{15} / 0,5 = 17 \text{ Pg}$$

Poiché sappiamo dalla formula di crescita del pioppo quando  $t=1$  (cioè dopo un anno), che la biomassa accumulata è pari a

$$B(1) = 1151 \cdot (1 - e^{-0,082}) = 90,6 \text{ kg} = 90,6 \cdot 10^3 \text{ g}$$

il numero di pioppi da piantare sarebbe:

$$17 \cdot 10^{15} / (90,6 \cdot 10^3) = 187.600.000.000$$

Dato che, per colture a rapida crescita come questo pioppo, si adotta di solito la densità di 10.000 piante per ettaro, cioè una pianta ogni m<sup>2</sup>, si vede immediatamente che la compensazione delle nostre emissioni annue richiederebbe di piantare ogni anno una superficie pari a 7 volte quella della Sicilia, oltre metà dell'Italia.

**DOCUMENTIAMOCI*****Una scomoda verità (An Inconvenient Truth)***

Film documentario del 2006 sui cambiamenti climatici di cui è protagonista Al Gore, già vicepresidente degli Stati Uniti d'America e vincitore del Premio Nobel per la pace nel 2007 insieme all'IPCC.

**[air-climate.eionet.europa.eu/](http://air-climate.eionet.europa.eu/)**

Sito dell'European Topic Centre on Air and Climate Change dell'Agenzia per l'Ambiente Europea.

**[dataservice.eea.europa.eu/PivotApp/pivot.aspx?pivotid=455](http://dataservice.eea.europa.eu/PivotApp/pivot.aspx?pivotid=455)**

In questa pagina del sito della Agenzia per l'Ambiente Europea sono disponibili molti dati sulle emissioni di gas serra dei Paesi europei.

**[webtv.sede.enea.it/index.php?page=listafilmcat2&idfilm=3&idcat=3](http://webtv.sede.enea.it/index.php?page=listafilmcat2&idfilm=3&idcat=3)**

Un filmato sul sito dell'ENEA che presenta la stazione di rilevamento del biossido di carbonio di Lampedusa.

**[www.climate.unibe.ch/jcm/goto.html?fccattrib/fccattrib.html](http://www.climate.unibe.ch/jcm/goto.html?fccattrib/fccattrib.html)**

Sito del modello climatico globale Java Climate Model che può essere utilizzato on line o scaricato.

**[www.globalcarbonproject.org/carbontrends/index.htm](http://www.globalcarbonproject.org/carbontrends/index.htm)**

Sito del Global Carbon Project, il cui scopo è la stima dei flussi globali del ciclo del carbonio.

**[www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)**

Sito del Comitato Intergovernativo per lo studio dei Cambiamenti Climatici (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) da cui si può scaricare tutta la documentazione prodotta.

**[www.meteoam.it](http://www.meteoam.it)**

Sito del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare con analisi, articoli di approfondimento e dati sul clima - tra cui quelli del Centro Aeronautica Militare di Montagna (CAMM) di Monte Cimone (2165 m s.l.m.) che rileva dati di biossido di carbonio dal 1979.

**[www.noaa.gov/climate.html](http://www.noaa.gov/climate.html)**

Pagine relative al clima del sito della National Oceanic & Atmospheric Administration del ministero del Commercio degli Stati Uniti. È uno dei più importanti siti mondiali per la ricerca di dati e studi su tutto il pianeta ([www.mlo.noaa.gov](http://www.mlo.noaa.gov) è il sito dell'Osservatorio di Mauna Loa).



**[www.wri.org/chart/world-greenhouse-gas-emissions-flow-chart](http://www.wri.org/chart/world-greenhouse-gas-emissions-flow-chart)**

Dal sito della WRI (World Resources Institute), un interessante diagramma sulle emissioni e i flussi dei gas serra di origine antropica.

**[www.climalteranti.it](http://www.climalteranti.it)**

Ispirato al lavoro della Union of Concerned Scientists americana e del blog [www.realclimate.org](http://www.realclimate.org), Climalteranti rappresenta un'interessante piazza virtuale di formazione e discussione sul tema dei cambiamenti climatici e, in particolare, sull'analisi critica delle voci negazioniste.





## RISPARMIO ENERGETICO, USI FINALI E TRASPORTI

Il risparmio energetico, cioè la riduzione dell'utilizzo di energia primaria, si può perseguire attraverso l'aumento dell'efficienza energetica (cioè diminuire la quantità di energia necessaria per produrre lo stesso prodotto o servizio), oppure con la riduzione del consumo. Sono tre i momenti in cui si può intervenire sulla filiera energetica per ridurre sia il quantitativo di energia consumato sia l'impatto sull'ambiente:

- all'atto del prelievo (pozzi petroliferi, miniere, dighe ecc.);
- in fase di trasformazione dell'energia in forme utilizzabili a seconda della destinazione d'uso (le fonti primarie, come i combustibili e l'energia solare, vanno trasformate in elettricità o in combustibili raffinati, come l'idrogeno, per consentirne il trasporto all'utenza e l'utilizzo);
- al momento dell'utilizzazione (mezzi di trasporto, elettrodomestici, riscaldamento, processi industriali ecc.).

Anche il risparmio di materie prime può contribuire, in quanto per ottenerle serve comunque l'impiego di energia. Perciò anche il riciclo e la riduzione dei rifiuti e il riutilizzo di prodotti concorrono all'obiettivo del risparmio energetico.

### 1. Potenzialità del risparmio energetico

Secondo i dati del ministero dello Sviluppo Economico, il settore civile e quello dei trasporti contribuiscono in modo considerevole al consumo energetico nazionale: rispettivamente con il 30% e il 31% dei 146 miliardi tep (tonnellate di petrolio equivalente) consumate nel 2008. Analoghe cifre sono valide anche per gli altri Paesi industrializzati.

In particolare, il settore residenziale è considerato quello con il maggiore potenziale di riduzione dei consumi e di aumento dell'effi-

cienza. Intervenire sul settore dei trasporti è invece molto più complesso per la loro diffusione capillare e il continuo aumento dell'utilizzo di autoveicoli per trasporto di merci e passeggeri. Nel "Piano d'azione per l'efficienza energetica", la Commissione Europea ritiene che i più consistenti risparmi di energia possano essere realizzati nei seguenti settori: edifici residenziali e commerciali, con un potenziale di riduzione stimato rispettivamente al 27% e al 30%; industria manifatturiera, con possibilità di risparmio di circa il 25%; trasporti, con una riduzione del consumo stimata al 26%. Il "Piano d'azione per l'efficienza energetica" italiano, presentato a settembre 2007, descrive invece come l'Italia dovrebbe raggiungere l'obiettivo previsto dalla direttiva europea che corrisponde al 9,6% di risparmio energetico entro il 2016 (circa 11 Mtep).

Le spese per l'energia da usare in casa e nei trasporti influiscono notevolmente anche sul bilancio familiare: l'Istat valuta che le famiglie italiane rappresentino annualmente più del 30% dei consumi energetici totali. Sempre secondo l'Istat, una famiglia di 4 persone spende in media 2500 euro al mese: il 27,1% di questa somma è destinato a spese per la manutenzione delle abitazioni e per i consumi di combustibili ed energia (i consumi elettrici costituiscono meno di un quinto, il restante è dovuto ai consumi per il riscaldamento). Le famiglie sono anche responsabili di circa il 27% delle emissioni di gas a effetto serra in Italia: il 10% proviene dagli impianti di riscaldamento, il 9% dal trasporto privato e il 3% dai rifiuti solidi urbani. Non sono però comprese in queste cifre le emissioni dovute alla produzione di energia elettrica utilizzata nelle abitazioni.

## 2. Consumi finali

L'utilizzo dell'elettricità nelle case iniziò verso il 1880 con l'illuminazione. Negli anni '20 si diffuse ad alcuni apparecchi per la cucina e di lì a qualche anno radio e frigorifero furono i due elettrodomestici più comuni tra le famiglie. Dopo la guerra, dagli anni '50 in poi, si è assistito al definitivo ingresso nelle case di numerose apparecchiature elettriche. Nei Paesi industrializzati, la diffusione degli elettrodomestici e degli apparecchi audiovisivi e il basso costo dell'elettricità hanno fatto sì che oggi si trovino in tutte le famiglie, aumentando il comfort e consentendo un salto di qualità nelle consuetudini familiari. Basta pensare, per esempio, quanto la presenza di questi aiuti domestici abbia facilitato l'accesso al lavoro alle donne,



sgravandole di lunghi e faticosi lavori casalinghi. Possiamo citare un interessante brano da un'intervista radiofonica a Miriam Mafai:

“La vita delle donne cambia radicalmente [negli anni del miracolo economico]. All'epoca, nelle case non c'era il gas pertanto si cucinava con la stufa a legna. Il passaggio, poi, al gas in bombola ha rappresentato una delle grandi rivoluzioni di questo Paese, perché la casa ha cominciato a essere un po' più pulita visto che non si doveva più soffiare e sventolare. Non esistevano i frigoriferi, dunque la spesa si doveva fare tutte le mattine. Questo elettrodomestico ha segnato un passaggio di ceto, poiché, quando entrava nella casa degli italiani, era il primo segnale di uscita dalla miseria nera.”

Nonostante gli indubbi vantaggi, la diffusione delle apparecchiature elettriche ha contribuito in modo consistente alla bolletta energetica nazionale e, soprattutto, a quella familiare. Il consumo per elettrodomestici e illuminazione in Italia costituisce il 23% dei consumi elettrici nazionali. Una famiglia di quattro persone consuma a bimestre per l'elettricità circa 300 kWh, con una spesa intorno ai 100 euro. Tutti gli accorgimenti di risparmio dell'energia comportano, ovviamente, anche una riduzione della bolletta energetica domestica.

### 2.1 *Illuminazione*

Nel '900 i consumi domestici per illuminazione sono aumentati a una velocità impressionante: agli inizi nelle abitazioni si accendevano poche lampadine, il più delle volte una per stanza, e si aveva cura di spegnere la luce uscendo da un ambiente. Oggi invece montiamo anche 700-800 watt su un solo lampadario, senza nemmeno ottenere reali miglioramenti di illuminazione!

L'illuminazione incide a livello domestico per il 12% dei consumi circa. È anche una voce importante dei consumi nel settore del terziario: per esempio costituisce il 50% dei consumi totali di energia elettrica degli uffici, il 30% degli ospedali e delle scuole, il 15% delle fabbriche. Ridurre i consumi di energia per l'illuminazione può quindi portare un consistente contributo al risparmio.

Una buona illuminazione è creata non solo dalla presenza di lampade luminose, ma anche da una progettazione dello spazio che tenga conto della luminosità naturale. Per avere una buona illuminazione senza consumare troppa energia elettrica e quindi senza pagare bollette troppo salate, basta pensare a un'accurata distribuzione dei



punti luce nell'ambiente da illuminare, per esempio, evitando i lampadari centrali con tante lampadine (con le normali lampadine a incandescenza, una lampada da 100 watt fornisce la stessa illuminazione di 6 lampade da 25 watt, consumando però il 50% in meno) e preferendo più punti luce.

L'unità di misura della quantità di luce emessa da una lampada è il lumen [lm]. Il valore lumen/watt esprime l'efficienza luminosa di una lampada ed è il parametro basilare ai fini della scelta della sorgente luminosa più adatta per risparmiare energia. A titolo di esempio, una lampadina a incandescenza da 150 watt emette circa 2000 lumen, e cioè  $2000/150 = 13$  lumen per ogni watt assorbito.

Le comuni lampadine a incandescenza funzionano sul principio dell'irraggiamento di fotoni generato dal surriscaldamento di un elemento in metallo; sono poco costose, ma hanno una durata di vita abbastanza breve (circa mille ore). Sono costituite da un bulbo in vetro nel quale è alloggiato un filamento di tungsteno che, attraversato dalla corrente elettrica, diventa incandescente emettendo luce. Dalla sua invenzione a metà del 1800 fino al 1913 sono state apportate piccole innovazioni che hanno consentito di aumentare il rendimento dall'iniziale 0,15% all'1,8% (si è passati dal filamento in carbonio a quello in tungsteno e al riempimento della lampada con gas particolari). In sostanza, quindi, usiamo ancora oggi una tecnologia messa a punto circa quattro generazioni fa.

La lampada a scarica elettrica in gas, nota come lampada ad alta efficienza, funziona invece secondo il principio per cui se tra due elettrodi immersi in un gas o in vapori metallici viene applicata una differenza di potenziale, si genera una scarica a cui è associata l'emissione di radiazione ultravioletta. Le lampade fluorescenti compatte hanno un'efficienza luminosa che varia da 40 a 60 lumen/watt e quindi consentono di ridurre di circa il 70% i consumi d'energia elettrica rispetto alle lampade a incandescenza di equivalente flusso luminoso. Una lampada ad alta efficienza da 20 W fornisce la stessa quantità di luce di una a incandescenza da 100 W. Inoltre, queste lampade hanno una vita media che può arrivare a 10-12.000 ore. A fronte di un costo iniziale maggiore (costano circa 10-20 volte quelle a incandescenza), permettono risparmi sia per la durata 10 volte maggiore, sia per il minore consumo di energia.

Secondo il "Piano d'azione per l'efficienza energetica" italiano la sostituzione delle lampade a incandescenza con le lampade a fluorescenza permetterà nel 2010 la riduzione di 4125 GWh e di 12.590



GWh nel 2016, corrispondenti a una riduzione dell'1,2% e del 3,6% di tutti i consumi di energia elettrica in Italia.

### 2.2 Elettrodomestici e apparecchiature elettroniche

Televisore, lettore dvd, radio e stereo, console per i videogiochi, telefono cordless, ma anche forno, frigorifero, congelatore, lavastoviglie, lavatrice, aspirapolvere, ferro da stiro, asciugacapelli, rasoio elettrico e carica batterie: sono i tipici elettrodomestici che più o meno tutti possediamo e a cui non siamo disposti a rinunciare per ridurre i consumi. La maggior parte di questi elettrodomestici può però essere utilizzata in modo più efficiente. Inoltre, quando li acquistiamo possiamo scegliere un prodotto rispetto a un altro anche sulla base dei consumi energetici.

A partire dal 1998, infatti, gli elettrodomestici principali devono essere accompagnati da un'etichetta energetica che quantifica i consumi. L'informazione più importante è relativa all'efficienza energetica: sull'etichetta (Figura 1) sono presenti sette frecce di lunghezza crescente e proporzionale ai consumi associate alle let-

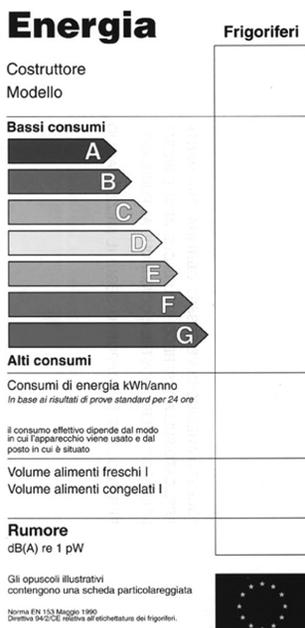


Figura 1. Schema dell'etichettatura energetica per gli elettrodomestici.



tere dalla A (più efficiente) alla G (meno efficiente). Queste frecce permettono il confronto di modelli differenti di ogni elettrodomestico. Per esempio, per i frigoriferi, i consumi nella classe A sono indicati inferiori 344 kWh/anno, nella classe B compresi tra 344 e 468 kWh/anno e così via crescendo fino alla classe G i cui consumi sono superiori a 781 kWh/anno. Chiaramente, l'acquisto di un frigorifero efficiente richiede un investimento superiore rispetto all'acquisto di uno di classe G. Possiamo stimare questo costo aggiuntivo in circa 150-250 euro, che però rientra rapidamente visto che il risparmio sulla bolletta di un frigorifero a classe A rispetto ad altri a minore efficienza va da 50 a 70 euro l'anno. Per aiutare le famiglie a scegliere elettrodomestici più efficienti, in Italia esistono agevolazioni all'acquisto di prodotti ad alta efficienza.

Il limite dell'etichetta energetica è che dovrebbe tenere conto delle innovazioni del settore e alzare, con il passare del tempo, lo standard per rientrare nella classe più efficiente, altrimenti, si rischia che le case produttrici una volta arrivate all'efficienza di classe A non siano più stimolate a cercare soluzioni migliori. Oggi i frigoriferi a maggiore efficienza, infatti, non sono etichettati con una classe A, bensì con A+ (188-263 kWh/anno) o A++ (meno di 188 kWh/anno).

Avere un elettrodomestico a elevata efficienza non è il solo requisito per ottenere un risparmio energetico, poiché gran parte dei consumi dipende da come si utilizza l'elettrodomestico. Per ridurre il consumo di energia, esiste tutta una serie di accorgimenti che riguardano l'utilizzo: per esempio, per i frigoriferi è meglio non inserire mai cibi o bevande calde e tenere aperto lo sportello il più brevemente possibile. Per una guida completa su questi accorgimenti suggeriamo il sito sviluppato dall'ENEA: <http://efficienzaenergetica.acs.enea.it>.

Una particolare tipologia di elettrodomestico a bassa efficienza energetica è quella in cui l'elettricità passa attraverso una resistenza per produrre calore: stufe e caldaie elettriche, i tostapane, forni e grill elettrici, macchine per il caffè, asciugatrice (una vera e propria macchina energivora, molto diffusa negli Stati Uniti e, fortunatamente, poco usata in Italia). Stufe e boiler elettrici sono notevolmente diminuiti in Italia, grazie alla diffusione della rete del gas naturale, mentre sono invece ancora diffusi nei Paesi freddi in cui l'energia elettrica costa poco (Canada e Norvegia, per esempio). Le altre apparecchiature citate sono invece molto diffuse nelle case. Il tostapane, per esempio, ha una potenza che varia tra 750 e 1000 W, ma per fortuna si usa solo pochi minuti al giorno.



Ci sono poi tutte le apparecchiature elettroniche, come radio, forni a microonde, computer, televisori, lettori dvd e simili, che sono capillarmente diffuse non solo nei Paesi industrializzati, ma sempre più anche nei Paesi emergenti. Il fabbisogno energetico di queste apparecchiature è abbastanza basso, il problema è che sono molto diffuse, tanto che complessivamente incidono notevolmente sui consumi elettrici domestici. Un televisore a schermo piatto ha una potenza di circa 100 W, il monitor di un computer di 150 W, l'unità centrale di un personal computer di circa 100 W, un portatile di circa 50 W. Se scrivessimo e mandassimo e-mail per 12 ore consecutive consumeremmo l'equivalente di un'asciugatrice in 10 minuti.

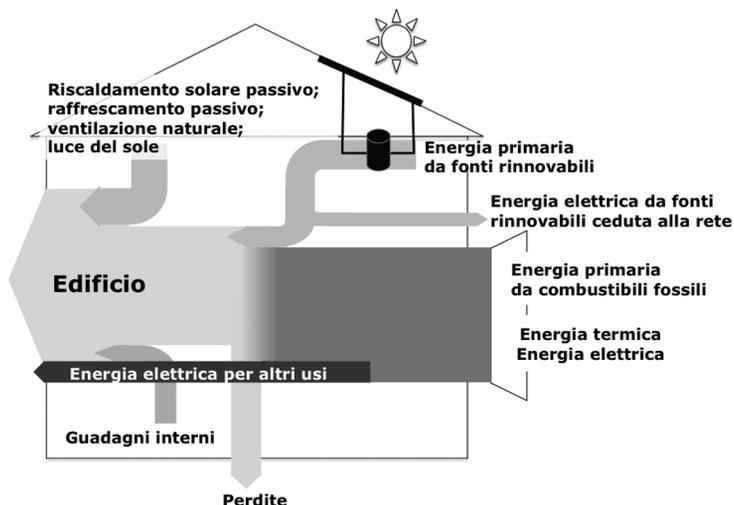
Tutte queste apparecchiature, spesso lasciate accese in stand-by, consumano energia anche quando non sono utilizzate. Non possono, infatti, essere spente senza essere completamente scollegate. Su tutta l'Unione Europea, si stima che le perdite di energia dovute agli apparecchi lasciati in stand-by siano pari a circa il 10% dei consumi di energia elettrica nelle case e negli uffici. Tanto per avere un'idea, l'ENEA ha calcolato che con un consumo medio 130 kWh l'anno un televisore ne consuma 105 stando in stand-by: non molti di meno! Una famiglia media, secondo i parametri forniti dall'Enel, scollegando tutti i dispositivi audio/video può arrivare a un risparmio di 100 euro l'anno.

Sempre il "Piano d'azione per l'efficienza energetica" italiano stima che con la sostituzione degli elettrodomestici con apparecchi efficienti si potrà ottenere un risparmio di 11.600 GWh nel 2010 e di 38.300 GWh nel 2016, corrispondenti al 3,3% e al 10,8% dei consumi di energia elettrica nel 2007. Se poi si considerano anche gli interventi per l'aumento dell'efficienza di impianti di riscaldamento e di condizionamento nel settore terziario, le riduzioni previste dei consumi di energia elettrica salgono al 5% per il 2010 e al 16% per il 2016.

### 3. La certificazione energetica degli edifici

Il bilancio energetico di una casa può essere calcolato seguendo le indicazioni relativamente semplici riportate in Figura 2. Prima di tutto, in casa l'energia è necessaria per soddisfare la domanda di riscaldamento e acqua calda, illuminazione, condizionamento, cucina e così via. Alcuni di questi usi possono essere soddisfatti da input energetici naturali dall'esterno (per esempio, si pensi





**Figura 2.** Schema dei flussi di energia e di anidride carbonica per il calcolo del bilancio energetico di un'abitazione.

al calore ricevuto grazie all'esposizione al sole, solare passivo, o alla ventilazione naturale) e dall'interno (per esempio, il calore fornito dalle apparecchiature elettroniche accese, dall'illuminazione e dal gas usato per cucinare). L'utilizzo netto di energia della casa è quindi dato dalla differenza tra la domanda di energia e l'energia ottenuta gratuitamente. L'ulteriore energia necessaria è fornita tramite fonti che possono essere tradizionali (gasolio e gas naturale) o rinnovabili (pannelli solari o fotovoltaici, biomasse, geotermico).

Si capisce quindi che il bilancio energetico di un'abitazione o di un edificio non dipende solamente dal consumo di energia e dalla fonte primaria utilizzata, ma anche dalla progettazione della casa stessa: dalla scelta dei materiali alla ventilazione, all'esposizione.

Per distinguere le case a bassa e a elevata efficienza, l'idea dell'etichetta energetica degli elettrodomestici è stata replicata per gli edifici: si parla in questo caso di certificazione ambientale degli edifici, che, come suggerisce il nome stesso, valuta tutti gli aspetti ambientali (fasi di costruzione, materie prime, comfort interno, produzione di rifiuti, impatto visivo) e non solo quelli energetici, anche se questa componente contribuisce in modo decisivo alla valutazione finale dell'edificio. Tuttavia, un'attenta progettazione, un buon utilizzo dei materiali così come un buon isolamento termico e il corretto



orientamento dell'edificio, contribuiscono in maniera sensibile a migliorare l'efficienza energetica delle case e consentono un risparmio nel consumo di energia che si traduce in un risparmio delle spese di riscaldamento e in un minore impatto sull'ambiente.

Come funziona il processo di certificazione di un edificio? Per prima cosa, si determina la prestazione energetica dell'edificio o dell'unità immobiliare, mediante l'applicazione di una definita metodologia da parte di un tecnico qualificato (accreditato nell'ambito di un sistema regionale di accreditamento). Successivamente si confronta tale prestazione con i valori limite stabiliti dalla normativa vigente. Infine viene rilasciato un attestato di certificazione energetica che riporta le informazioni relative alla prestazione energetica corrente dell'edificio espresse:

- in valore assoluto, con l'indicazione di un indice espresso in kWh/anno/m<sup>2</sup>, informazione che si collega facilmente al costo dei consumi energetici (euro/kWh/anno/m<sup>2</sup>);
- come classe di prestazione rispetto a un sistema di classificazione prestabilito, per capire il consumo reale dell'edificio grazie al confronto con le prestazioni energetiche di edifici analoghi;
- come differenziale rispetto al livello minimo previsto dalla normativa vigente per un edificio analogo.



I termini di confronto dipendono dalle condizioni climatiche dell'area: un edificio collocato in montagna avrà naturalmente una domanda energetica superiore a uno in pianura. Per distinguere questi casi si utilizzano i gradi-giorno (indicati con l'abbreviazione GG). Il parametro GG equivale alla somma (riferita al periodo di riscaldamento) delle differenze giornaliere tra la temperatura media esterna giornaliera e la temperatura ambiente di 20 °C: più alto è il valore dei gradi-giorno più il clima è rigido. Il fabbisogno energetico di un edificio dipende anche dal rapporto tra superficie e volume: una casa mono o bifamiliare (alto rapporto superficie/volume) avrà un indice di prestazione superiore a un condominio (basso rapporto superficie/volume). Per esempio, in Emilia-Romagna il massimo prescritto per il fabbisogno energetico è pari 82 kWh/m<sup>2</sup>/anno per una villa con rapporto superficie/volume pari a 0,7, mentre è più basso (39 kWh/m<sup>2</sup>/anno) per un condominio con rapporto superficie/volume pari a 0,2.

Una normativa nazionale in materia, purtroppo, non esiste ancora, perché si è in attesa che siano emanate le linee guida per la certifica-



zione energetica degli edifici in attuazione dei Decreti Legislativi 192/2005 e 311/2006. Emilia-Romagna, Lombardia, Liguria e Provincia Autonoma di Bolzano sono alcune delle amministrazioni che si sono mosse autonomamente nel settore. Secondo il titolo V della Costituzione Italiana, infatti, l'energia è materia concorrente tra Stato e Regioni.

Nella Provincia di Bolzano gli edifici sono classificati, secondo la convenzione di CasaClima, in diverse fasce di consumo in base al fabbisogno energetico: classe Oro o classe A per consumi più bassi, quando l'indice di prestazione energetica è inferiore ai 30 kWh/m<sup>2</sup>/anno; classe B, con indice compreso tra 30 e 50 kWh/m<sup>2</sup>/anno; classe C, con indice tra 50 e 70 kWh/m<sup>2</sup>/anno; e così avanti per edifici con alti consumi. Gli edifici che rientrano nella categoria A hanno diritto a sconti sugli oneri di urbanizzazione e ad altri benefici previsti dai regolamenti provinciali e comunali. CasaClima premia anche con un "più" le case costruite con materiali ecologici e che utilizzano fonti energetiche rinnovabili. La Provincia di Bolzano è stata la prima in Italia a proporre un simile progetto: nel 2004 ha stabilito che tutte le nuove costruzioni realizzate in provincia dal 12/01/2005 devono rispettare come minimo la classe energetica C. A oggi molti comuni nei propri piani di governo del territorio richiedono la classe B, più restrittiva quindi della classe C.

Gli standard energetici da rispettare per la certificazione variano a seconda della regione e della sua normativa specifica. In genere comunque si prevedono standard più restrittivi per gli edifici di nuova costruzione e per gli interventi di ristrutturazioni edilizie significative. Sono invece previste applicazioni limitate al rispetto di specifici parametri e livelli prestazionali nel caso di ristrutturazioni parziali, manutenzione straordinaria dell'involucro edilizio, del recupero di sottotetti, di nuova installazione o ristrutturazione di impianti termici.

Per il patrimonio edilizio esistente che disperde molto calore, si può ricorrere al "cappotto", una tecnica di coibentazione che consiste nell'applicare alle pareti dei pannelli isolanti successivamente ricoperti da malte adesive. Il miglioramento della coibentazione delle coperture si può prevedere (e talora è reso obbligatorio dalle norme) solo quando s'interviene con un'opera di riqualificazione, in modo che il maggior costo del materiale isolante sia marginale rispetto al costo complessivo dei lavori.

Le abitazioni in Italia consumano in media 150 kWh/m<sup>2</sup> per il riscaldamento e 25 kWh per l'acqua in un anno. Secondo i calcoli

svolti dalla società Vi.energia (dell'Amministrazione Provinciale di Vicenza), per portare l'efficienza di un'abitazione da 45 a 18 kWh è sufficiente aumentare da 5 a 12 cm lo spessore di isolante termico di pareti e copertura, diminuire la dispersione termica dei serramenti, eliminare i ponti termici (piccoli spazi che lasciano passare aria e calore). I risparmi conseguibili arrivano fino al 70% e l'investimento iniziale viene recuperato in tempi brevi: per un appartamento di 90 metri quadri bisognerebbe spendere 2200 euro circa e, poiché il risparmio in bolletta sarebbe di circa 300 euro l'anno, il recupero avverrebbe in soli 7 anni.

Nella struttura dell'edificio un ruolo chiave è giocato dall'involucro. migliorandone le prestazioni energetiche si riesce a diminuire considerevolmente la quantità di energia necessaria per la climatizzazione estiva e invernale. Il primo passo consiste nel limitare le dispersioni termiche attraverso un incremento della resistenza termica al passaggio del calore attraverso le strutture opache (pareti esterne, basamenti e coperture) e trasparenti (serramenti). Anche la realizzazione di tetti verdi aiuta a migliorare l'efficienza: i tetti verdi sono coperture piane o leggermente inclinate composte da uno strato consistente (almeno 10-15 cm) di terra e di erba, da collocare ovviamente sopra la tradizionale stratificazione. Questa soluzione consente uno sfasamento dell'onda termica estiva e un controllo dell'umidità interna, garantendo un microclima ideale agli ambienti sottostanti (di circa 2-3 °C inferiori alla temperatura esterna). Anche la ventilazione naturale all'interno degli ambienti favorisce la creazione di un microclima confortevole.

L'utilizzo attento dell'illuminazione naturale consente di avere ambienti accoglienti e luminosi utilizzando meno energia elettrica. I progettisti suggeriscono, per esempio, di sfruttare l'orientamento a sud per i locali principali, mentre all'interno si possono usare accorgimenti architettonici, come condotti di luce e oggetti riflettenti, per favorire il trasporto e la diffusione della luce.

Gli altri interventi che migliorano le prestazioni energetiche degli edifici riguardano il miglioramento dell'efficienza degli impianti termici, della distribuzione e della regolazione del calore.

Un altro modo per aumentare l'indice di prestazione energetica è quello di prevedere l'utilizzo di fonti rinnovabili di energia locali. Per esempio, l'edificio può essere dotato di impianti solari termici, di caldaie alimentate a biomasse o di un impianto geotermico per la fornitura di acqua calda e/o riscaldamento. Allo stesso modo può es-



sere dotato di impianti fotovoltaici per la produzione di energia elettrica.

L'innovazione tecnologica e lo studio di nuovi materiali permetterà di sfruttare sempre di più l'energia del Sole: per esempio, le finestre saranno presto in grado di generare energia elettrica mediante una particolare sostanza a colorante sensibilizzato (cioè in grado di assorbire la luce) tenuta tra due lastre di vetro. Questo tipo di finestre è in produzione limitata, ma è già disponibile anche sul mercato italiano.

#### 4. Uso del suolo e urbanizzazione

Una gestione consapevole dell'utilizzo del suolo e dell'attività edilizia può contribuire in modo concreto alla riduzione sia della dipendenza energetica, sia degli impatti sull'ambiente.

La costruzione di nuovi edifici su un terreno agricolo, a pascolo o a bosco è un'azione sostanzialmente irreversibile: si perde una porzione di suolo naturale e, soprattutto, si perdono tutte quelle funzioni che quel suolo aveva. Le aree naturali e agricole svolgono importanti servizi per la società: per esempio, regolano il deflusso delle piogge e il ricarica della falda acquifera, contribuiscono alla depurazione delle acque, del suolo o dell'aria, ospitano specie animali e vegetali molto importanti per l'uomo, dalle api che provvedono all'impollinazione della vegetazione a tutte le piante utilizzate per la produzione dei medicinali.

L'accelerazione dell'urbanizzazione di questi ultimi anni è un fatto tangibile e innegabile, ben impresso nella mente di ogni osservatore. Da uno studio del 2009 sulla Lombardia emerge che nel periodo 1999-2004 il territorio urbanizzato è cresciuto di 13 ettari ogni giorno: è come se ogni anno fosse stata costruita una nuova città grande quanto Brescia (5000 ettari). È chiaro che il suolo è una risorsa limitata e che, andando avanti di questo passo, prima o poi il paesaggio italiano rischia di scomparire per trasformarsi in territorio urbano.

Oltre alla costruzione di edifici, l'urbanizzazione porta con sé tutte le infrastrutture necessarie: strade, allacciamenti a elettricità, acqua e gas, condotte per la raccolta delle acque nere e così via. Spesso questa urbanizzazione non è guidata da una vera e propria necessità di nuovi spazi abitativi o di uffici, tanto meno dagli anni '80, quando molte grandi industrie hanno iniziato a chiudere i propri stabilimenti in Italia per aprirli all'estero. Piuttosto, è l'incredibile



valore di mercato che un'area urbanizzata (paradossalmente anche se non utilizzata) ha oggi in Italia a guidare le scelte di costruire senza particolare attenzione a un uso razionalmente programmato del territorio.

Si prenda per esempio la città di Milano, dove gli appartamenti hanno raggiunto valori elevatissimi per metro quadro (e anche nel 2009, anno di crisi economica, hanno mantenuto tale valore sostanzialmente inalterato). I prezzi elevati hanno fatto sì che molte persone cercassero casa fuori Milano e allo stesso tempo il valore elevato di appartamenti e uffici ha indotto i proprietari a mantenere come investimento la proprietà anche senza utilizzarla. Lo stesso vale per le aree dismesse, dove sorgevano fabbriche che hanno chiuso o si sono spostate in altre parti del mondo. In alcuni casi queste aree sono state convertite ad altri utilizzi – per esempio, sempre a Milano, i poli universitari del Politecnico alla Bovisa o dell'Università Statale alla Bicocca, ma in molti altri casi sono stati costruiti nuovi appartamenti e uffici di elevato valore che faticano a trovare un utilizzatore.

La crescita dell'urbanizzazione diffusa ha impatti maggiori perché servono maggiori sforzi per portare tutte le infrastrutture a utenze distribuite piuttosto che a utenze concentrate, come in città; in particolare, servono più strade a collegare un'urbanizzazione diffusa. Le conseguenze di questo tipo di insediamenti (che nella letteratura anglosassone sono detti *urban sprawl*, agglomerati urbani) si fanno sentire nel tempo, perché diventa più difficile organizzare una rete di trasporto pubblico per collegare le zone residenziali ai luoghi di studio e lavoro e, di conseguenza, viene incentivato l'utilizzo dell'automobile con i conseguenti impatti (congestione, rumore, inquinamento).

## 5. Trasporti e mobilità

Il settore dei trasporti provoca, a livello globale, una frazione molto significativa sia delle emissioni di gas serra in atmosfera (il 25%), sia dei consumi di energia (il consumo di petrolio aumenta del 2% ogni anno a causa dell'utilizzo in questo settore). Il consumo di energia dagli anni '70 a oggi è raddoppiato e si prevede continui ad aumentare anche nei prossimi anni.

Nel corso dei passati decenni il contributo dei Paesi non industrializzati è cresciuto considerevolmente e si prevede che i consumi di Paesi come Cina e India continueranno a espandersi. In Italia (uno



dei Paesi con il più elevato tasso di motorizzazione) ci sono quasi 600 automobili ogni 1000 persone, in Cina 6,7. Tuttavia, mentre in Italia ormai ogni famiglia ha almeno un'auto e siamo di fronte a un mercato stazionario, in Cina la crescita economica e il conseguente aumento del benessere permetteranno a molte più persone di possedere un'automobile. Con una popolazione cinese di circa 1,34 miliardi di persone, l'impatto di un aumento del tasso di motorizzazione è evidente: solo per raggiungere un decimo del tasso di motorizzazione italiano, la Cina dovrebbe mettere in circolazione oltre 70 milioni di nuovi veicoli! Un ragionamento analogo si può fare per l'India o per altri Paesi in via di sviluppo.

Nel 2007 si stima che tutte le attività di trasporto passeggeri nell'Unione Europea con qualsiasi mezzo di trasporto siano ammontate a 6473 miliardi di passeggeri/chilometro che equivalgono a circa 13.092 km per persona. Questa cifra include il trasporto aereo e via mare interno all'UE, ma non quello tra Paesi UE e il resto del mondo. Il trasporto di passeggeri su auto contribuisce per il 72,4% del totale, su moto per il 2,4%, su autobus per l'8,3%, sui treni per il 6,1%; tram, autobus e metropolitane contribuiscono per l'1,3%. Il trasporto aereo e quello marittimo interno all'UE hanno contribuito rispettivamente per l'8,8% e lo 0,6%. Come ben sappiamo, anche il trasporto di merci è molto importante. Nel 2007 nell'UE ammontava a circa 4228 miliardi di tonnellate/chilometro. Il trasporto su strada contribuisce a questa cifra per quasi la metà (45,6%), quello su rotaia per il 10,7%, su vie d'acqua per il 3,3% e infine gli oleodotti per il 3%. Il trasporto via mare è il secondo per importanza con il 37,3%, mentre il trasporto aereo interno all'UE contribuisce solo per lo 0,1% del totale.

Emerge quindi che il trasporto di persone avviene principalmente con le automobili e quello delle merci con camion e tir. D'altra parte, è stata proprio la flessibilità degli autoveicoli, che possono essere usati per andare in tutti i luoghi collegati da strade quando si vuole e a costi contenuti, a determinarne il successo. Queste caratteristiche complicano e limitano i possibili interventi per la riduzione dei consumi e il contenimento delle emissioni. Una centrale a carbone, per quanto la fonte fossile sia originariamente sporca e inquinante, può essere dotata di potenti filtri per abbattere le emissioni e può addirittura avere un sistema di cattura e stoccaggio del carbonio nel sottosuolo che azzeri o quasi le emissioni di gas a effetto serra (si veda la scheda "Diamoci da fare" del capitolo "Ener-



gia, effetto serra e cambiamenti climatici”). Questi interventi sono possibili perché le economie di scala della centrale consentono grossi investimenti che sono recuperati tramite la diminuzione dei costi di gestione, evitando la tassa sul carbonio emesso. Tutto questo non è applicabile alle modeste, ma innumerevoli, sorgenti di emissione quali sono i tubi di scappamento.

In che modo è quindi possibile intervenire per ridurre i consumi e le emissioni nel settore dei trasporti? Per prima cosa si può intervenire sul mezzo di trasporto stesso o sul combustibile che lo alimenta. L'altro possibile intervento è sul sistema dei trasporti, con la promozione dell'utilizzo di mezzi più efficienti e con minori emissioni. Chiaramente il successo di questi interventi dipenderà sia dalle scelte e dalle abitudini personali, sia delle politiche d'incentivazione promosse dalle amministrazioni. Probabilmente, per ottenere risultati significativi, dovremo perseguire tutte queste vie.

### *5.1 Interventi sui combustibili*

Una delle rivoluzioni attese nel mondo dei trasporti è quella che riguarda l'utilizzo di auto a idrogeno. Come abbiamo anticipato nel capitolo “Le tecnologie per la produzione di energia”, l'idrogeno è un modo per accumulare energia in una forma che può essere utilizzata nel momento in cui serve. Per questo motivo si pensa che abbia le caratteristiche per sostituire il petrolio come combustibile. Restano però numerosi problemi, primo tra tutti il fatto che l'idrogeno non si trova in natura, ma deve essere prodotto, tramite idrolisi o tramite la gassificazione industriale del carbone, utilizzando possibilmente l'energia elettrica fornita dagli impianti solari o eolici.

Tutti questi sono però scenari futuribili. Prima di tutto è necessario risolvere altri importanti problemi: il parco macchine dovrebbe cambiare completamente e la rete di distribuzione del combustibile dovrebbe essere rifatta. L'idrogeno può essere bruciato in motori a combustione interna (già utilizzati su alcuni prototipi di auto), ma in realtà l'applicazione più promettente è quella delle pile a combustibile che permettono di ottenere elettricità dall'ossidazione dell'idrogeno senza passare dalla combustione diretta. Inoltre, l'idrogeno ha una bassa densità, quindi è necessario un serbatoio abbastanza capiente per immagazzinarlo, anche impiegando energia addizionale per comprimerlo, cosa che comporta problemi di sicurezza per l'alta pressione del gas. A tutto questo si aggiunge la pericolosità dell'i-

drogeno che è un gas altamente infiammabile: la sicurezza del suo utilizzo è chiaramente una priorità, dato che andrebbe utilizzato in contesti di elevata densità abitativa. La storia ci insegna che proprio il furioso incendio che nel 1937 distrusse in un solo minuto il dirigibile Hindenburg (il più grande aeromobile mai costruito, riempito con oltre 200.000 m<sup>3</sup> di idrogeno) decretò la fine di questo mezzo di trasporto.

In attesa della rivoluzione dell'idrogeno, si stanno diffondendo le auto elettriche, che utilizzano l'energia chimica immagazzinata in un serbatoio costituito da batterie ricaricabili tramite energia elettrica. I veicoli elettrici più diffusi sono automobili, piccoli autocarri, biciclette motorizzate, scooter elettrici, veicoli per campi da golf o altri piccoli veicoli, perché di solito gli accumulatori sono poco adatti per applicazioni che necessitano di lunga autonomia o di grandi potenze e capacità di carico. La sfida maggiore nella progettazione di veicoli elettrici è costituita appunto dalle batterie che dovrebbero aumentare l'autonomia, mantenendo un tempo di ricarica accettabile e un costo auspicabilmente contenuto. Per avere qualche ordine di grandezza, si sta progettando un'auto elettrica (da lanciare nel mercato nel 2010) la cui autonomia sarà di 160 km e che potrà raggiungere i 140 km/h. Case automobilistiche di vari Paesi hanno recentemente presentato anche prototipi di auto alimentate da batterie agli ioni di litio in grado di percorrere più di 200 km a 80 km/h e raggiungere una velocità massima di 130 km/h.

La batteria è anche la parte che maggiormente incide sul prezzo delle vetture elettriche; la ricerca e la sperimentazione sono orientate verso batterie agli ioni di litio che dispongono maggiore capacità di carica a parità di dimensioni. Le batterie all'avanguardia durano circa 10 anni, ma dopo i primi 5 anni perdono un 20% della capacità. A differenza dell'idrogeno le infrastrutture necessarie per la distribuzione agli utenti sono perfettamente sperimentate e sicure in quanto costituite dalla rete elettrica.

Ci sono poi i veicoli ibridi, così chiamati perché affiancano un motore elettrico a quello convenzionale a combustione interna. Questi veicoli permettono di ridurre in modo significativo (20-40%) consumi ed emissioni grazie al recupero dell'energia in frenata (frenata rigenerativa), che fa lavorare il motore elettrico come generatore, e all'uso ottimizzato dei due propulsori: nel sistema ibrido, infatti, il motore a combustione interna può lavorare quasi sempre in condi-

zioni di massimo rendimento, mentre in un veicolo convenzionale è costretto a seguire le richieste di potenza del guidatore, operando anche in condizioni in cui il rendimento è particolarmente basso. Alcuni modelli di questo tipo hanno ottenuto un rapido successo commerciale.

Un'altra tipologia di combustibile alternativo, oltre a energia elettrica e idrogeno, è costituita dai combustibili sintetici e dai biocombustibili. Questi hanno il grosso vantaggio di essere compatibili con il sistema di distribuzione e con i motori esistenti.

I combustibili sintetici sono prodotti attraverso processi chimici a partire da carbone o dalle frazioni più pesanti del petrolio o dalle sabbie bituminose. E questo è il loro secondo grande vantaggio: è possibile usare una fonte poco costosa e largamente disponibile come il carbone per produrre un equivalente dei prodotti petroliferi. Lavorare questi materiali per ricavarne combustibili liquidi analoghi a quelli ottenibili dal petrolio richiede tuttavia grandi quantità di energia. Quindi, i processi utilizzati emettono grandi quantità di anidride carbonica in atmosfera. Le tecnologie più avanzate, ma ancora in fase di studio, prevedono di poter utilizzare insieme carbone e biomasse lignocellulosiche per produrre in modo combinato combustibili sintetici ed energia elettrica. Grazie al processo di gassificazione si separano anidride carbonica e idrogeno contenuti nelle materie in ingresso; è quindi possibile, grazie a un catalizzatore, utilizzare l'idrogeno per produrre i combustibili sintetici e destinare l'anidride carbonica allo stoccaggio in depositi acquiferi profondi. In questo modo, i combustibili ottenuti sono a emissioni zero di gas serra.

Biocombustibili liquidi, come l'etanolo o il biodiesel, sono già ampiamente in commercio: in Brasile l'etanolo ottenuto dalla canna da zucchero costituisce circa il 40% dei combustibili usati per il trasporto; negli Stati Uniti circa il 20% delle coltivazioni di mais sono utilizzate per produrre etanolo. In generale, l'etanolo è miscelato insieme alla benzina normale in una frazione pari al 10%, ma al bilancio energetico ed emissivo globale di questi biocarburanti bisogna aggiungere anche i fertilizzanti, l'acqua, il gasolio per i macchinari agricoli e l'energia usata per ottenerli. Vale a dire che, se si considera l'intero ciclo produttivo, l'energia ottenuta dall'etanolo da mais è di poco superiore a quella utilizzata per produrlo; il bilancio è più favorevole nel caso dell'etanolo da canna da zucchero e del biodiesel da colza o girasole. Ci sono molte aspettative legate all'etanolo

cellulosico che può essere ottenuto anche a partire da residui e scarti dell'agricoltura e promette di avere efficienze più elevate. Tuttavia questo non è ancora un processo commerciale.

È probabile che negli anni a venire il contributo dei biocombustibili liquidi aumenti, ma resti comunque un contributo marginale rispetto ad altri combustibili. Ci sono infatti notevoli incertezze che riguardano gli impatti ambientali di conversioni su larga scala di suoli alla coltivazione di colture energetiche (canna da zucchero, mais, colza, jatropha e simili). Gli aspetti negativi sono legati alla sottrazione di suolo agricolo alle colture alimentari e all'incremento della deforestazione, fenomeni purtroppo già in atto in numerosi Paesi in via di sviluppo: per esempio, per fare spazio alle piantagioni di jatropha (una pianta oleaginosa da cui si ottiene biodiesel) che si sono diffuse molto rapidamente nei Paesi asiatici.

Sono commercializzate anche vetture alimentate a gas naturale, di cui iniziano a essere frequenti anche in Italia i distributori. Il gas naturale offre il vantaggio di produrre emissioni di gas serra e di altri inquinanti inferiori a quelle del petrolio, ma chiaramente non risolve il problema della dipendenza dai combustibili fossili.

### *5.2 Interventi sui mezzi di trasporto*

Oltre all'adozione di nuovi sistemi di propulsione, un modo per diminuire i consumi energetici soprattutto delle automobili è quello di costruire veicoli con efficienza superiore. Questo aumento di efficienza può essere raggiunto apportando miglioramenti al motore e alla trasmissione, diminuendo il peso della vettura e perfezionando gli pneumatici. Tutti questi miglioramenti sono avvenuti anche negli anni passati, ma sono state prodotte vetture sempre più grandi, più pesanti e più veloci: di fatto abbiamo scambiato l'aumento in efficienza con l'aumento delle prestazioni. Questo è vero un po' per tutti i Paesi industrializzati ed è esasperato nel caso degli Stati Uniti: il peso medio di una vettura è aumentato dalle 0,8 t del 1970 a 1,2 t nel 2003 in Europa, mentre negli Stati Uniti si attesta su 1,8 t.

Un modo efficace per ridurre l'utilizzo di combustibili e le emissioni di gas serra è spostare parte del trasporto merci dalle strade alla ferrovia. In Europa il trasporto su strada è circa quattro volte quello su ferrovia, nonostante che il secondo sia più efficiente dal punto di vista energetico e ambientale. Ci sono tuttavia alcune difficoltà legate al trasporto delle merci su ferrovia. Un problema è determinato dal fatto che devono esistere dei centri intermodali di scambio,



per esempio, da nave a ferrovia o da ferrovia a tir. Per i primi la logistica è relativamente facile da gestire, poiché questi centri intermodali sono nelle vicinanze dei porti dove anche la ferrovia ha accesso. Lo scambio ferrovia-tir è chiaramente più complicato: si tratta di coordinare merci trasportate in grosse quantità con la loro distribuzione capillare agli acquirenti sul territorio.

### 5.3 *Interventi sulle abitudini*

Come abbiamo già visto per il risparmio energetico in ambito domestico, anche nel caso dei trasporti le abitudini personali possono incidere notevolmente. Passare a mezzi più efficienti è il primo e più semplice passo per ridurre i consumi di combustibili: invece di usare il motorino o l'automobile, è energeticamente più efficiente prendere l'autobus o, ancora meglio, il tram o la metropolitana, che sono alimentati a energia elettrica. Il mezzo migliore, distanze permettendo, resta però la bicicletta: in questo caso il combustibile che usiamo per spostarci deriva solo dai nostri pasti (la respirazione è gratuita!).

In Italia, detto "il bel Paese" anche per il clima di cui godiamo, ci sono ampi margini di incremento dell'uso della bicicletta. Si pensi che in Danimarca, Paese noto per le poche ore di luce e per l'abbondante pioggia, la popolazione percorre in media 984 km/persona ogni anno e in Olanda 848. In Italia, invece, si percorrono mediamente solo 154 km/persona in un anno. Questo dato va sicuramente di pari passo con la carenza di una cultura "amica del ciclista": nelle città mancano le piste ciclabili (a Copenhagen ci sono 4 km di piste ciclabili per km<sup>2</sup>, a Roma solo 0,2 km e a Milano 0,5), nelle stazioni ferroviarie o per le strade mancano parcheggi per le biciclette. Da qualche anno si sta assistendo a una lieve controtendenza con la promozione del *bike sharing* nelle città o con il sostegno delle amministrazioni locali alle ciclofficine, spesso nate da iniziative di cicloamatori. Il *bike sharing* consiste nella messa a disposizione dei cittadini di biciclette di proprietà comunale, dislocate in diversi parcheggi, che i cittadini muniti di abbonamento possono utilizzare con il vincolo di riconsegnarle presso uno dei punti di raccolta. Le ciclofficine invece sono ambienti dotati di attrezzature specifiche per la manutenzione delle biciclette a prezzi molto contenuti, anche grazie alla collaborazione con gli altri utenti.

Tra i sistemi innovativi di trasporto che coinvolgono l'utilizzo delle automobili ricordiamo il *car sharing* e il *car pooling*. Il *car sha-*



*ring* è analogo al caso delle biciclette: è una flotta di vetture, dislocate in un certo numero di parcheggi, che possono essere noleggate con una tessera magnetica per poi essere restituite in uno qualsiasi dei parcheggi collegati. Il *car pooling* invece è un sistema di condivisione di un mezzo privato fra più utenti che compiono un tragitto comune, con un ente di controllo che ha il compito di comporre gli equipaggi delle vetture e di verificarne l'effettiva realizzazione.

## 6. Il ruolo del risparmio energetico

Secondo il maestro dell'architettura Mies Van der Rohe "Less is more", meno è di più. Anche se Mies Van der Rohe utilizzava questa frase per descrivere i suoi edifici in acciaio, possiamo provare a cercarne i significati nell'ottica di quanto visto in questo capitolo.

La prima osservazione è che anche il risparmio di energia può essere considerato una notevole "fonte" di energia. Tuttavia un risparmio puramente basato sulla tecnologia, cioè su un aumento dell'efficienza, non garantisce da solo alcun risultato: può anche succedere che il guadagno ottenuto dall'aumento di efficienza sia annullato da un maggiore utilizzo dello strumento, senza portare quindi a reali risparmi di energia, come abbiamo visto essere accaduto nel caso delle automobili. Il risparmio energetico può quindi avere un ruolo significativo nella soluzione della questione energetica solo se implica un effettivo cambiamento delle abitudini, il che non significa affatto un peggioramento della qualità della vita.

### DIAMOCI DA FARE

#### Case passive

Il termine "casa passiva", dal tedesco Passivhaus, è nato negli anni '80 con la costruzione di alcuni edifici a Darmstadt, in Germania. Per casa passiva s'intende un'abitazione che assicura il benessere termico senza alcun impianto di riscaldamento convenzionale (caldaia e termosifoni o sistemi analoghi).

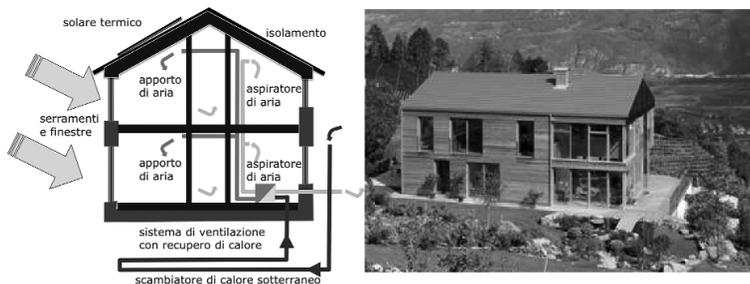
È detta "passiva" perché la somma degli apporti di calore dell'irraggiamento solare trasmessi dalle finestre e il calore generato internamente all'edificio da elettrodomestici e dagli abitanti sono praticamente sufficienti a compensare le perdite dell'involucro durante la stagione fredda. L'energia necessaria a pareggiare il bilancio termico dell'edificio può essere integrata con sistemi non convenzionali (per esempio, pannelli solari o pompa di calore per riscaldare l'aria dell'impianto di ventilazione controllata a recupero energetico).

Secondo la definizione del Passivhaus Institut (PHI) di Darmstadt, l'ente che certifica le case passive, una casa passiva è definita dai seguenti parametri di comfort energetico:

- l'indice di prestazione energetica inferiore a  $15 \text{ kWh/m}^2$  l'anno;
- l'indice energetico primario (perdite involucro, perdite impianti, acqua calda sanitaria, elettricità) inferiore a  $120 \text{ kWh/m}^2$  l'anno.

Le scelte progettuali e architettoniche delle case passive riguardano tutti i trasferimenti di calore e fresco dalla casa all'ambiente circostante (Figura 3). Di conseguenza grande attenzione è riposta nella scelta delle finestre con telai a elevato isolamento; nell'ombreggiamento; nell'isolamento termico; nell'assenza di ponti termici (piccoli spazi che lasciano passare aria e calore); nell'involucro a tenuta all'aria e nell'impianto di ventilazione interna con elevato recupero di calore e bypass estivo. In particolare, le finestre sono costituite da vetrate a tripla lastra e da telai con isolamento termico rinforzato. Nel periodo invernale consentono che l'energia che entra sia maggiore del calore disperso per conduzione verso l'esterno. Durante l'estate il Sole ha una posizione più alta sull'orizzonte e per questo l'irraggiamento delle finestre orientate verso sud è limitato, essendo la maggior parte della radiazione riflessa. Nelle case passive, le finestre sono quasi sempre verticali, le superfici vetrate più grandi sono in genere orientate a sud, mentre gli orientamenti a est e ovest sono studiati attentamente per evitare i fenomeni di eccessivo irraggiamento solare estivo. Per mantenere la qualità dell'aria e assicurare calore all'interno senza sistemi convenzionali, sono impiegati sistemi di ventilazione meccanica e di recupero del calore per lo più utilizzando tubazioni nel suolo che scambiano calore tra suolo e aria e viceversa e sono collegate al sistema di ventilazione dell'edificio.

Le case passive sono state ideate e costruite per prime in Paesi freddi come Germania, Svezia, Olanda e Austria. Recentemente si sono diffuse anche in Italia. Il primo edificio passivo pubblico italiano, l'Expost, progettato nel 2004, si trova a Bolzano in Alto Adige. Si tratta dell'adeguamento di un ex edificio postale, ora se-



**Figura 3.** A sinistra, sezione schematica di una casa passiva: sono evidenziati gli scambi di aria, l'isolazione e l'isolamento; a destra, fotografia di una casa certificata CasaClima A a Bolzano.

de degli uffici della Provincia Autonoma di Bolzano, che, con una cubatura di 20.000 m<sup>3</sup>, consuma 7 kWh/m<sup>2</sup> l'anno, che corrisponde a meno di 1 litro di olio combustibile per m<sup>2</sup> l'anno. Dal 2006 il Parlamento Europeo, nell'ambito di "Action Plan for Energy Efficiency", sta discutendo le norme per i nuovi edifici che dovranno rispettare gli standard delle case passive; queste norme dovrebbero probabilmente entrare in vigore nel 2011.

## FACCIAMO I CONTI

### Isolamento termico e risparmio energetico

Immaginiamo di avere una stanza di 3 m per 4 m e 3 m di altezza. Se la stanza si trova sullo spigolo di un edificio, due pareti danno verso l'esterno. Supponiamo che siano costruite con mattoni pieni e abbiano uno spessore di 20 cm. Ora immaginiamo di voler mantenere la stanza alla temperatura di 18 °C anche durante la notte, quando le temperature esterne si abbassano. In particolare, nel nostro esempio, assumiamo che le temperature notturne siano le seguenti:

Ora	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5
Temperatura (°C)	18	16	13	10	8	8	10	13	16	18

Allora, il calore dissipato  $Q_h$  verso l'esterno alle ore  $h$  è dato dalla nota formula di conduzione del calore

$$Q_h = K \cdot S / l (T_{int} - T_h) \Delta t$$

nella quale  $K$  è la conducibilità termica del materiale (W/m °C),  $S$  è la superficie di scambio,  $l$  lo spessore della parete,  $T_{int}$  la temperatura della stanza (18 °C),  $T_h$  quella esterna e  $\Delta t$  l'intervallo di tempo, cioè un'ora nel nostro caso.

Tenuto conto che il coefficiente  $K$  per i mattoni pieni vale circa 0,7 W/m °C, che  $l$  è 0,2 m e che la superficie di scambio è  $(3 + 4) \cdot 3 = 21$  m<sup>2</sup>, la quantità di calore dispersa, che dovremo reintegrare con il riscaldamento alle 21, è

$$Q_{21} = 0,7 \cdot 21 / 0,2 \cdot (18 - 16) \cdot 1 = 147 \text{ Wh.}$$

Ovviamente, alle 22, otterremo

$$Q_{22} = 0,7 \cdot 21 / 0,2 \cdot (18 - 13) \cdot 1 = 367,5 \text{ Wh}$$

E, analogamente, alle 23, 588 Wh, e alle 24, 735 Wh. In tutta la notte quindi (dato che la situazione si ripete poi uguale dall'una alle cinque) abbiamo bisogno di

$$(147 + 367,5 + 588 + 735) \cdot 2 = 3675 \text{ Wh.}$$

Se le pareti fossero di calcestruzzo ( $K = 1,6$ ), la necessità di calore sarebbe oltre due volte tanto e se invece potessimo usare un materiale più isolante (vermiculite,  $K = 0,07$ ) dovremmo spendere solo il 10% dell'energia precedentemente calcolata.

È chiaro che le modalità di calcolo utilizzate sono una semplificazione di ciò che accade in realtà. La temperatura esterna non è costante ora per ora, ma continua a scendere (e poi a risalire) e quindi un calcolo più rigoroso andrebbe fatto su intervalli più piccoli, al limite infinitesimi. Inoltre le pareti esterne probabilmente avranno delle finestre, la cui conducibilità è diversa da quella dei muri.

Tuttavia, anche da questa valutazione approssimata si comprende facilmente quale sia l'importanza dell'isolamento termico e quanta energia può consentire di risparmiare.

## DOCUMENTIAMOCI

### **[ec.europa.eu/energy/efficiency/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/energy/efficiency/index_en.htm)**

Sito della Commissione Europea dedicato al risparmio energetico e all'efficienza energetica di edifici, apparecchiature elettroniche ed elettrodomestici. Sono disponibili le linee politiche dell'UE sul tema, oltre ai riferimenti di progetti di ricerca e di sviluppo promossi.

### **[ec.europa.eu/transport/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/transport/index_en.htm)**

Sito della Commissione Europea dedicato al trasporto. Sono molto interessanti le statistiche sui trasporti aggiornate di anno in anno nella pubblicazione *EU energy and transport in figures: Statistical pocket book*. Sono inoltre disponibili tutti i documenti relativi alle politiche comunitarie.

### **[standby.lbl.gov/standby.html](http://standby.lbl.gov/standby.html)**

Sito del Lawrence Berkeley National Laboratory, che si occupa di misurare i consumi degli apparecchi elettronici in stand-by. Sul sito ci sono molte informazioni su come ridurre i consumi dell'utilizzo in stand-by e sulle tecnologie più efficienti.

### **[www.agenziacasaclima.it](http://www.agenziacasaclima.it)**

L'agenzia CasaClima opera nella Provincia Autonoma di Bolzano ed è all'avanguardia sui temi dell'efficienza energetica in ambito edilizio. Ha contribuito a certificare numerosi edifici CasaClima a oggi costruiti. Sul sito è disponibile l'elenco degli edifici certificati di cui si possono visualizzare anche le fotografie. È possibile scaricare il documento *Conduttività termica di materiali da costruzione* in cui sono raccolti i coefficienti di conduttività termica di molti materiali edilizi.

### **[www.bioregional.com](http://www.bioregional.com)**

BioRegional è un'associazione senza scopo di lucro che promuove stili di vita sostenibili tramite il supporto a imprese e associazioni in tutto il mondo. Il sito Internet propone molte idee innovative e curiose su edifici ad alta efficienza energetica: in particolare, l'edificio Beddington Zero Energy Development (BedZED), una delle più grandi "comunità sostenibili" del Regno Unito, realizzato a Hackbridge, Sutton (UK).

### **[www.docet.itc.cnr.it](http://www.docet.itc.cnr.it)**

Software di diagnosi e certificazione energetica degli edifici residenziali esistenti sviluppato dal CNR. Il software è gratuito ed è stato sviluppato per facilitare l'inserimento dei dati da parte di utenti anche senza specifiche competenze.



**[www.energia.provincia.tn.it/certificazione\\_edifici](http://www.energia.provincia.tn.it/certificazione_edifici)**

Sito della Provincia Autonoma di Trento. Si segnala nella sezione Ecodomus.VI un foglio Excel scaricabile per stimare la classe energetica di appartenenza della propria abitazione. È presente anche un buon manuale d'uso.

**[www.energy.eu/#saving](http://www.energy.eu/#saving)**

Sito dell'Unione Europea con suggerimenti sulle azioni da intraprendere per ridurre i propri consumi di energia.

**[www.whokilledtheelectriccar.com](http://www.whokilledtheelectriccar.com)**

Il film *Chi ha ucciso l'auto elettrica?*, girato dall'americano Chris Paine nel 2006, indaga la lenta e silenziosa distruzione di migliaia di nuove, rivoluzionarie ed efficienti automobili elettriche. Attraverso le interviste di personaggi come Mel Gibson e Tom Hanks e attraverso la narrazione, il film dipinge una cultura industriale la cui avversione ai cambiamenti (in particolare, ad abbandonare il petrolio) è molto più profonda della capacità di abbracciare nuove soluzioni.



## LE RISPOSTE ISTITUZIONALI

Gli ultimi decenni sono stati caratterizzati da una crescita della popolazione umana senza precedenti: da 2,5 miliardi nel 1950 a 6,7 miliardi nel 2008. Una crescita destinata a continuare dato che, secondo le proiezioni delle Nazioni Unite, la popolazione nel 2050 arriverà a 9,5 miliardi. Infatti, se in alcuni Paesi industrializzati la crescita demografica è molto bassa (in Italia, per esempio, è negativa), in altri Paesi l'incremento demografico continua a ritmi elevati (per esempio, Paesi dell'Africa subsahariana e dell'America Latina, India). Parallelamente, abbiamo assistito anche alla crescita del prodotto interno lordo (aumentato di circa 10 volte dal 1950), dei consumi di combustibili fossili (quintuplicati rispetto al 1950), di acqua (raddoppiati dal 1960), di carne e di pescato (quadruplicati dal 1960). Questa crescita è spesso avvenuta in contrasto con le necessità di tutela e conservazione dell'ambiente e delle risorse naturali. Inoltre, il miglioramento delle condizioni di vita è stato assolutamente disomogeneo e si è assistito a percorsi di sviluppo completamente diversi tra Paesi industrializzati, emergenti e in via di sviluppo. I Paesi industrializzati sono i principali responsabili dei danni all'ecosistema globale, provocati dallo sfruttamento incontrollato delle risorse e dalla diffusione di inquinanti e di rifiuti.

### 1. Lo sviluppo sostenibile

La comunità scientifica e politica si è quindi chiesta se è possibile che il modello attuale di crescita possa mantenersi nel futuro ed estendersi anche ai Paesi emergenti e in via di sviluppo, per portarli al livello di benessere di cui godiamo nei Paesi industrializzati. Per rispondere positivamente a questa domanda è necessaria una transizione dal sistema di sviluppo economico attuale, basato su lavoro e capitale (monetario), a uno che tenga conto di un ulteriore fattore: il capitale naturale. Con questo termine si intendono i siste-



mi naturali (mari, laghi, fiumi, foreste, flora, fauna, territorio), i prodotti agricoli, i prodotti della pesca e della caccia, il patrimonio artistico-culturale. Occorre dunque fare riferimento a un'economia "ecologica", caratterizzata da un approccio assai diverso dal modello tradizionale basato sui paradigmi dell'economia neoclassica, che si fonda sul diktat della crescita senza limiti del PIL e che trascura i vincoli che dovrebbero regolare tale sviluppo: quello biofisico e quello etico-sociale.

Si è così arrivati a definire il concetto di "sviluppo sostenibile" che, secondo la definizione riportata nel "Rapporto Brundtland", è uno "sviluppo che risponde alle necessità del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare le proprie esigenze" (World Commission on Environment and Development, *Our Common Future*, 1987). La sostenibilità è definita nello stesso rapporto come un "processo nel quale lo sfruttamento delle risorse, la direzione degli investimenti, l'orientamento dello sviluppo tecnologico e il cambiamento istituzionale sono tutti in armonia e accrescono le potenzialità presenti e future per il soddisfacimento delle aspirazioni e dei bisogni umani".

Lo sviluppo sostenibile contiene in sé due concetti: quello di sviluppo, generalmente associato all'idea della crescita senza limiti, e quello di sostenibilità, generalmente associato alla capacità limitata del nostro pianeta: più in generale è sostenibile uno sviluppo che "migliora la qualità della vita umana nel rispetto della capacità portante degli ecosistemi che la supportano" (*Caring for the Earth*, IUCN/UNEP/WWF, 1991).

Il concetto si articola quindi in tre dimensioni: quella economica, quella sociale e quella ambientale. La sostenibilità non si limita alla tutela dell'ambiente, ma si estende all'obiettivo di un benessere economico nella prospettiva di una società equa. È di primaria importanza il raggiungimento di una visione non limitata ai bisogni del presente, ma in grado di prevedere le conseguenze che le strategie odierne possono causare nel futuro, in un'ottica di solidarietà con le generazioni a venire. Uno sviluppo sostenibile richiede pertanto un cambiamento a lungo termine dell'attuale struttura socioeconomica per ridurre e razionalizzare i consumi delle risorse naturali e aumentare l'efficienza della loro utilizzazione. Allo stesso modo, la sostenibilità deve riguardare anche la sfera economica, preservando obiettivi come l'elevato livello occupazionale, i bassi tassi d'inflazione e la stabilità nel commercio internazionale. Per quanto concerne l'ambito so-



ziale, gli obiettivi sono il raggiungimento di un'equa distribuzione delle risorse, l'eliminazione della povertà e dell'esclusione sociale.

### 1.1 *L'Agenda 21*

Nel 1992, in occasione della conferenza dell'ONU su ambiente e sviluppo di Rio de Janeiro, il concetto di sviluppo sostenibile riceve legittimazione politica da parte di 170 nazioni grazie all'adozione della cosiddetta "Agenda 21". Si tratta dell'insieme di principi, strategie, obiettivi e azioni finalizzati alla costruzione di un modello di sviluppo sostenibile e durevole per il XXI secolo, che garantisca un utilizzo equilibrato delle risorse naturali, umane ed economiche.

La finalità è quella di trasferire operativamente a ogni ambito decisionale pubblico il concetto di sostenibilità. L'Agenda 21 definisce attività da intraprendere, soggetti da coinvolgere e mezzi da utilizzare in relazione alle tre dimensioni dello sviluppo sostenibile (ambiente, economia, società), in un processo complesso, data la diversa natura dei problemi affrontati e gli inevitabili riferimenti alle più diverse scale di governo degli interventi.

Come abbiamo visto nel caso della produzione di energia, i problemi ambientali hanno sia una dimensione globale, nell'ambito della quale si manifestano effetti di portata planetaria, sia una dimensione locale, caratterizzata da fenomeni specifici, legati allo stato dell'ambiente e alle attività che hanno sede su un particolare territorio. Entro questo scenario hanno preso man mano rilevanza temi come la pianificazione strategica integrata, la concertazione, la partecipazione della comunità ai processi decisionali, la ricerca e la sperimentazione di strumenti operativi adeguati, alla cui soluzione si stanno impegnando da alcuni decenni e con prevedibili difficoltà le comunità internazionali e nazionali, ai diversi livelli.

## 2. Misurare la sostenibilità

La Conferenza di Rio del 1992 ha sollecitato anche la definizione e l'adozione di indicatori quantitativi con cui misurare il livello di sostenibilità e supportare la formulazione di politiche ambientali, di cui sia possibile monitorare l'efficacia. Questi indicatori dovrebbero tener conto della scala spaziale (locale o globale) e temporale (intergenerazionale) della sostenibilità e dovrebbero misurare non solo gli aspetti economici, ma anche quelli sociali e ambientali.

Questi concetti sono espressi anche da un'altra definizione di sviluppo sostenibile dell'economista David Pearce, secondo cui "lo sviluppo economico sostenibile implica la massimizzazione dei benefici netti dello sviluppo economico, a condizione che siano mantenuti nel tempo i servizi e la qualità delle risorse naturali". Questa definizione riconosce l'importanza del capitale naturale e della sua conservazione, al di là del reddito che il suo sfruttamento potrebbe generare.

Lo stretto legame fra biodiversità e benessere dell'uomo è stato lucidamente evidenziato nell'ambito del "Millenium Ecosystem Assessment", un ciclopico progetto di ricerca delle Nazioni Unite (terminato nel 2005) che descrive lo stato e le tendenze degli ecosistemi e della biodiversità, oltre che dei servizi che offrono gratuitamente all'uomo: il mantenimento del clima, la produzione di cibo, legna e altre risorse rinnovabili, la protezione dall'erosione, lo smaltimento degli scarichi organici, l'impollinazione e molti altri ancora. È stato così chiarito che occuparsi della protezione della biodiversità e dell'integrità degli ecosistemi non è un lusso di società agiate, ma una necessità per conservare i preziosi ecosistemi da cui dipende, in definitiva, il nostro benessere.

Mentre esiste una consolidata esperienza su come misurare la ricchezza economica di una nazione mediante i parametri del PIL, è molto più complicato misurare il livello di sostenibilità raggiunto da una determinata attività, oppure da una nazione. Il dibattito in materia è intenso anche a livello istituzionale. A titolo di esempio, nel novembre 2007 si è svolta a Bruxelles una conferenza internazionale dal titolo "Oltre il PIL" (Beyond GDP) organizzata dalla Commissione Europea, dal Parlamento Europeo, dall'OCSE e dal WWF. Nel 2008 il presidente francese Nicolas Sarkozy ha inaugurato i lavori della "Commissione sulla misurazione delle performance economiche e del progresso sociale" per valutare in che modo riformare la rilevazione del PIL e definire indicatori più rappresentativi della sostenibilità e livello di benessere del suo Paese. Il lavoro di questa commissione è coordinato dal premio Nobel per l'economia Joseph Stiglitz e coinvolge numerosi studiosi di fama internazionale (si veda il sito [www.stiglitz-sen-fitoussi.fr](http://www.stiglitz-sen-fitoussi.fr)).

Comunque esistono già diversi indici che combinano un opportuno pannello di indicatori per cercare di cogliere la multidimensionalità dello sviluppo sostenibile e valutarne l'evoluzione. Alcuni di quelli in discussione e utilizzati in accompagnamento al PIL sono l'indice



di progresso genuino o del vero progresso (GPI, *genuine progress indicator*), proposto dagli economisti americani William Nordhaus e James Tobin nel 1972; l'indice di sviluppo umano (ISU, o HDI, *human development index*), sviluppato dalle Nazioni Unite; l'impronta ecologica, sviluppata dagli studiosi Mathis Wackernagel e William Rees negli anni '90, brevemente descritti qui di seguito.

### 2.1 *Il prodotto interno lordo*

Il PIL (in inglese, GDP, *gross domestic product*) è il valore complessivo dei beni e servizi prodotti all'interno di un Paese in un anno e destinati a usi finali (consumi finali, investimenti, esportazioni nette). Il PIL tiene conto solamente delle transazioni in denaro e trascura tutte quelle a titolo gratuito; restano quindi escluse le rilevanti prestazioni in ambito familiare o quelle di volontariato (si pensi al valore economico del non-profit). Il PIL tratta tutte le transazioni come positive, facendo sì che i danni provocati dai crimini, dall'inquinamento o dalle catastrofi naturali ne aumentino il valore: per esempio, il PIL cresce se si compra un'auto, se stando in coda si consuma benzina, se si ha un incidente e si viene ricoverati in ospedale. Cresce anche in occasione di grandi disastri ambientali in conseguenza delle costose opere di smaltimento, recupero e bonifica. Inoltre somma, invece di sottrarre, i costi sanitari dovuti all'inquinamento e le rendite provenienti dallo sfruttamento non sostenibile delle risorse naturali. In sintesi, il PIL non distingue tra le attività che contribuiscono alla qualità della vita e quelle che la diminuiscono.

### 2.2 *L'indice di progresso genuino*

Il primo indice a essere stato proposto in alternativa al PIL è l'indice di progresso genuino (GPI). Il GPI serve per misurare se la crescita economica, l'aumento della produzione di beni e l'espansione dei servizi di un Paese producono effettivamente un aumento della qualità della vita dei suoi abitanti. Diversamente dal PIL, il GPI è calcolato distinguendo tra spese positive (che aumentano il benessere, come quelle per beni e servizi) e spese negative (come i costi di criminalità, inquinamento, incidenti stradali).

Il calcolo del GPI è basato sugli stessi dati di consumo utilizzati per il PIL, ma i valori di spesa personale (per beni e servizi del mercato e non) sono pesati tenendo in considerazione le disuguaglianze del reddito e della distribuzione del lavoro. Infatti, le persone benestanti ricevono meno soddisfazione dal consumo di un'unità di bene ri-





petto a persone meno agiate, di conseguenza l'aumento delle disuguaglianze di reddito può abbassare, a parità di consumi, il GPI di un Paese. Vengono poi sommati i valori di beni e servizi che contribuiscono al miglioramento della società, ma sono ignorati dal PIL: il volontariato, i lavori domestici e l'impegno da genitori, il conseguimento di titoli di studio avanzati. Infine, sono sottratti i costi della criminalità, della diminuzione del tempo libero, del pendolarismo e della disoccupazione, ma anche i costi legati all'inquinamento, allo sfruttamento delle risorse naturali, alla perdita di suolo agricolo e di aree naturali.

L'andamento del GPI, che è utilizzato in Paesi come Regno Unito, Germania, Austria e USA, è andato aumentando fino agli anni '70, per poi rallentare fortemente o diminuire, nonostante che il PIL abbia continuato ad aumentare. Per esempio, negli USA dal 1950 a oggi il PIL è aumentato di circa il 9% mentre il GPI del 4%. Se si guarda il valore pro capite, eliminando quindi l'effetto dovuto all'aumento della popolazione americana, il PIL è aumentato del 3,8%, mentre il GPI è cresciuto solo di un terzo (1,3%).

### 2.3 *L'indice di sviluppo umano*

L'indice di sviluppo umano (ISU) combina indicatori sull'aspettativa di vita, l'istruzione e il reddito; è stato introdotto dall'ONU nel 1990. L'ISU è il risultato di operazioni di standardizzazione in cui le varie componenti (scolarizzazione, aspettativa di vita e PIL pro capite) sono rapportate su una stessa scala adimensionale normalizzata fra 0 e 1.

La componente dell'ISU relativa all'istruzione è composta dalla somma pesata del tasso di alfabetizzazione tra gli adulti (con peso due terzi) e del tasso d'iscrizione alle scuole (con peso un terzo). Il tasso di alfabetizzazione può essere al minimo pari a 0% e al massimo pari a 100%, quindi la componente di un Paese in cui il tasso di alfabetizzazione è del 98,4% (Italia, in Tabella 1) sarà pari a 0,984; allo stesso modo è calcolata la componente relativa all'iscrizione alle scuole 0,906. Combinando i due contributi ( $2/3 \cdot 0,984 + 1/3 \cdot 0,906$ ) si ottiene 0,958. La componente relativa all'aspettativa di vita è calcolata usando un valore minimo per aspettative inferiori a 25 anni e uno massimo per aspettative superiori a 85 anni. Di conseguenza la componente relativa all'Italia, in cui l'aspettativa di vita è di 80,3 anni, è pari a  $(80,3 - 25)/(85 - 25)$ , cioè 0,922. Infine, per quanto riguarda la componente legata al reddito, il reddito mi-



*Tabella 1. – Indice di sviluppo umano relativo al 2005 e indicatori che lo compongono per il mondo, Paesi a alto, medio e basso reddito e alcuni Paesi specifici*

	Vita attesa alla nascita (anni)	Tasso di alfabetizzazione (% dai 15 anni in su)	Tasso di iscrizione alle scuole primarie, secondarie e terziarie (%)	PIL pro capite (US\$ ppp)	Indice di vita attesa	Indice dell'educazione	Indice PIL	ISU (2005)
<b>Mondo</b>	<b>68,1</b>	<b>78,6</b>	<b>67,8</b>	<b>9.543</b>	<b>0,718</b>	<b>0,750</b>	<b>0,761</b>	<b>0,743</b>
<b>Paesi a reddito alto</b>	<b>79,2</b>	<b>99,0</b>	<b>92,3</b>	<b>33.082</b>	<b>0,903</b>	<b>0,937</b>	<b>0,968</b>	<b>0,936</b>
USA	77,9	99,0	93,3	41.890	0,881	0,971	1,000	0,951
Italia	80,3	98,4	90,6	28.529	0,922	0,958	0,944	0,941
<b>Paesi a reddito medio</b>	<b>70,9</b>	<b>89,9</b>	<b>73,3</b>	<b>7.416</b>	<b>0,764</b>	<b>0,843</b>	<b>0,719</b>	<b>0,776</b>
Brasile	71,7	88,6	87,5	8.402	0,779	0,883	0,740	0,800
Cina	72,5	90,9	69,1	6.757	0,792	0,837	0,703	0,777
<b>Paesi a reddito basso</b>	<b>60,0</b>	<b>60,2</b>	<b>56,3</b>	<b>2.531</b>	<b>0,583</b>	<b>0,589</b>	<b>0,539</b>	<b>0,570</b>
India	63,7	61,0	63,8	3.452	0,645	0,620	0,591	0,691
Senegal	62,3	39,3	39,6	1.792	0,662	0,394	0,482	0,499
Sierra Leone	41,8	34,8	44,6	806	0,280	0,381	0,348	0,336

I valori sono tratti dal Rapporto sullo Sviluppo Umano redatto annualmente dall'ONU.

nimo, a parità di potere d'acquisto, è fissato pari a 100 dollari USA e quello massimo a 40.000 dollari. Poiché all'aumentare del PIL di un Paese l'importanza di redditi elevati diminuisce, nella formula dell'ISU si utilizza il logaritmo del reddito; per l'Italia si ha  $0,944 = (\log 28.529 - \log 100) / (\log 40.000 - \log 100)$ . Per ottenere il valore finale dell'ISU si fa la media dei valori delle tre componenti, ottenendo così, per il nostro Paese, 0,941.

L'ISU è operativamente più semplice da calcolare rispetto al GPI perché assegna un valore relativo fra 0 e 1 per ognuna delle tre componenti principali, mentre il GPI cerca di assegnare un valore monetario anche a beni e servizi, come quelli ecologici o quelli legati al-

le attività di volontariato, che non essendo beni di mercato sono per loro natura difficili da monetizzare.

Tuttavia, anche l'ISU ha alcuni limiti. Per prima cosa, sebbene voglia misurare anche lo sviluppo sociale, non tiene conto delle disparità di genere tra uomini e donne. Non prende in considerazione nemmeno la condizione politica del Paese, ovvero non distingue tra democrazie e regimi autoritari, e, estendendo il concetto, non tiene in considerazione il rispetto dei diritti civili per i quali occorre definire indici a parte.

In Tabella 1 sono riportati i valori dell'indice ISU globale e per i Paesi a alto, medio e basso reddito e per alcuni Paesi specifici. Mentre USA e Italia figurano tra i Paesi con indice più elevato (al dodicesimo e ventesimo posto su 177), la Sierra Leone è il Paese con ISU più basso.

#### 2.4 *L'impronta ecologica*

La sostenibilità di un sistema può essere valutata anche misurando se le risorse sono utilizzate con tassi inferiori a opportuni limiti di sfruttamento, oppure se la capacità di assorbimento di un sistema naturale è o no superata. Se questi criteri non sono rispettati, le risorse naturali (cibo, acqua, legname, minerali, combustibili fossili) sono destinate all'esaurimento in tempi più o meno lunghi: l'ecosistema terrestre è, infatti, un sistema chiuso. In quest'ottica, l'impronta ecologica (EFI, dall'inglese *ecological footprint index*) misura la superficie di ecosistemi produttivi necessari a consentire per un tempo indefinito il consumo di risorse necessario per una determinata attività e ad assorbire emissioni e rifiuti risultanti: solo questa durata indefinita definisce uno sviluppo sostenibile.

In particolare, l'EFI conteggia l'area di foresta necessaria per assorbire l'anidride carbonica prodotta dall'utilizzo di combustibili fossili; il terreno agricolo utilizzato per la produzione di alimenti e altri beni (tabacco, cotone ecc.); il terreno a pascolo usato per gli allevamenti di bestiame; la superficie forestale destinata alla produzione di legname; la superficie edificata dedicata a insediamenti abitativi, impianti industriali, aree per servizi, vie di comunicazione; la superficie di mari, oceani e fiumi usata per fornire il pescato. Per tenere conto del commercio, l'indice stima il consumo totale sommando la produzione interna al sistema e le importazioni e sottraendo le esportazioni. Secondo le stime del Global Footprint Network, nel 2005 l'impronta ecologica globale della popolazione della Terra, vale a dire la su-



perficie di ecosistemi produttivi per sostenere i livelli di consumo degli abitanti del pianeta, era pari a 17,5 miliardi di ettari, equivalenti a 2,7 ettari pro capite (calcolata in riferimento alla capacità media di un ettaro di produrre risorse e assorbire rifiuti). L'impronta ecologica media di un italiano, però, è superiore alla media e pari a 4,2 ettari, quella di un cittadino degli Stati Uniti è addirittura di 9,6, quella di un abitante di uno Stato subsahariano, invece, è inferiore a 1 ettaro (Tabella 2).

Si noti che il nostro pianeta ha un'area produttiva – una biocapacità effettivamente disponibile, come si dice in termini tecnici – pari solo a 13,6 miliardi di ettari, che corrispondono a 2,1 ettari pro capite. Questo significa che l'impronta ecologica del pianeta oggi è superiore alla sua superficie produttiva effettivamente disponibile: come è possibile? Dato che la Terra è una sola, questo significa che stiamo consumando risorse in modo non sostenibile, a un tasso superiore alla capacità di rigenerazione (o assorbimento, nel caso delle emissioni di CO<sub>2</sub>) del pianeta e ne stiamo intaccando le riserve. È un po' come se un fondo fiduciario, invece che utilizzare solo gli interessi sul capitale, consumasse progressivamente il capitale stesso: è chiaro che non potrebbe farlo per sempre. Anche noi, quindi, invece di vivere sugli interessi, stiamo consumando il capitale, il capitale naturale del nostro pianeta. Stiamo quindi impedendo alle future generazioni di disporre delle stesse risorse di cui disponiamo noi oggi, in contrasto con quello che dovrebbe essere uno sviluppo sostenibile. L'impronta ecologica è un indice diventato molto popolare grazie alla facilità e immediatezza con cui ci aiuta a quantificare la sostenibilità del nostro modello di vita. Risulta fra l'altro estremamente utile per operare analisi comparative del carico ambientale esercitato dalle nazioni come illustrato nel "Living Planet Report", una pubblicazione aggiornata ogni due anni e scaricabile anche in italiano dal sito del WWF ([www.wwf.it](http://www.wwf.it)).

L'impronta ecologica non è tuttavia esente da problemi, di cui è opportuno essere consapevoli. In primo luogo, l'EFI non è in grado di considerare il problema della perdita di biodiversità, che pure è legata all'erogazione di quei servizi che rendono il nostro pianeta vivibile. Inoltre, non considera gli effetti delle emissioni inquinanti nell'ambiente e i relativi impatti sulla salute umana e su quella degli ecosistemi. In terzo luogo, serve solo a valutare quanto è sostenibile l'uso che un Paese fa delle proprie risorse, ma non dice nulla se vi si vive bene o male: per esempio, è evidente che una serie di Paesi con



*Tabella 2. – Impronta ecologica, biocapacità disponibile e deficit/surplus ecologico per persona (ettari globali pro capite) stimati dal Global Footprint Network per l'anno 2005*

	Popolazione (milioni)	Impronta ecologica totale	Terreno agricolo	Terreni a pascolo	Aree forestali	Superficie di mari e oceani	Area forestale per compensare le emissioni di carbonio	Area costruita	Biocapacità disponibile	Deficit/surplus ecologico
<b>Mondo</b>	6.476	2,7	0,64	0,26	0,23	0,09	1,41	0,07	2,1	-0,6
<b>Paesi a reddito alto</b>	972	6,4	1,15	0,28	0,61	0,17	4,04	0,13	3,7	-2,7
USA	298,2	9,4	1,38	0,30	1,02	0,10	6,51	0,10	5,0	-4,4
Italia	58,1	4,8	1,19	0,22	0,43	0,06	2,77	0,10	1,2	-3,5
<b>Paesi a reddito medio</b>	3.098	2,2	0,62	0,22	0,18	0,09	1,00	0,08	2,2	0,0
Brasile	186,4	2,4	0,61	1,11	0,49	0,02	0,04	0,08	7,3	4,9
Cina	1.323,3	2,1	0,56	0,15	0,12	0,07	1,13	0,07	0,9	-1,2
<b>Paesi a reddito basso</b>	2.371	1,0	0,44	0,09	0,15	0,02	0,26	0,05	0,9	-0,1
India	1.103,4	0,9	0,40	0,01	0,10	0,01	0,33	0,04	0,4	-0,5
Senegal	11,7	1,4	0,60	0,30	0,19	0,06	0,15	0,05	1,5	0,1
Sierra Leone	5,5	0,8	0,30	0,02	0,32	0,10	0,00	0,03	1,0	0,2



impronta ecologica inferiore alla biocapacità disponibile (come la Sierra Leone, il Senegal o il Brasile nella Tabella 2) non sono esempi di sviluppo sostenibile. L'EFI si applica quindi bene nei Paesi industrializzati, ma non è sufficiente a mostrare i miglioramenti della qualità della vita nei Paesi in via di sviluppo.

Questo indice è però molto utile quando lo applichiamo al nostro stile di vita personale: numerosi siti web (alcuni sono riportati nella scheda "Documentiamoci") permettono di calcolare la nostra impronta a partire da informazioni su come ci spostiamo (automobile, autobus, aereo, bicicletta), come viviamo (condominio, villa, classe di efficienza degli elettrodomestici, numerosità della famiglia), cosa mangiamo ecc.

### 3. La sostenibilità in Italia

In Italia le linee guida per intraprendere il cammino verso la sostenibilità sono contenute nella "Strategia nazionale d'azione ambientale" del 2002, che intende coordinare le politiche comunitarie e le politiche locali, attuate da Regioni, Province e altri enti locali. Tra i principi ispiratori di queste linee d'azione possiamo citare l'integrazione della variabile ambientale in tutte le altre politiche (energetiche, di sviluppo economico, di sviluppo infrastrutturale ecc.); la riduzione degli sprechi e l'aumento dell'efficienza globale nell'uso delle risorse; il rifiuto della logica d'intervento a fine ciclo a favore della chiusura dei cicli materiali di produzione-consumo; l'orientamento verso politiche di prevenzione degli impatti; lo sviluppo dei mercati locali e delle produzioni in loco; la partecipazione degli attori sociali ai processi decisionali. Nel corso degli anni sono anche stati stanziati finanziamenti consistenti (per esempio, il Fondo per lo Sviluppo Sostenibile nel 2006 con una dotazione finanziaria di 75 milioni di euro per tre anni) per finanziare progetti per la sostenibilità ambientale di settori economico-produttivi, l'educazione e l'informazione ambientale e progetti internazionali per la cooperazione ambientale sostenibile. L'Istat sta lavorando da qualche anno su un sistema di contabilità ambientale nazionale anche se per il momento non è stato prodotto un sistema per valutare le prestazioni ambientali del nostro Paese in termini di sostenibilità.

Si moltiplicano intanto le iniziative su base volontaria da parte di università, centri di ricerca, enti privati e amministrazioni locali per il calcolo di indici di sostenibilità. Fra le iniziative meritorie citiamo



Tabella 3. – I trenta indicatori che compongono l'indice ISSI suddivisi per i tre domini: società ed economia, ambiente, uso delle risorse. Per ogni indicatore è riportato anche lo stato nel 2005 e l'andamento 2002-2005

Domini	Indicatori chiave	Stato	Andamento
<b>Società ed economia</b>	Aspettativa di vita in buona salute	☺	☺
	Investimenti netti	☺	☺
	Livello e qualità dell'occupazione	☺	☺
	Coesione territoriale	☹	☹
	Distribuzione del reddito delle famiglie	☹	☺
	Disagio sociale femminile	☺	☺
	Accesso all'istruzione	☺	☺
	Occupazione verde	☺	☺
	Aiuti ufficiali allo sviluppo	☺	☺
	Investimenti in Ricerca e Sviluppo	☹	☺
<b>Ambiente</b>	Emissioni di gas serra	☹	☹
	Qualità dell'aria nelle principali città italiane	☹	☺
	Salute degli ecosistemi forestali	☺	☺
	Inquinamento degli ambienti marini	☺	☺
	Anomalie della temperatura atmosferica	☹	☹
	Scioglimento dei ghiacciai alpini	☹	☹
	Consumo di fitofarmaci in agricoltura	☹	☹
	Qualità delle acque interne	☹	☺
	Rischio idrogeologico	-	-
	Biodiversità dell'avifauna rurale e forestale	☺	☺
<b>Uso delle risorse</b>	Consumi energetici primari	☹	☹
	Produzione energetica da fonti rinnovabili	☹	☺
	Fabbisogno totale di materia	☹	☺
	Prelievo di acqua a uso potabile	☹	☹
	Stato delle risorse biologiche marine	☹	☺
	Nuova superficie costruita concessa e abusiva	☹	☹
	Produzione di Rifiuti urbani pro capite	☺	☺
	Gestione dei Rifiuti urbani	☺	☺
	Trasporto su gomma di passeggeri e merci	☹	☺
	Quota del trasporto ferroviario e navale	☹	☹

quella della Fondazione Sviluppo Sostenibile che dal 2002 pubblica un rapporto annuale per valutare l'andamento dello sviluppo in Italia sulla base dell'indice di sviluppo sostenibile Italia, ISSI, formato dall'aggregazione di 30 indicatori, 10 per ognuno dei tre domini: società ed economia, ambiente, uso delle risorse (Tabella 3). L'ISSI misura i progressi verso la sostenibilità in termini di avvicinamento o al-

lontanamento dell'insieme dei 30 indicatori ai rispettivi obiettivi. Secondo l'ultimo rapporto pubblicato, nel 2005 l'Italia ha conseguito solo un quinto degli obiettivi di sostenibilità. Gli indicatori socio-economici e ambientali hanno nell'insieme un andamento positivo, ma ampiamente insufficiente e con livelli di conseguimento quasi sempre inferiori al 30%. È invece particolarmente critica la situazione del dominio "Uso delle risorse", che mostra una tendenza ad allontanarsi dai traguardi di sostenibilità e proprio all'ultimo anno disponibile, il 2005, ha conseguito la peggiore performance della serie.

#### 4. Valutazioni economiche degli impatti sulla salute e sull'ambiente

Come abbiamo messo in luce nei capitoli dedicati all'inquinamento locale e globale, i cicli di produzione dell'energia influenzano notevolmente il clima, l'integrità della salute umana e delle specie viventi, l'agricoltura, la biodiversità e la conservazione dei materiali. Accanto ai benefici rappresentati dalla disponibilità di energia esistono quindi anche costi legati agli impatti provocati da tale produzione. Più precisamente, si possono distinguere le seguenti tipologie di costi:

- *costi industriali o privati*: sono i costi dei fattori di produzione di beni e servizi prodotti dall'economia che entrano nel bilancio costi-benefici del soggetto privato (produttore o consumatore);
- *costi esterni o esternalità*: sono quei costi che si hanno quando l'attività sociale o economica di un gruppo di individui ha un impatto su di un altro gruppo e il primo gruppo non compensa completamente il secondo per l'impatto da esso generato; in altri termini sono i costi determinati da un'attività economica che ricadono sull'intera società e non entrano nel bilancio economico del soggetto che li determina, il quale non paga per il danno arrecato;
- *costi totali o sociali*: sono la somma dei costi privati e di quelli esterni.

##### 4.1 I costi esterni

I costi esterni sono generalmente distinti in locali e globali. Per costi esterni locali si intendono i valori monetari degli impatti ambientali e sanitari, esclusi tutti quelli relativi ai cambiamenti climatici globali; sono relativi a fenomeni con dimensione spaziale "locale-regionale" (inquinamento dell'aria a scala locale, acidificazione a scala

regionale ecc.). Per costi esterni globali si intendono i valori monetari degli impatti relativi ai cambiamenti climatici, fenomeni che agiscono alla scala planetaria. Nel primo caso vi è una relativa coincidenza tra l'ambito spaziale dei fattori d'impatto e quello dei loro effetti, che invece manca nel secondo caso.

Mentre a parità di quantità di bene prodotto il soggetto privato mira a minimizzare i costi privati, l'ente pubblico persegue (o dovrebbe perseguire) la minimizzazione dei costi totali. Nel caso della produzione di energia i costi privati sono rappresentati dai costi specifici di investimento e di esercizio dell'impianto, mentre i costi esterni sono invece legati agli impatti socio-sanitari e ambientali (inquinamento locale e cambiamenti climatici globali).

Sempre rispetto alla produzione di energia, per valutare i costi esterni è necessario quantificare in termini monetari gli impatti socio-sanitari: per esempio, quanto costa l'aumento dell'incidenza di malattie cardiorespiratorie a causa dell'inquinamento locale.

Allo stesso modo, si devono valutare i costi degli impatti sull'ambiente. Secondo quest'impostazione, tutti i costi e i benefici si possono e si devono monetizzare (e se non è possibile, allora non hanno importanza): si tratta di un approccio puramente economicistico, perché dà per scontato che beni e servizi contano solo se a essi viene attribuito un valore monetario. Secondo molti ricercatori, però, è rischioso cimentarsi in una valutazione monetaria di ciò che è alla base fisica e biologica della vita sulla Terra. I metodi di valutazione sono piuttosto incerti e imprecisi ed è difficile, se non aleatorio, attribuire un valore a beni o servizi ecologici che stanno fuori dal mercato. Inoltre, alcuni gruppi d'interesse ritengono che le specie naturali possono avere un valore intrinseco indipendentemente dalla relazione con l'uomo o dal fatto che contribuiscano direttamente o indirettamente al benessere umano. Consapevoli di questi limiti, in qualche caso può essere utile effettuare delle valutazioni monetarie dei costi esterni ambientali al fine di definire, per esempio, sistemi fiscali d'incentivazione o tassazione (per esempio, sulle emissioni).

Uno dei riferimenti più noti per la stima dei costi esterni è il progetto europeo ExternE ([www.externe.info](http://www.externe.info)), il più grande studio sistematico delle esternalità ambientali generate dalle tecnologie per la produzione di energia. È stato finanziato dalla Commissione Europea nel 1991 e, da allora, ha coinvolto oltre 50 gruppi di ricerca di 20 Paesi diversi. Nell'ambito di ExternE è stato sviluppato l'approccio della catena degli impatti ("Impact Pathway Approach", Figura

1) che prevede di quantificare le emissioni concentrate (al camino) o diffuse (quelle dei trasporti); analizzarne la diffusione in atmosfera; studiare le ricadute al suolo; valutare gli impatti in danni fisici e infine effettuare la stima dei danni in termini monetari. Per rendere sistematici i confronti fra varie tecnologie e localizzazioni di impianti, è stato sviluppato il software *Ecosense* per il calcolo e la monetizzazione degli impatti. *Ecosense*, che contiene un database della distribuzione della popolazione con i principali parametri demografici, utilizza sia un modello di inquinamento atmosferico a piccola scala, sia un modello di qualità dell'aria a vasta scala, al fine di calcolare la dispersione degli inquinanti a livello europeo.

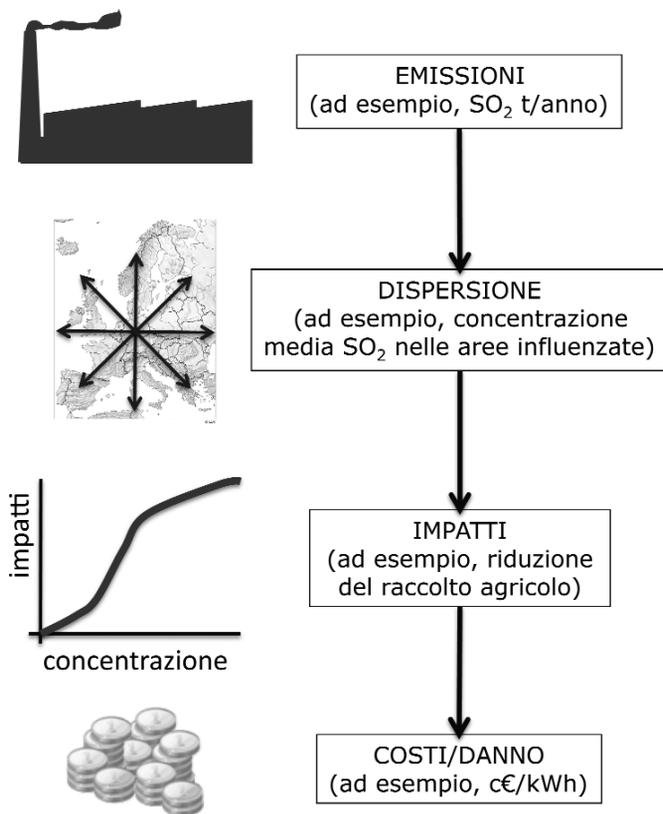


Figura 1. Schema della valutazione monetaria dei danni provocati dalla produzione di energia attraverso l'approccio della catena degli impatti.

La metodologia adottata da ExternE prevede che tutte le componenti di un dato sistema energetico siano analizzate durante tutto il loro ciclo di vita. Per esempio, l'analisi del ciclo di produzione dell'energia elettrica copre un rilevante numero di fasi in cascata: l'estrazione del combustibile, il trasporto, il trattamento del combustibile e delle altre sostanze utilizzate, la costruzione degli impianti, la generazione elettrica, la trasmissione della corrente elettrica, lo smaltimento dei rifiuti, la dismissione degli impianti. Le più importanti esternalità valutate da ExternE sono associate agli effetti dell'inquinamento atmosferico sulla salute, sui materiali, sui raccolti, sulle foreste e sugli altri ecosistemi; agli effetti del riscaldamento globale; ai danni paesistici dovuti alle infrastrutture; al rumore e agli incidenti e ai rischi per la salute dei lavoratori.

Per trasformare gli impatti fisici in danni monetari sono state utilizzate diverse tecniche di monetizzazione. In alcuni casi (per esempio, perdita di produttività agricola o materiali danneggiati) si possono utilizzare direttamente i prezzi di mercato; per altri, come l'incremento dei rischi di inondazione, possono essere utilizzati i costi di ripristino delle aree colpite. Nel caso di beni per cui non esiste un mercato (tipicamente la salute umana o la biodiversità), la valutazione monetaria è possibile solo a partire dall'analisi delle preferenze individuali di un campione di popolazione rappresentativo espresse come disponibilità a pagare per avere a disposizione il bene o come disponibilità ad accettare una compensazione per rinunciare al bene medesimo.

A titolo di esempio, la Tabella 4 mostra una stima dei costi medi industriali e ambientali, locali e globali, per la produzione di energia elettrica in Italia, stimati nel 2002.

Per valutare gli effetti della qualità dell'aria sulla salute esistono ormai analisi epidemiologiche piuttosto affidabili, metodi standardizzati per la valutazione della mancata produttività per malattia o dei costi dei ricoveri ospedalieri e delle cure sanitarie, una serie di approcci statistici per la stima della vita umana, utilizzati correntemente dalle compagnie assicurative. In tutti gli altri settori, fatto salvo forse quello relativo ai danni in agricoltura, le valutazioni sono ancora molto incerte e, nella migliore delle ipotesi, possono considerarsi solo una sottostima dei possibili danni ambientali.

Pur con queste limitazioni, l'utilizzazione delle stime dei costi esterni di ExternE può portare a risultati inaspettati e assai interessanti. Per esempio, nello studio da cui è stata tratta la Tabella 4, è stata effettuata un'analisi costi-benefici del protocollo di Kyoto per il settore

*Tabella 4. – Costi medi delle diverse tecnologie di produzione elettrica in Italia*

Tecnologia	Costi (centesimi di euro/kWh)		
	industriali	ambientali locali	ambientali globali
Grande Idroelettrico (>10 MW)	139	36	0
Piccolo Idroelettrico (<10 MW)	181	26	0
Geotermico	749	15	88
Rifiuti solidi	930	124	102
Eolico	775	15	0
Biomasse	981	119	0
Fotovoltaico	4338	15	0
Olio combustibile	294	207	140
Cogenerazione da derivati petroliferi	294	93	106
Gas naturale, ciclo combinato	341	57	70
Gas Naturale, grandi impianti con cogenerazione	351	26	62,4
Gas Naturale, impianti medi con cogenerazione	387	28	62,6
Gas Naturale, piccoli impianti con cogenerazione	465	31	65
Carbone	227	258	186
Carbone, ciclo combinato e cogenerazione	207	52	195,2
Carbone, ciclo combinato senza cogenerazione	129	52	208

**Fonte:** Caizzi, Gatto, Rizzi, De Leo, *Benefici economici del Protocollo di Kyoto*, "Rivista AEI", 89, 2002. 34-41.

elettrico in Italia, considerando non solo i costi industriali ma anche i costi ambientali e locali. Lo studio ha messo in evidenza che, da un punto di vista collettivo, onorare gli impegni presi a Kyoto (riduzione del 6,5% delle emissioni di gas serra rispetto al 1990) conviene, perché si spende un po' di più in bolletta elettrica, ma si risparmia molto di più sui costi sanitari grazie a un miglioramento sensibile della qualità dell'aria e a una riduzione delle emissioni di gas serra.

## 5. Il Protocollo di Kyoto

La presa di coscienza da parte di tutti i Paesi della rilevanza dei problemi ambientali iniziata a Rio ha portato alla stesura del

“Protocollo di Kyoto”, sottoscritto nel dicembre 1997 da più di 160 Paesi in occasione della terza Conferenza delle Parti (COP3) della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (UNFCCC). Il protocollo rappresenta lo strumento attuativo per la lotta ai cambiamenti climatici e si propone come primo grande passo verso una strategia internazionale per la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra, impegnando i Paesi industrializzati e quelli dell’Est europeo a una riduzione delle emissioni sulla base del principio della responsabilità comune e differenziata. A livello globale, il protocollo ha l’obiettivo di ridurre le emissioni del 5,2% rispetto a quelle del 1990. Gli Stati soggetti a queste direttive sono 39 e la quota di riduzione varia da Paese a Paese: per gli Stati membri dell’UE la riduzione è pari all’8%, per gli Stati Uniti al 7%, per il Giappone al 6%. Anche nell’ambito dell’UE, gli obiettivi di riduzione sono stabiliti diversamente per ogni Stato membro. In particolare, l’Italia si è impegnata nella riduzione del 6,5% delle emissioni. I Paesi in via di sviluppo come Cina e India hanno firmato il protocollo, ma non sono tenuti a ridurre le emissioni.

Nonostante il trattato sia stato sottoscritto nel 1997, è entrato in vigore solo nel febbraio 2005 dopo la ratifica da parte della Russia. Infatti, per entrare in vigore, il trattato doveva attendere la ratifica di non meno di 55 nazioni, responsabili di almeno il 55% delle emissioni. Gli Stati Uniti, che avevano inizialmente sottoscritto il trattato sotto la presidenza di Bill Clinton, non lo hanno mai ratificato e nel 2001 il presidente George W. Bush ritirò l’adesione. Con Barack Obama, eletto presidente alla fine del 2008, gli Stati Uniti stanno modificando la propria posizione così come sta avvenendo con l’Australia, che pure non ha ratificato il protocollo.

Purtroppo, mantenendo i ritmi attuali di emissione, l’obiettivo di abbattimento dell’8% non sarà raggiunto entro il 2010. Tra gli Stati europei solo Svezia e Gran Bretagna hanno rispettato le prescrizioni, mentre il peggior risultato spetta alla Spagna (+30% sul valore di soglia) e anche l’Italia sta allontanandosi dall’obiettivo. Nel 2000 l’UE ha specificato le misure previste per avviare l’inversione di tendenza, attraverso una strategia decennale, nota come “Strategia di Lisbona”, che detta le priorità comunitarie in tema di politiche energetiche raccolte in sei linee guida di riferimento:

1. miglioramento dell’efficienza energetica;
2. unificazione del mercato interno nei settori del gas e dell’elettricità;

3. rafforzamento della sicurezza e della protezione nucleare;
4. sicurezza dell'approvvigionamento energetico;
5. miglioramento del legame tra le politiche in materia di energia, ambiente e ricerca;
6. promozione delle fonti energetiche rinnovabili.

### 5.1 I meccanismi flessibili

I meccanismi flessibili sono strumenti economici introdotti nel Protocollo di Kyoto per diminuire il costo complessivo della riduzione dei gas serra, intervenendo prioritariamente nei settori o nei Paesi in cui i costi di abbattimento sono più bassi. Infatti, siccome quello dei cambiamenti climatici è un problema globale, non ha importanza ridurre le emissioni di un'azienda o di un'altra, in Italia o in un altro Paese: l'importante è raggiungere la riduzione prevista e tanto vale farlo cominciando dove costa di meno.

Il meccanismo di "emission trading" (ET, commercio delle emissioni) permette a uno Stato o a un'azienda di acquistare diritti di emissione da Stati e aziende disposti a venderli al fine di ridurre le emissioni alla quota prevista dalle direttive del protocollo. In pratica, per raggiungere un certo obiettivo di abbattimento, un'azienda può valutare se modificare il proprio ciclo produttivo con azioni di risparmio energetico o di aumento dell'efficienza energetica, che comportano un determinato costo, oppure acquistare sul mercato i diritti a emettere messi a disposizione da altre aziende che invece ne hanno in eccesso rispetto alle loro esigenze. Se il prezzo di mercato è più basso del costo interno di abbattimento, opterà per l'acquisto, altrimenti le converrà modificare il proprio processo produttivo. L'UE ha approvato il sistema del mercato del carbonio (EU ETS, *emission trading system*) con la direttiva 87/2003/EC.

Il sistema della *joint implementation* permette alle imprese dei Paesi con vincoli di emissione di sviluppare progetti mirati alla riduzione delle emissioni in altri Paesi; si tratta di operazioni a somma zero, dal momento che le emissioni totali permesse nei due Paesi coinvolti rimangono le stesse. Il procedimento *clean development mechanism* (CDM) è invece uno strumento che permette alle imprese dei Paesi industrializzati con vincoli di emissione di vantare i crediti ottenuti realizzando progetti di riduzione delle emissioni di gas serra nei Paesi in via di sviluppo senza vincoli di emissione. Questo meccanismo ha come finalità quella di favorire l'accesso alle tecnologie pulite anche nei Paesi emergenti, privi delle risorse economiche e delle cono-

scenze tecniche per avviare autonomamente strategie orientate allo sviluppo sostenibile.

### *5.2 Aspetti economici*

In attesa dell'entrata in vigore del Protocollo di Kyoto, numerosi studi sono stati svolti per stimare il costo della riduzione dell'emissione dei gas serra da parte dei Paesi industrializzati. In effetti, il presunto elevato costo dell'abbattimento delle emissioni ha costituito un importante ostacolo alla ratifica del protocollo, in particolare da parte degli Stati Uniti. Tuttavia, secondo i risultati di queste analisi, il raggiungimento degli obiettivi presuppone costi contenuti, anche senza il ricorso ai meccanismi flessibili: i costi di riduzione sono valutati tra i 3 e i 20 dollari USA per tonnellata di biossido di carbonio rimosso, cifra che rappresenta non più del 3-5% dei costi energetici totali per la maggiore parte dei settori. Secondo il terzo rapporto dell'IPCC (2001), l'impatto di Kyoto sul PIL dei principali Paesi industrializzati sarà inferiore all'1% e considerando anche il mercato delle emissioni la percentuale scende allo 0,1%.

L'impatto economico del Protocollo di Kyoto appare, quindi, limitato, passando in secondo piano rispetto agli altri fattori economici: si prevede che l'Unione Europea raggiunga l'85-95% degli obiettivi del protocollo senza che questo influisca sulla competitività del sistema produttivo. Vi sono poi altri benefici, tra cui l'accesso al nuovo mercato internazionale del carbonio, con un valore che si stima superiore ai 30 miliardi di dollari, e la partecipazione ai progetti CDM, il cui valore è stimato dalle proiezioni in 5-17 miliardi di dollari all'anno entro il 2012. Vanno anche conteggiati i vantaggi legati ai nuovi mercati delle risorse e delle tecnologie di energia sostenibile e dei servizi energetici, che, secondo le previsioni del World Energy Assessment dell'UNEP e dell'UNDP, dovrebbero raggiungere cifre analoghe. Vi sono infine i benefici legati alla riduzione dei consumi di energia e alla diversificazione dei combustibili, al miglioramento dell'efficienza energetica, alla riduzione dell'inquinamento atmosferico anche a scala locale e dei danni provocati dai cambiamenti climatici.

### *5.3 L'attuazione del Protocollo di Kyoto in Italia*

L'Italia ha ratificato il Protocollo di Kyoto con la legge n. 120 del 1/6/2002, nella quale è presentato il piano nazionale per l'abbattimento delle emissioni di gas serra. Come si è detto, l'obiet-

tivo di riduzione è fissato per l'Italia al 6,5% delle emissioni del 1990 (da 508 si deve quindi scendere a 475 Mt CO<sub>2eq</sub>, milioni di tonnellate di biossido d'azoto equivalenti). Purtroppo secondo lo scenario tendenziale, che prevede il mantenimento dei trend attuali, le emissioni italiane del 2010 saranno in eccedenza di circa 93 Mt CO<sub>2eq</sub> rispetto a quelle del 1990. È stato inoltre definito uno scenario di emissione "di riferimento" che considera gli effetti di provvedimenti e programmi nei settori individuati dal ministero dell'Ambiente (Tabella 5) e dovrebbe consentire una riduzione delle emissioni per un valore di circa 53 Mt CO<sub>2eq</sub>/anno per il 2010: per il raggiungimento dell'obiettivo stabilito dal protocollo si richiede quindi un ulteriore abbattimento di 40 Mt CO<sub>2eq</sub> circa. Le misure previste in questo scenario comprendono politiche di riduzione nel settore agricolo e forestale mediante interventi per l'aumento e la migliore gestione delle aree forestali e boschive, il recupero delle aree abbandonate e la protezione del territorio dai rischi di dissesto e desertifi-

*Tabella 5. – Emissioni di MtCO<sub>2eq</sub> nel 1990, 2000 e in due scenari per il 2010*

Anno	1990	2000	2010 tendenziale	2010 riferimento
<b>Da usi di fonti energetiche</b>	<b>424,9</b>	<b>452,3</b>	<b>484,1</b>	<b>444,5</b>
Industrie energetiche	147,4	160,8	170,4	144,4
Industria manifatturiera e costruzioni	85,5	77,9	80,2	80,2
Trasporti	103,5	124,7	142,2	134,7
Civile (incluso terziario e pubblica amministrazione)	70,2	72,1	74,1	68
Agricoltura	9	9	9,6	9,6
Altro (fughe, militari, aziende di distribuzione)	9,3	7,8	7,6	7,6
<b>Da altre fonti</b>	<b>96,1</b>	<b>94,5</b>	<b>95,6</b>	<b>95,6</b>
Processi industriali (ind. mineraria, chimica)	35,9	33,9	30,4	30,4
Agricoltura	43,4	42,6	41	41
Rifiuti	13,7	14,2	7,5	7,5
Altro (solventi, fluorurati)	3,1	3,8	16,7	16,7
<b>Totale</b>	<b>521</b>	<b>546,8</b>	<b>579,7</b>	<b>540,1</b>

Fonte: www.minambiente.it, 2005.

cazione per mezzo di progetti ecosostenibili di ampliamento dei boschi e di riforestazione. Le energie rinnovabili, che dovrebbero consentire una riduzione annua compresa tra le 1,8 e le 3,4 Mt CO<sub>2eq</sub>, rappresentano uno dei settori principali per colmare il restante divario.

## 6. Il Protocollo di Kyoto e le foreste

Gli obiettivi di riduzione delle emissioni previsti dal Protocollo di Kyoto non riguardano il settore forestale. La deforestazione è responsabile del rilascio di circa un quinto dei gas serra in atmosfera, e per questa ragione si vorrebbe inserire la protezione delle foreste negli accordi internazionali per l'applicazione del protocollo.

Come abbiamo visto nel capitolo dedicato all'effetto serra, gli ecosistemi vegetali e principalmente le foreste rivestono un ruolo strategico nella mitigazione dei cambiamenti climatici per la loro capacità di assorbire e fissare il carbonio. Le foreste sono quindi considerate alla stregua di serbatoi di carbonio (*carbon sinks*, nella terminologia inglese). In occasione della Conferenza di Milano (COP9, 2003) l'IPCC ha presentato il rapporto "Good Practice Guidance for Land Use, Land Use Change and Forestry" (GPG-LULUCF), che indica le tecniche per la stima di questi depositi di carbonio e delle loro variazioni nelle diverse categorie di uso del suolo e in tutti i terreni destinati alle attività previste nel Protocollo di Kyoto.

La deforestazione ha anche gravissime conseguenze ecologiche legate alla perdita di biodiversità. A partire dalla COP11 di Montreal del 2005, su iniziativa di Papua Nuova Guinea, Costa Rica e altri otto Paesi dei tropici, si è quindi iniziato a discutere di meccanismi per la riduzione delle emissioni di gas serra provocate dall'abbattimento e dal degrado delle foreste, i cosiddetti meccanismi REDD, sigla di *reducing emissions from deforestation and forest degradation*. L'accordo prevede che i Paesi in cui sono presenti le foreste tropicali s'impegnino a combattere la deforestazione e a conservare le proprie foreste in cambio di contributi economici da parte dei Paesi industrializzati, che pagherebbero il carbonio assorbito e stoccato nelle foreste tropicali e potrebbero scontarlo dalle proprie emissioni. Questi pagamenti andrebbero a costituire un fondo da utilizzare per contrastare la deforestazione e il cambio di uso del suolo, istituire aree protette e alleviare la povertà delle popolazioni locali.

Il dibattito attorno ai REDD è molto acceso e presenta diversi problemi. Se è relativamente semplice definire il concetto di deforestazione, è molto più complesso definire quello di degrado; la questione più importante è però legata al diritto di utilizzo delle terre sottratte alla deforestazione. I meccanismi REDD potrebbero spingere i governi beneficiari ad aumentare il controllo sul proprio territorio, spesso su terreni che sono di proprietà ancestrale dei popoli indigeni, che rischierebbero così di essere privati delle loro forme tradizionali di sussistenza basata sull'utilizzo delle foreste, oppure a chiedere pagamenti per attività tradizionalmente distruttive, quali l'estrazione di legname o lo sviluppo di piantagioni monoculturali.

## 7. L'Unione Europea e il "Pacchetto 20-20-20"

Negli ultimi anni l'UE ha adottato una linea politica molto decisa in tema di cambiamenti climatici ed energia, tanto da assumere un ruolo di leadership nella definizione delle politiche mondiali. Nel 2007 la Commissione Europea ha approvato un insieme di direttive su energia e cambiamenti climatici noto come "Pacchetto 20-20-20", accompagnato da un piano d'azione che prevede entro il 2020:

- un impegno unilaterale dell'UE a ridurre di almeno il 20% le emissioni di gas serra rispetto ai livelli del 1990, e addirittura del 30% se verrà concluso un nuovo accordo internazionale sui cambiamenti climatici successivo a quello di Kyoto;
- il raggiungimento di una quota del 20% di energie rinnovabili sul totale dei consumi energetici dell'UE;
- una quota minima del 10% per i biocarburanti sul totale dei consumi di benzina e gasolio per autotrasporto dell'UE;
- un risparmio dei consumi energetici dell'UE del 20% rispetto alle proiezioni per il 2020.

È chiaro l'intento dell'UE di intervenire nella lotta ai cambiamenti climatici adottando una politica energetica che punta su fonti rinnovabili e risparmio energetico. Questa politica è supportata da diverse considerazioni.

Se non s'intervenisse per la mitigazione dei cambiamenti climatici, il "Rapporto Stern" (elaborato dall'economista Lord Stern of Brentford e scaricabile all'indirizzo [www.hm-treasury.gov.uk/sternreview\\_index.htm](http://www.hm-treasury.gov.uk/sternreview_index.htm)) calcola costi per l'economia mondiale compresi tra il 5 e il 20% del PIL globale. Inoltre, la competizione per

le risorse energetiche diviene ogni anno più accanita e quindi si ritiene necessario diminuire la dipendenza dalle importazioni di petrolio e gas naturale per limitare l'esposizione dell'economia europea ai prezzi crescenti del petrolio e alle speculazioni e ai rischi geopolitici connessi a catene di approvvigionamento non totalmente affidabili (come hanno dimostrato le controversie relative all'approvvigionamento di gas naturale dalla Russia).

Investire nell'efficienza energetica e nelle risorse rinnovabili può essere molto vantaggioso. L'UE prevede per il 2020 la riduzione di circa 50 miliardi di euro delle importazioni di petrolio e gas, ipotizzando un prezzo di 60 dollari al barile. Le tecnologie per le energie rinnovabili hanno raggiunto nel 2008 un fatturato di 20 miliardi di euro e hanno creato 300.000 posti di lavoro. Una quota del 20% di energie rinnovabili dovrebbe comportare per il 2020 la creazione di quasi un milione di posti di lavoro nel settore, che si basa su un alto numero di piccole e medie imprese e distribuisce impieghi potenziali in ogni angolo d'Europa.

Si stima inoltre che l'aumento dell'efficienza energetica, con la riduzione del 20% dei consumi di energia, comporterebbe un risparmio di circa 100 miliardi di euro e ridurrebbe le emissioni di quasi 800 milioni t/anno.

Infine, promuovere l'adozione di tecnologie a basso tenore di carbonio nelle imprese può rappresentare una grande opportunità per l'industria europea. L'ecoindustria, che già nel 2008 dava lavoro a più di 3 milioni di persone in Europa e fattura attualmente 227 miliardi di euro, ha un forte potenziale di crescita e offre concreti vantaggi a chi accede per primo al mercato.

Prima che si realizzino i benefici sopra elencati, il mercato dei diritti di emissione potrebbe tuttavia causare un aumento dei costi di produzione in alcuni settori industriali che producono forti emissioni di gas serra. Questi costi potrebbero comportare per le industrie europee uno svantaggio competitivo nei confronti di quelle situate in Paesi con leggi meno stringenti e alcune aziende potrebbero quindi decidere di trasferire la produzione in Paesi che non partecipano al mercato di diritti di emissione di biossido di carbonio, continuando così a emettere come prima (un fenomeno definito dagli addetti ai lavori *carbon leakage*, fuga di carbonio). Da qui si capisce l'importanza di coinvolgere nei processi negoziali i Paesi in via di sviluppo, uno degli obiettivi principali della conferenza di Copenhagen nel dicembre 2009 (COP15).

## 8. Verso la COP15 di Copenhagen

Il Protocollo di Kyoto fissa obiettivi di riduzione delle emissioni per il 2008-12; ormai prossimi alla scadenza del protocollo, la conferenza annuale delle parti di Bali (COP13) del 2007, a cui hanno partecipato 192 Paesi, ha deciso di cominciare a lavorare alla stesura di un nuovo accordo sul clima, che dovrebbe essere raggiunto nel 2009 durante la COP15 di Copenhagen.

Per quanto le politiche dell'UE siano importanti, soprattutto per il ruolo trainante verso altri Paesi nel mondo, è altrettanto vero che da sola l'UE non può risolvere il problema climatico. Nel 2007 la Cina ha ufficialmente superato gli Stati Uniti per emissioni di gas serra, anche se le emissioni pro capite degli Stati Uniti continuano a restare largamente superiori a quelle di qualsiasi altro Paese al mondo. La determinazione della UE nel combattere i cambiamenti climatici, sancita definitivamente con l'approvazione del Pacchetto 20-20-20, ha certamente avuto un'influenza positiva sulla nuova politica del presidente americano Barack Obama, dopo gli anni di rifiuto del presidente George W. Bush di prendere qualsiasi impegno vincolante a livello federale o internazionale per la riduzione delle emissioni. Un primo decisivo passo in avanti è stato compiuto dal Congresso statunitense nel giugno 2009 con l'approvazione dell'*American Clean Energy and Security Act*, una legge che istituisce un mercato delle emissioni di gas serra simile a quello europeo. Il dibattito negli Stati Uniti resta ancora molto acceso, perché continua a essere radicata la convinzione che i costi di riduzione dei gas serra saranno insostenibili se le economie emergenti (Cina e India *in primis*) non prenderanno impegni vincolanti.

C'è quindi grande attesa per la riunione della COP15, perché in questa sede si dovrebbe decidere l'accordo "dopo Kyoto" definendo sia l'obiettivo di riduzione delle emissioni di gas serra a livello globale, sia la suddivisione delle quote di riduzione tra i diversi Paesi. I negoziati vedono soprattutto impegnati UE e Stati Uniti, da una parte, e Cina, India e Brasile, tra i Paesi emergenti.

In preparazione alla COP15, il G8 del 2009 (che riunisce Canada, Francia, Germania, Giappone, Italia, Russia, Regno Unito, Stati Uniti) è stato in gran parte dedicato al tema dei cambiamenti climatici. Tutti i Paesi del G8 hanno concordato per la prima volta che si deve limitare l'aumento di temperatura a non più di 2 °C oltre la temperatura media globale preindustriale, in quanto con un au-

mento superiore gli impatti del cambiamento climatico potrebbero essere catastrofici. Inoltre hanno stabilito che i Paesi industrializzati dovranno ridurre le emissioni di gas serra dell'80% entro il 2050, mentre a livello planetario le emissioni dovranno essere ridotte del 50% entro la stessa data. Tuttavia non si è trovato un accordo su come tale obiettivo debba essere raggiunto dalle nazioni in via di sviluppo. Questi Paesi chiedono obiettivi più specifici e vincolanti per le nazioni più industrializzate prima di firmare i propri impegni di riduzione, argomento che sarà certamente al centro della discussione nella prossima conferenza di Copenhagen.

### DIAMOCI DA FARE

#### **Comunità, Paesi e Stati a emissioni zero**

Negli otto anni di stallo dei negoziati internazionali causati principalmente dalla reticenza della amministrazione americana di G.W. Bush, la parte del leone nella lotta ai cambiamenti climatici l'hanno fatta le amministrazioni locali nel pieno spirito del motto dell'Agenda 21 di "pensare globalmente e agire localmente". Per esempio, il comune di Güssing in Austria, l'isola di Samsø in Danimarca, la Norvegia e l'Islanda sono alcune delle comunità o Paesi che si sono impegnati con azioni concrete e programmi operativi a diventare "carbon-neutral": a emissioni zero di biossido di carbonio.

Queste comunità puntano a sfruttare la conversione del proprio sistema energetico come volano per il rilancio dell'economia locale, per l'autosufficienza energetica e per il rispetto e la salvaguardia dell'ambiente.

Il comune di Güssing, 27.000 abitanti, si trova nel Burgenland, la regione economicamente meno sviluppata dell'Austria, al confine con l'Ungheria. Per rivitalizzare l'economia della regione, alla fine degli anni '80 ha creato, con il patrocinio della Comunità Europea, un centro tecnologico per studiare le potenzialità delle energie rinnovabili nella zona. Da allora, sono stati costruiti numerosi impianti: il più grande è una centrale elettrica da 4,5 MW alimentata da biogas derivato dalla fermentazione di rifiuti legnosi prodotti nella cittadina. Il biogas alimenta un motore per produrre energia elettrica, mentre il calore è distribuito alle utenze tramite una rete di teleriscaldamento. Inoltre la ristrutturazione di numerosi edifici ha dimezzato i consumi di energia. Oggi nell'area di Güssing ci sono circa 27 impianti decentrati per la produzione di energia elettrica tanto che si parla di "modello Güssing" per la strategia di sviluppo di energia da fonti rinnovabili prodotta a livello locale e in modo decentralizzato. L'area è autosufficiente dal punto di vista energetico dato che l'energia elettrica, il calore/raffrescamento, i combustibili sono tutti prodotti all'interno della regione. L'uso delle fonti rinnovabili ha permesso di ridurre del 90% le emissioni di biossido di carbonio e di guadagnare ogni anno, dalla vendita alla rete nazionale del surplus elettrico, 500.000 euro che sono reinvestiti in nuovi progetti. Senza contare il valore del migliaio e passa di posti di lavoro che so-

no stati creati o del fatto che il Paese è diventato meta di turismo ecosostenibile.

Anche l'isola di Samsø in Danimarca ([www.energiakademiet.dk/default\\_uk.asp](http://www.energiakademiet.dk/default_uk.asp)) è divenuta una comunità a emissioni zero. La domanda di energia elettrica dei 4500 abitanti è soddisfatta da energie rinnovabili: 11 turbine eoliche da 1 MW e 4 impianti di cogenerazione a biomasse sono più che sufficienti. La domanda di calore, piuttosto elevata dato il clima decisamente freddo, è soddisfatta al 70% dal calore distribuito dalle centrali a biomasse e da pannelli di solare termico (che funzionano solo da maggio ad agosto, quando l'irraggiamento solare è sufficiente), caldaie a biomassa domestiche o impianti geotermici. I combustibili usati per i trasporti restano ancora quelli fossili convenzionali. In attesa di poterli sostituire con biocombustibili, sono stati costruiti altri impianti eolici per compensare le emissioni del settore dei trasporti tramite energia elettrica pulita. In totale, sull'isola ci sono 21 turbine eoliche da 1 MW. Alla fine degli anni '90, l'isola di Samsø importava energia prodotta da combustibili fossili dalla terraferma, ma dal 2005 l'isola è energeticamente autosufficiente, produce zero emissioni di gas serra ed esporta sulla terraferma energia prodotta dalle turbine eoliche. La maggior parte delle turbine sono di proprietà delle comunità locali e di imprenditori agricoli, singoli o consorziati in piccoli gruppi o cooperative. Le turbine, che sono di proprietà dell'amministrazione comunale dell'isola, generano proventi che sono reinvestiti in progetti di sviluppo e sostegno delle energie rinnovabili. Anche qui, come a Güssing, le fonti rinnovabili hanno portato ricchezza, nuovi posti di lavoro, oltre a un ambiente più pulito e un richiamo per i turisti "ambientalisti".

Queste due comunità sono bellissimi esempi di come politiche rivolte alla salvaguardia dell'ambiente abbiano riscontri positivi sulla popolazione (che accetta ben volentieri e finanzia in prima persona la costruzione di impianti) e sull'economia del luogo (creazione di nuovi posti di lavoro, turismo). Entrambe le comunità sono però abbastanza piccole, tanto da chiedersi se sia possibile una società a emissioni zero anche in una nazione intera o in una grande città. Per ora non ci sono esempi, se non le intenzioni di Paesi come la Norvegia e l'Islanda di diventare autosufficienti dal punto di vista energetico o neutrali dal punto di vista delle emissioni di gas serra. La Norvegia punta ad azzerare le proprie emissioni di gas serra entro il 2050. L'obiettivo non sarà raggiunto soltanto con la produzione di energia da fonti rinnovabili, ma soprattutto attraverso l'acquisto di quote di emissione nel mercato del carbonio. La Norvegia è il quinto Paese al mondo per esportazioni di petrolio: ha quindi una certa quantità di ricavi dalla vendita del petrolio da reinvestire per favorire lo sviluppo di un sistema a zero emissioni. Un percorso decisamente diverso è quello previsto dall'Islanda, dove già oggi l'energia consumata è per la quasi totalità prodotta da fonti rinnovabili: l'idroelettrico serve per l'energia elettrica e il geotermico (che sfrutta la geologia dell'isola, ricca di geysers) per l'energia elettrica e il calore.

## FACCIAMO I CONTI

### I danni dell'inquinamento da PM10

Come abbiamo visto, è possibile tentare di valutare quali siano i costi esterni o, equivalentemente, quantificare in termini monetari i danni prodotti da una certa emissione di inquinanti in atmosfera. Nel capitolo "Le tecnologie per la produzione di energia" abbiamo detto come si può calcolare la concentrazione ambientale di un certo inquinante a partire dalla quantità emessa; qui faremo invece il passo successivo, cioè quello di tradurre la concentrazione in danni economici. Potremo così renderci conto, per esempio, di quali vantaggi comporterebbe una riduzione delle concentrazioni. Partiremo dalle concentrazioni medie annue e faremo riferimento solo al particolato, in particolare al PM10, che è l'inquinante ritenuto responsabile dei maggiori danni alla salute umana, specialmente nelle aree urbane. I dati di cui abbiamo bisogno per la nostra valutazione sono quelli del progetto ExternE ([www.externe.info](http://www.externe.info)) e quelli della popolazione della zona che vogliamo esaminare, che possiamo trovare sul sito Istat ([demo.istat.it](http://demo.istat.it)). Tra l'altro il sito ci fornisce anche valutazioni sulla previsione di popolazione nel futuro e quindi ci consente di effettuare le valutazioni anche relativamente agli anni a venire.

Sulla base di un'ampia serie di dati epidemiologici, il progetto ExternE ha definito delle funzioni concentrazioni-impatti lineari così da sintetizzare in un coefficiente l'incremento (o la diminuzione) d'impatto legato a un incremento (diminuzione) di concentrazione. Per il PM10, i risultati sono sintetizzati in una tabella del tipo di quella alla pagina seguente.

La tabella si interpreta nel modo seguente: la prima riga dice che per ogni aumento di un  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  della media annua del PM10, il 16,3% della popolazione che soffre di asma, deve utilizzare un broncodilatatore e ognuno di questi casi ha un "costo" di 47,9 euro. Si noti che si tratta di un costo che, come abbiamo detto nel capitolo, va al di là del costo vero e proprio delle cure e intende rappresentare piuttosto il danno sociale complessivo. Come si vede dalla tabella, per la stima in una certa area abbiamo bisogno della composizione della popolazione: bambini (sotto i 14 anni), ultrasessantacinquenni, attivi e sofferenti di asma. Dal sito Istat possiamo, per esempio, estrarre i dati della città di Napoli al 1 gennaio 2008: dei 973.132 residenti, circa il 16% aveva meno di 14 anni e il 17% ne aveva 65 o più. Gli attivi (cioè la parte di popolazione tra 15 e 64 anni su cui calcolare i giorni di attività ridotta) erano circa il 57% della popolazione, e gli asmatici il 6,5%.

Suddivisa quindi la popolazione in gruppi di numerosità  $p_i$ , ciascuno dei quali costituisce il bersaglio dell'impatto  $i$ -esimo, di entità  $d_i$  e con costo unitario  $c_i$ , possiamo valutare il costo complessivo  $C$  dell'aumento (o la riduzione di costi dovuta alla diminuzione) di un  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  di PM10, con la formula

$$C = \sum_i c_i \cdot d_i \cdot p_i$$

Se poi vogliamo valutare una riduzione di  $\Delta_{\text{PM}}$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , il costo complessivo sarà ovviamente

$$C_{\text{TOT}} = C \Delta_{\text{PM}}$$

<b>Asmatici</b>	<b>unità/(anno · pop · Δ<sub>conc</sub>)</b>	<b>unità</b>	<b>€<sub>2008</sub>/unità</b>
ADULTI			
uso di broncodilatatore	0,163	casi	47,9
tosse	0,335	giorni	53,9
sintomi di affaticamento nella respirazione	0,061	giorni	9,6
BAMBINI			
uso di broncodilatatore	0,078	casi	47,9
tosse	0,267	giorni	53,9
sintomi di affaticamento nella respirazione	0,103	giorni	9,6
OLTRE 65 ANNI			
infarto	1,85E-05	casi	3902,5
<b>Non asmatici</b>			
BAMBINI			
tosse cronica	2,07E-03	episodi	287,3
ADULTI			
giorni di attività ridotta	0,025	giorni	131,7
bronchiti croniche	4,9E-05	casi	202704,9
INTERA POPOLAZIONE			
ricoveri per problemi respiratori	2,07E-06	casi	5171,5
ricoveri per problemi cardiocircolatori	5,04E-06	casi	20027,5
anni di vita persi	4,00E-04	unità	59855,0

Nel caso di Napoli quindi, una riduzione di 1 µg/m<sup>3</sup> nella media del 2008 avrebbe comportato un risparmio annuo complessivo di oltre 30 milioni di euro e quindi 5 µg/m<sup>3</sup> vorrebbero dire risparmi dell'ordine dei 15 milioni di euro. Potrebbero apparire valutazioni molto elevate, ma studi recenti hanno comunque valutato i costi esterni dell'inquinamento da PM10 attorno all'1-1,5% del PIL. Dal calcolo si possono anche estrarre dati specifici: per esempio, 3000 giorni di tosse in più tra i bambini per ogni aumento di 1 µg/m<sup>3</sup> nelle concentrazioni medie o 5 ricoveri in più, per seri problemi cardiocircolatori.

## DOCUMENTIAMOCI

### **La mia Terra (Home)**

Prodotto nel 2009 da Luc Besson e realizzato dal noto fotografo Yann Arthus-Bertran, è un film di grande poesia, un viaggio nella storia e geografia del piano-



ta per documentarne la grandezza e di contro le miserie e lo scempio dello sfruttamento senza limiti. Una straordinaria lezione sulla sostenibilità con un messaggio di speranza per il futuro.

Scaricabile da YouTube: [www.youtube.com/watch?v=jqxENMKaeCU](http://www.youtube.com/watch?v=jqxENMKaeCU)

#### **[annuario.apat.it/](http://annuario.apat.it/)**

Database degli indicatori ambientali a cura di ISPRA, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale. Contiene 240 indicatori sullo stato dell'ambiente in Italia, di cui la maggior parte è aggiornata di anno in anno.

#### **[en.cop15.dk](http://en.cop15.dk)**

Sito web della COP15 di Copenhagen di dicembre 2009 in cui verranno discusse le politiche del dopo-Kyoto.

#### **[europa.eu/legislation\\_summaries/environment/sustainable\\_development/index\\_it.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/environment/sustainable_development/index_it.htm)**

Sezione del sito dell'UE che contiene i principali aspetti della legislazione europea in maniera concisa, facile da leggere e obiettiva nell'ambito dello sviluppo sostenibile.

#### **[hdr.undp.org](http://hdr.undp.org)**

Sito del United Nations Development Program, l'agenzia dell'ONU che si occupa dello sviluppo sostenibile. Vi si possono trovare i dati e i rapporti sull'indice di sviluppo umano dal 1990 a oggi, oltre a numerosi altri indicatori sullo stato del pianeta.

#### **[www.millenniumassessment.org](http://www.millenniumassessment.org)**

Sito del "Millenium Ecosystem Assessment", riporta l'abbondante documentazione dell'iniziativa voluta dalle Nazioni Unite per la valutazione dello stato e dei trend della biodiversità e degli ecosistemi e dei servizi che essi forniscono gratuitamente all'uomo.

#### **[unfccc.int/2860.php](http://unfccc.int/2860.php)**

Sito della United Nations Framework Convention on Climate Change, contiene il testo del Protocollo di Kyoto e i rapporti sullo stato di avanzamento dei vari Paesi rispetto agli obiettivi definiti in quella sede.

#### **[www.beyond-gdp.eu](http://www.beyond-gdp.eu)**

Sito web della conferenza internazionale organizzata da Commissione Europea, Club di Roma, WWF e OCSE per identificare indici adeguati a misurare il progresso di un Paese verso lo sviluppo sostenibile.

#### **Sull'impronta ecologica**

Per calcolare la propria impronta ecologica:  
[www.ecologicalfootprint.com/](http://www.ecologicalfootprint.com/)





[www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/personal\\_footprint/](http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/personal_footprint/)

[www.feem-project.net/pandora/impronta\\_eco.php](http://www.feem-project.net/pandora/impronta_eco.php)

Per calcolare l'impronta emissiva di biossido di carbonio, vale a dire quanto biossido di carbonio viene emesso in funzione dello stile personale di vita o di quello di un'intera comunità:

[www.consumieclima.org/modulo1/footprint.html](http://www.consumieclima.org/modulo1/footprint.html)

[servizi.lifegate.it/newimpattozero/calcolatore\\_htm/calcolatore.html](http://servizi.lifegate.it/newimpattozero/calcolatore_htm/calcolatore.html)

[www.azzeroco2.it/calcolatore](http://www.azzeroco2.it/calcolatore)







## CONCLUSIONI: CHE COSA CI ATTENDE, CHE COSA POSSIAMO FARE

Le tendenze evolutive a livello planetario non sono per nulla incoraggianti. I consumi energetici continueranno inevitabilmente a crescere – e con essi le emissioni inquinanti e i gas climalteranti – in seguito a fenomeni difficilmente controllabili: l'aumento della popolazione mondiale (circa 80 milioni di abitanti in più ogni anno); il continuo consumo di suolo e la crescita dell'urbanizzazione; l'aumento dei redditi nelle economie emergenti e, a cascata, la crescita del tasso di motorizzazione e dei consumi pro capite di energia e beni materiali; la crescita generalizzata della domanda di beni alimentari (e, in modo particolare, dei consumi di carne) prodotti da un'agricoltura fortemente dipendente dal petrolio; l'incremento dei consumi energetici per alimentare la rivoluzione digitale.

Il sistema energetico mondiale è da decenni largamente dipendente dai combustibili fossili. Il petrolio per i trasporti e il gas e il carbone per riscaldamento ed energia elettrica rimangono per il momento, ma non si sa ancora per quanto, le fonti più economiche e accessibili e, soprattutto, sono più facili da usare della maggior parte delle fonti rinnovabili.

D'altra parte, le analisi svolte nei capitoli precedenti non lasciano adito a dubbi. Gli impatti sull'ambiente sono ampiamente documentati ed è ormai largamente riconosciuto, su robustissime basi scientifiche, che i cambiamenti climatici sono reali, sono in atto, sono in fase di accelerazione e sono principalmente causati dall'uomo. Essi costituiscono, per la dimensione del fenomeno, la più grande minaccia al benessere dell'umanità che ci siamo mai trovati ad affrontare. Ridurre le emissioni di gas climalteranti – e quindi la dipendenza dai combustibili fossili – è una priorità assoluta.

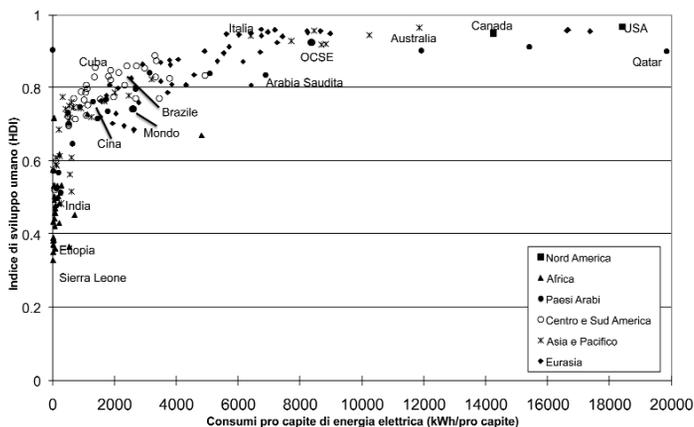
Per questi motivi la questione energetica costituisce il cuore del problema della sostenibilità dello sviluppo e, coerentemente, deve essere affrontata tenendo conto esplicitamente degli aspetti tecnici, di quelli socioeconomici e di quelli ambientali.



## 1. Energia e tecnologie

La relazione tra l'indice di sviluppo umano (ISU) e il consumo pro capite di energia elettrica è illustrata nella Figura 1. Consumi di energia molto bassi corrispondono senz'altro a condizioni sociali (vita media, nutrizione, stato di salute, educazione, delinquenza ecc.) molto critiche. Fino a circa 4000 kWh/anno pro capite l'ISU migliora sensibilmente al crescere della disponibilità di energia. Dal grafico si osserva che i Paesi con indice di sviluppo umano basso e consumo pro capite di energia basso (inferiore ai 1000 kWh) sono i Paesi dell'Africa sub-sahariana e alcuni Paesi dell'Asia; fra 1000 kWh e 4-6000 kWh pro capite si trovano i Paesi emergenti con ISU fra 0,5 e 0,8. Oltre i 4000 kWh pro capite l'ISU cresce poco sopra a 0,9, valore che caratterizza con piccole variazioni tutti i Paesi industrializzati. Per questi Paesi un ulteriore aumento di consumo di energia non migliora praticamente più i parametri principali dello sviluppo umano e sociale: Italia e Canada hanno grosso modo lo stesso ISU, ma i consumi del Canada sono tre volte quelli dell'Italia (bisogna però tener conto che le temperature medie in Canada sono decisamente più basse che in Italia).

Potremmo quindi, con un calcolo abbastanza azzardato, provare a capire che cosa vorrebbe dire fornire a ogni abitante della Terra 4000 kWh/anno (rispetto al consumo medio attuale di circa 2500 kWh). Le stime dell'ONU, che tengono conto della progressiva di-



**Figura 1.** Relazione tra indice di sviluppo umano e consumo di energia elettrica pro capite in 60 nazioni che rappresentano circa il 90% della popolazione mondiale.



Conclusioni: che cosa ci attende, che cosa possiamo fare

261

minuzione della natalità in tutti i Paesi del mondo, prevedono che la crescita demografica si attesterà al di sotto di 10 miliardi di individui. Prendiamo quindi come riferimento questo valore, sia pure con il rischio di ottenere risultati per eccesso. Se moltiplichiamo l'ipotetica domanda pro capite per la popolazione mondiale, otteniamo  $4000 \text{ kWh/ab} \times 10^{10} \text{ ab} = 40.000 \text{ TWh/anno}$ . Il Sole irradia mediamente sulla Terra in un anno oltre 1.500.000 TWh: basterebbe quindi che si riuscisse a utilizzare il 2,5% di questa enorme quantità di energia fornita dal Sole in modo gratuito, rinnovabile e sostenibile, per far raggiungere a tutto il pianeta condizioni di vita che non hanno uguali nella passata storia dell'umanità. Questo semplice conto ci permette di essere relativamente ottimisti per il futuro. Tuttavia la nostra storia (e quello che abbiamo visto in questo libro) ci suggerisce che sfruttare anche solo il 2,5% dell'energia del Sole non è affatto facile.

Tutte le modalità di trasformazione dell'energia conosciute hanno enormi impatti sia per quanto riguarda la produzione, sia per quanto riguarda il consumo dell'energia.

### *1.1 Problemi e possibilità delle energie rinnovabili*

L'utilizzo diretto di Sole e vento ha il difetto di rendere la produzione di energia elettrica e termica dipendente da condizioni meteorologiche variabili, in aperto contrasto con l'affidabilità e sistematicità con cui si richiede la fornitura di energia. Inoltre entrambi questi sistemi di conversione richiedono ampie superfici e quindi l'impatto paesaggistico non è trascurabile, a meno di installare centrali eoliche in mare, lontano dalle coste, e centrali solari in territori desertici, con i relativi problemi logistici e di trasporto.

Lo sfruttamento delle maree e delle onde forse potrebbe risultare meno impattante, ma anch'esse forniscono energia in modo intermittente e, in qualche caso, dipendente dalle condizioni meteorologiche. Allo stato attuale, poi, non disponiamo di tecnologie di conversione efficienti.

Le biomasse, dai boschi alle alghe, forniscono energia con una minore variabilità, poiché possono essere accumulate e successivamente convertite. Presentano tuttavia difficoltà per la raccolta e il trasporto e l'energia spesa per queste azioni può non rendere conveniente il rendimento di conversione, che in ogni caso è assai basso. Solo una piccola parte dell'energia solare, pari circa all'1% di quella che arriva a terra, è catturata dalla fotosintesi; di questa, gli im-





pianti attuali ne sfruttano a fini elettrici solo il 20%: l'efficienza complessiva è quindi circa  $0,01 \times 0,2 = 0,002$ , non molto elevata.

Un ragionamento analogo si può fare a proposito della conversione della biomassa in biocombustibili liquidi da impiegare nei trasporti. A fronte del vantaggio di poter disporre di una fonte di energia più facilmente utilizzabile e gestibile, bisogna pagare in termini energetici un ulteriore passaggio dall'energia del Sole a quella utile, dovuto all'efficienza della produzione del biocombustibile stesso e dell'utilizzo del biocombustibile nel motore. Per ogni utilizzo della biomassa bisogna comunque tener conto dell'interazione con gli altri usi del territorio. In particolare, l'utilizzo di un appezzamento di terreno per colture energetiche (per esempio, olio di palma per biodiesel o granoturco per etanolo) può significare ridurre la produzione di colture alimentari o aumentare la deforestazione. Chiaramente, produrre energia in questo modo non può contribuire alla costruzione di un mondo ecologicamente e socialmente sostenibile.

La geotermia a bassa temperatura può essere una sorgente interessante di energia disponibile quasi ovunque, ma occorre pensare a utilizzi molto localizzati. La geotermia ad alta temperatura è disponibile solo in pochi punti della Terra e non è semplice da sfruttare. L'utilizzo dell'energia nucleare, almeno con l'odierna tecnologia a fissione, pur evitando emissioni di biossido di carbonio, richiede strutture complesse ed estreme misure di contenimento delle emissioni radioattive che rendono la costruzione delle centrali decisamente costosa, tanto che da diversi anni non ne sono più aperte in alcun Paese del mondo. Gli unici cantieri attivi sono quelli del terzo reattore di Olkiluoto, in Finlandia e di Flamanville, in Francia ed entrambi sono in notevole ritardo sui programmi originari e i costi sono decisamente lievitati. Restano poi le due questioni più delicate: lo smaltimento delle scorie nucleari e il pericolo della proliferazione di armi nucleari. Infine, non possiamo dimenticare che anche l'uranio condivide con i combustibili fossili il problema di essere presente nel pianeta in quantità limitata e solo in alcune aree: con il forte aumento della richiesta di uranio degli ultimi anni si è già verificata un'impennata del prezzo. Nonostante la crescita degli investimenti in esplorazione alla ricerca di nuove riserve, presto o tardi, il costo di acquisizione di questi combustibili potrebbe raggiungere valori tali da non renderli più convenienti. D'altra parte, le centrali nucleari a fusione sono per molti aspetti realizzativi ancora difficili da immaginare.





Conclusioni: che cosa ci attende, che cosa possiamo fare

263

L'idrogeno, che non è una fonte di energia, ma un vettore, non esiste come tale in natura e quindi va prodotto utilizzando altre fonti: per esempio, accoppiandolo all'eolico o al fotovoltaico per modulare la variabilità dei cicli produttivi tipici.

Per il prossimo futuro ci aspettiamo un progressivo miglioramento delle tecnologie che utilizzano direttamente l'energia solare. Ogni giorno qualche laboratorio nel mondo annuncia un nuovo record di efficienza raggiunto da una cella fotovoltaica: nuovi materiali possono consentire senza dubbio costi decrescenti e rendimenti più elevati, anche se non potranno ovviare al problema dell'incostanza della fonte solare. Allo stesso modo, si continuano a progettare e produrre turbine a vento sempre più potenti che, grazie a nuove soluzioni costruttive, potranno essere installate soprattutto in mare aperto, distanti dalla costa.

Anche il settore delle biomasse è molto attivo: si sperimentano nuovi processi di pirolisi e si studiano metodi e macchine più efficienti per l'estrazione di biogas e biocombustibili.

Dalle tradizionali centrali a combustibili fossili non possiamo invece aspettarci miglioramenti significativi. Negli anni i rendimenti sono cresciuti grazie al progressivo innalzamento delle temperature e pressioni di processo, ma entrambe queste grandezze hanno limiti fisici che non possono essere superati. Proprio le elevatissime prestazioni raggiunte suggeriscono che per molti anni ancora questo tipo d'impianti costituirà il componente fondamentale della nostra produzione di energia elettrica e termica e la ricerca si concentrerà quindi su come ridurre l'impatto, catturando e stoccando le loro emissioni di biossido di carbonio, un'operazione che presenta ancora delle incognite da un punto di vista sia energetico, sia economico.

### *1.2 Prospettive nuove nel trasporto dell'energia*

Una svolta significativa per tutto il sistema energetico potrebbe invece arrivare non tanto dalla produzione, quanto piuttosto dal trasporto dell'energia, in particolare quella elettrica. Come abbiamo visto nel capitolo "Le tecnologie per la produzione di energia", il 6,5% dell'energia elettrica prodotta in Italia è dissipato in calore dalla rete di trasmissione. L'energia dispersa in questo modo è proporzionale alla resistenza dei cavi di trasmissione, normalmente di rame: se questa resistenza potesse essere ridotta, ci sarebbe un equivalente risparmio di energia. Da molti anni (la scoperta è del fisico olandese H.K. Onnes e risale al 1911) si sa che alcuni materia-



li, detti “superconduttori”, praticamente annullano la propria resistenza elettrica a temperature particolarmente basse, cioè prossime allo zero assoluto (0 K). Tuttavia, verso la fine del '900 sono stati scoperti altri materiali (per esempio, quelli ceramici) che acquisiscono questa proprietà a temperature relativamente “elevate” di 100-120 K (sotto i  $-150$  °C), tali da poter essere raggiunte con un raffreddamento abbastanza economico ad azoto liquido e a pressione atmosferica. Se si scopriranno materiali superconduttori a temperature ancora più facilmente producibili, l'elettricità potrebbe essere trasportata a qualunque distanza a “costo” energetico virtualmente nullo. Ciò renderebbe fattibili grandi centrali solari in remoti deserti o centrali eoliche *offshore* a decine di chilometri dalla costa.

Come abbiamo spiegato nel libro e brevemente richiamato in queste conclusioni, non esiste un unico settore d'intervento, né tanto meno una sola tecnologia, per risolvere il problema di contenere le emissioni climalteranti e ridurre i consumi energetici. È, invece, necessario agire su un'ampia gamma di tecnologie e di settori, ognuno in grado di portare il proprio contributo al raggiungimento dell'obiettivo globale. Già nel 2004 Stephen Pacala e Robert Socolow pubblicarono su “Science” un articolo divenuto famoso, *Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies* (Cunei di stabilizzazione: risolvere il problema del clima per i prossimi 50 anni con le attuali tecnologie), in cui indicavano 15 tecnologie attuali che potevano essere adottate per stabilizzare a 7 Gt/anno di biossido di carbonio le emissioni globali, invece delle 14 Gt/anno che stimavano si sarebbero raggiunte nel 2054 in assenza di interventi. La cosa più interessante è che la gran parte di queste tecnologie è già oggi disponibile!

## 2. Energia ed economia

In questo libro ci siamo occupati soprattutto delle tecnologie di conversione e fornitura dell'energia, ma il problema dell'energia è anche, e forse soprattutto, un problema di tipo economico. Proprio questi aspetti lo legano infatti allo sviluppo dell'umanità in senso più generale.

La storia dell'energia, e in particolare quella più recente (con la disponibilità di combustibili fossili a costi decisamente bassi rispetto al “valore” o alla “ricchezza” che con essi si può produrre) ha fatto sì



Conclusioni: che cosa ci attende, che cosa possiamo fare

265

che l'uomo avesse la sensazione di poter produrre tutta l'energia di cui aveva bisogno. Lo sviluppo delle fonti energetiche è stato decisamente trainato dalla domanda: cresceva il fabbisogno, si trivellavano più pozzi, si pompava più gas.

Solo verso la fine del '900, con la crescita elevatissima di popolazione e consumi, ci si è resi conto che il limite delle risorse fossili non era più così lontano da poter essere tranquillamente ignorato e che il loro utilizzo massiccio comportava alterazioni non trascurabili all'equilibrio ambientale del pianeta. Ci siamo quindi riavvicinati all'idea che l'energia è un bene il cui prezzo dipende dall'equilibrio tra la domanda e l'offerta: la crescita del prezzo del petrolio degli ultimi anni dipende sia dalla progressiva maggior difficoltà di estrazione, sia dall'aumento della sua richiesta. Se a 70 dollari al barile alcune compagnie ottengono sufficienti profitti estraendo petrolio a 6000 m di profondità nel Golfo del Messico, forse a 150 dollari al barile potrebbero ritenere conveniente estrarlo a 10.000 m sotto il Sahara, e a 1000 dollari al barile forse si potrebbe giustificare un ipotetico sistema che riproduca in modo artificiale e accelerato il processo di degradazione delle biomasse vegetali avvenuto in milioni di anni nel sottosuolo. Per questo, l'idea della "fine" del petrolio non è molto utile per comprendere la questione energetica.

L'aumento della domanda (si pensi, per esempio, alla crescita dei trasporti su autoveicoli in Paesi come l'India e la Cina) potrebbe rendere convenienti nuovi metodi di ricerca ed estrazione oggi giudicati impraticabili. Naturalmente, dato che non è l'unica forma di energia utilizzabile, se il prezzo salisse eccessivamente rispetto alle altre fonti, il petrolio sarebbe semplicemente abbandonato. È quindi probabile che tra 50-100 anni il petrolio non sia affatto finito, ma semplicemente non si utilizzi più perché non conveniente. Nel frattempo dobbiamo abituarci all'idea che, comunque, il petrolio sta diventando una risorsa sempre più scarsa. Una volta conclusosi l'attuale ciclo congiunturale negativo, il prezzo tornerà verosimilmente a salire e la volatilità dei prezzi a essere elevata.

La convenienza economica, però, va intesa nel senso più ampio che abbiamo introdotto nel capitolo precedente: non ci sono solo i costi industriali di produzione, ma anche i costi esterni dell'inquinamento e degli altri impatti generati; non ci sono solo i costi operativi, ma quelli dell'intero ciclo di vita. Una fonte energetica e una tecnologia vanno valutate dalla costruzione dell'impianto al suo smaltimento fi-



nale e questa fase, spesso trascurata, può determinare un ribaltamento di quelle che potrebbero apparire le soluzioni preferibili. Il caso delle centrali termonucleari è emblematico in questo senso: solo in questi anni si stanno dismettendo le prime centrali nucleari, costruite negli anni '50 e '60, e nessuno sa bene quanto costeranno le necessarie misure di sicurezza di queste operazioni.

In sintesi, quindi, l'evoluzione dell'energia rimane completamente legata a quella generale dell'economia mondiale: in fase di recessione e di crisi la domanda diminuisce e quindi anche l'interesse verso nuove ricerche e tecnologie di trasformazione; al contrario, in fase di espansione, la domanda aumenta e con essa il prezzo, incentivando così nuove iniziative e nuove possibilità.

### 3. Energia, società e ambiente

Altrettanto forti sono i legami tra il futuro dell'energia e le scelte politiche e sociali di tutti i Paesi del mondo: scelte che influiranno sul futuro di noi tutti per lo stretto legame che esiste tra la produzione dell'energia e i suoi effetti sull'ambiente. Le politiche nazionali, europee e globali devono per forza affrontare contemporaneamente tre aspetti: la disponibilità di energia, la salvaguardia dell'ambiente (incluso il contenimento dei cambiamenti climatici) e la sfera sociale. In altri termini il problema dello sviluppo sostenibile.

#### 3.1 *Le strategie globali*

Il 2009 dovrebbe essere un anno decisivo per quel che riguarda le politiche su clima ed energia. Nel dicembre 2009 si svolgerà l'incontro COP15 a Copenaghen in cui i leader mondiali negozieranno gli obiettivi di riduzione delle emissioni di gas serra successivi al Protocollo di Kyoto (i cui obiettivi dovrebbero essere raggiunti nel 2012).

Il dibattito è soprattutto incentrato sul confronto tra i Paesi più industrializzati e quelli emergenti, perché questi ultimi non accettano di essere penalizzati dagli accordi troppo stringenti auspicati dai primi. Queste dinamiche sono abbastanza semplici da comprendere. I Paesi industrializzati (quelli che fanno parte dell'OCSE) sono responsabili di metà delle emissioni mondiali di biossido di carbonio. I Paesi emergenti (come Russia, ma anche Cina e India) e quelli in via di sviluppo, in cui vive l'80% della popolazione mondiale, sono



Conclusioni: che cosa ci attende, che cosa possiamo fare

267

responsabili dell'altra metà. In questi Paesi i livelli di emissione pro capite sono di gran lunga inferiori a quelli dei Paesi OCSE (India 1,1 t di biossido di carbonio pro capite, Cina 4 t rispetto alle 8,8 t dell'UE e 19,3 degli USA). La sfida degli anni a venire è dunque quella di limitare i cambiamenti climatici e le emissioni di gas serra in atmosfera, diminuire i consumi di energia, puntare sull'efficienza energetica e sulle fonti di energia alternative, eliminare la deforestazione e, allo stesso tempo, promuovere uno sviluppo sociale ed economico che permetta a tutto il pianeta di avvicinarsi agli standard dei Paesi più avanzati.

Le strategie per il clima e l'energia in Europa sono definite dalla recente "politica 20-20-20" che entro il 2020 prevede il 20% di riduzione delle emissioni di biossido di carbonio, il 20% di produzione di energia da fonti rinnovabili e il 20% di riduzione dei consumi di energia. Anche la svolta ecologica della politica energetica degli Stati Uniti promossa dal presidente Barack Obama è destinata a incidere profondamente su tutti gli aspetti del panorama energetico mondiale, così come le linee di sviluppo recentemente enunciate dal governo cinese rappresentano un forte segnale di presa di coscienza da parte della più importante delle economie emergenti. Nel 2007 la Cina, nel primo piano nazionale per combattere i cambiamenti climatici (peraltro imputati principalmente ai Paesi industrializzati), poneva l'obiettivo di ridurre di un quinto i consumi energetici entro il 2010 e di aumentare la quota di energia da fonti rinnovabili. In ogni caso, sembra che ci si stia avviando verso una consapevolezza globale del problema energetico e climatico che però andrà analizzato e affrontato prima di tutto in chiave locale.

### 3.2 *L'azione locale*

Dato l'elevato coinvolgimento del territorio in tutte le forme di energie rinnovabili, le scelte sulle modalità di sviluppo di questo settore dovranno sempre più essere intraprese dalle comunità locali, coinvolgendo tutti i portatori di interesse. Solo così potranno essere definite le azioni più adeguate alle specificità di ogni situazione: per esempio, dove è ragionevole accettare l'impatto visivo di una centrale eolica e dove tetti di case e capannoni possono integrare pannelli termici e fotovoltaici senza compromettere edifici di pregio e di rilevanza storico-artistica, come quelli presenti in molte città d'Italia. Difficilmente potranno essere trovate soluzioni valide e accet-





tate da tutta una regione o da tutto uno Stato. Più facilmente sarà possibile adattare alcune linee guida alle singole esigenze, integrando il problema energetico con tutti gli altri che la qualità della vita in una certa zona coinvolge.

Le singole soluzioni saranno indubbiamente costituite da un mix di fonti diverse, in cui, per molti anni a venire, i combustibili fossili continueranno a essere essenziali, ma in cui crescerà progressivamente il ruolo delle energie rinnovabili assieme alle misure di contenimento dell'inquinamento locale e globale.

Questo approccio locale a un problema globale, che riprende proprio il motto di Agenda 21 "Pensa globalmente, agisci localmente", rappresenterà anche un grandissimo cambiamento dal punto di vista delle reti di distribuzione dell'energia. Le reti attuali, dai gasdotti alle reti elettriche, sono progettate per servire un'utenza diffusa a partire da pochi punti di produzione, mentre una produzione locale implica una rete di distribuzione locale, allacciata alla rete principale. L'effetto è che l'energia potrebbe, contrariamente a quanto accade oggi, non fluire più dalla rete principale alla periferia, ma andare al contrario dalla periferia verso la rete principale o non fluire per nulla quando la produzione locale fosse esattamente in grado di soddisfare la domanda locale. Al di là delle enormi complessità di gestione che questa nuova situazione richiederà per il funzionamento della rete principale, sono possibili grandi vantaggi: le perdite per la trasmissione sarebbero ridotte, eventuali guasti avrebbero conseguenze più ristrette e, infine, si potrebbero innescare nuove possibilità oggi non ipotizzabili.

Tra i possibili scenari, per esempio, c'è quello che riguarda tutti gli strumenti dell'informatica e delle telecomunicazioni. Alcuni dispositivi delle nostre case, come il telefono o il citofono, funzionano con tensioni basse e continue e quindi la normale corrente elettrica alternata a 220 V va raddrizzata con trasformatori per essere utilizzata da questi apparecchi. Fino agli anni '90 nessuno si preoccupava di questi consumi, né dei costi della trasformazione, che apparivano trascurabili rispetto all'energia dell'illuminazione o degli elettrodomestici. La diffusione dell'elettronica ha però radicalmente modificato questa situazione. Nelle nostre case ci sono oggi decine di apparecchi che lavorano con tensioni continue dell'ordine della decina di volt e anche meno: il PC, il cellulare, la tv a cristalli liquidi, il decoder digitale, il modem dell'ADSL e perfino i LED e le lampadine a basso consumo. Quante volte abbiamo dovuto attaccare l'adatta-





Conclusioni: che cosa ci attende, che cosa possiamo fare

269

tore e perdere il tempo a cercare quello giusto! Tutto questo potrebbe essere superato da un sistema di distribuzione dell'energia elettrica a 12 V (come sulle auto) e in corrente continua. Se, infatti, l'energia elettrica proviene da un impianto vicino (per esempio, il pannello fotovoltaico sul tetto della casa) non c'è ragione di portarla a tensioni elevate, perché le perdite lungo la linea sono comunque piccole. Tanto più che i pannelli producono energia elettrica proprio in corrente continua e a basso voltaggio. Se pensiamo al miliardo e più di cellulari e di PC esistenti al mondo, ci rendiamo conto facilmente che anche il risparmio di qualche percento dell'energia dissipata nella conversione costituisce una quantità assoluta rilevante. Oggi si stima che il biossido di carbonio generato dal comparto delle tecnologie informatiche e di comunicazione sia dello stesso ordine di grandezza di quello del trasporto aereo e che sia destinato a crescere in futuro.

### 3.3 *L'indipendenza energetica*

La produzione di energia a scala di comprensorio può venire incontro a un altro problema spesso citato, e spesso trattato in modo incoerente, quello della cosiddetta "indipendenza energetica" di un Paese. S'intende con questo termine la possibilità di decidere liberamente quanta energia consumare, senza vincoli o condizionamenti dall'esterno. Si tratta di una "indipendenza" di cui godono solo pochissimi Paesi del mondo – quelli del mondo arabo e la Russia – che hanno grandi riserve di combustibili fossili e nucleari e una domanda interna tutto sommato ridotta. Nessun Paese dell'UE si trova in questa situazione e l'Italia meno ancora di altri. Le riserve di combustibili fossili in Italia sono, infatti, trascurabili e la domanda di energia è decisamente elevata. Per quanto riguarda le fonti di energia disponibili sul nostro territorio nazionale, oltre all'idroelettrico, da moltissimi anni si sfrutta in Toscana un po' di geotermia e solo molto recentemente si è iniziata l'espansione delle altre fonti rinnovabili. La conseguenza di questa situazione è una fortissima dipendenza dall'estero per le forniture di gas e di petrolio per la conversione in elettricità o benzina attraverso impianti sul territorio nazionale o direttamente per la fornitura di elettricità dalla Francia e dalla Svizzera. Alcuni ritengono che la nostra situazione di dipendenza dall'estero migliorerebbe con la costruzione di centrali nucleari, trascurando il fatto che invece di importare gas e petrolio ci costringerebbe a importare uranio.





Un altro modo suggerito per affrontare il problema è la costruzione di rigassificatori. Si tratta di impianti, concettualmente molto semplici, che fanno tornare di nuovo alla forma gassosa il gas trasportato su navi in forma liquida: il gas viene liquefatto dopo la sua estrazione, caricato su navi apposite (le gasiere) a temperature molto basse e pressioni elevate, trasportato fino ai punti di attacco dei gasdotti e quindi fatto espandere naturalmente per ritornare in forma gassosa ed essere immesso in rete. Tutto a spese solo di un certo raffreddamento dell'acqua del mare usata per riportare il gas a temperatura ambiente. Si tratta di impianti di impatto limitato, ancora poco diffusi in Italia e nel mondo, per ragioni soprattutto di sicurezza. Un'eventuale esplosione della nave che trasporta il gas o dell'impianto, date le quantità estremamente elevate che sono in gioco (dell'ordine delle decine di migliaia di tonnellate) potrebbe procurare danni a un'area molto vasta. Anche se storicamente incidenti di questo genere sono stati rarissimi, è comprensibile che molte comunità locali si oppongano alla loro costruzione.

Questi modi di procedere, pur non migliorando la nostra dipendenza energetica dall'estero, consentirebbero però una più ampia scelta di Paesi fornitori e ci darebbero quindi un maggior margine di manovra nelle trattative per la definizione delle forniture. Essere invece vincolati all'acquisizione attraverso condotte, come avviene oggi, ci mette in una posizione di svantaggio, poiché è chiaro che possiamo approvvigionarci solo dove la condotta esiste. Si capisce facilmente quanto la fornitura possa apparire poco affidabile quando poi il gasdotto o l'oleodotto attraversa diversi Paesi (qualcuno ricorderà senz'altro le aspre polemiche tra Russia e Ucraina, che è appunto attraversata dal gasdotto che interessa all'Italia) o addirittura zone in guerra.

Sempre a proposito del problema dell'indipendenza, vale la pena di ricordare come occorra ormai ragionare più da cittadini dell'Europa, piuttosto che della sola Italia. L'UE si è data una politica comune sull'energia e una trattativa con Paesi fornitori condotta dall'UE ha una forza ben diversa da quella di un singolo Paese. Importare energia dalla Francia non può quindi essere considerato una minaccia all'indipendenza energetica della nazione, come invece importare gas dall'Algeria. Se si utilizzasse, come qualcuno ha anche tentato di imporre, lo stesso criterio nelle regioni italiane succederebbe che la Lombardia sarebbe fortemente debitrice verso le altre regioni e la Provincia Autonoma di Trento, grazie alla sua elevata produzione





Conclusioni: che cosa ci attende, che cosa possiamo fare

271

idroelettrica, sarebbe tra le poche aree del Paese a potersi ritenere indipendente. Come si diceva, il modo corretto di affrontare il problema non è il punto di vista dell'indipendenza, ma quello dell'integrazione, del coordinamento e della diversificazione delle fonti di approvvigionamento energetico: reti locali che servono comprensori limitati in base alla propria vocazione (idroelettrico, eolico, solare, biomasse, gas ecc.), ma si scambiano energia quando serve appoggiandosi al grande volano rappresentato dalla rete europea.

#### 4. I nostri comportamenti e l'energia

Qual è il nostro ruolo personale nella questione globale dell'energia? Diciamo che è lo stesso che stiamo lentamente acquisendo sul problema dei rifiuti. Come in quel caso ci stiamo lentamente abituando a ridurre, separare, riciclare, così dobbiamo comportarci nei confronti dell'energia: ridurre il consumo, evitare lo spreco.

È impensabile che l'umanità possa proseguire il suo cammino sul pianeta senza lasciare un'impronta e un cambiamento non trascurabili. Non c'è modo di proseguire il miglioramento della qualità della vita, soprattutto nei tre quarti della Terra che tuttora è in condizioni più difficili, senza incrementare l'uso delle risorse e del territorio. Tuttavia, ciò non significa che non dobbiamo prendere ogni precauzione perché l'impatto sia il minore possibile. Non c'è dubbio che dobbiamo cominciare subito a modificare alcune abitudini che oggi diamo per scontate o non degne della nostra attenzione. Spegnere le luci inutili, tenere bassi il riscaldamento e il condizionatore, staccare gli adattatori inutilizzati di telefonini, lettori multimediali, computer che consumano energia anche quando il dispositivo non è collegato, sostituire le lampade e gli elettrodomestici con apparecchi più efficienti sono piccole azioni accessibili a tutti, che possono dare un contributo.

Ma ci sono anche altre cose che dobbiamo cominciare a cambiare: siamo certi di essere ammirati da tutti se abbiamo un'auto che fa da 0 a 100 km/h in 6 secondi, quando nelle nostre città si circola in media a 20-30 km/h? È sicuro che le uniche vacanze rilassanti siano nelle isole del Pacifico? La nostra dieta non può proprio fare a meno di carne tutti i giorni (che magari viene dall'Argentina) o delle ciliegie in pieno inverno, che forse arrivano dal Cile? Perché dobbiamo trasportare su gomma tutte le merci che potrebbero viaggiare su rotaia?





Grazie alle nuove tecnologie della comunicazione non si potrebbe davvero fare una parte del proprio lavoro senza doversi necessariamente spostare per decine di chilometri?

Già oggi le teleconferenze, la teledidattica e i ristoranti “a chilometri zero”, cioè che offrono solo prodotti del proprio territorio, sono sempre più diffusi. Non si tratta di un ritorno alla vita primitiva, ma di sfruttare al meglio tutte le nostre conoscenze per dare moderna concretezza a quanto i nativi americani hanno tramandato nella loro tradizione con una suggestiva frase:

“Non abbiamo avuto la Terra in eredità dai nostri padri, ma in prestito dai nostri figli”.





## PER APPROFONDIRE

SERGIO CASTELLARI, VINCENZO ARTALE (A CURA DI), *I cambiamenti climatici in Italia: evidenze, vulnerabilità ed impatti*, Bononia University Press, 2009.

Questo volume raccoglie i contributi dei principali studiosi italiani impegnati nella ricerca sui cambiamenti climatici e presenta una rassegna degli effetti già osservabili, delle proiezioni future e degli impatti su diversi sistemi e settori dell'area italiana e mediterranea.

NICHOLAS STERN, *Clima è vera emergenza*, Brioschi, 2009.

Lo studio, commissionato all'autore dal ministero del Tesoro britannico nel 2006 e durato due anni, contiene una dettagliata analisi sui cambiamenti climatici e sugli impatti attesi. In particolare, si concentra sulle misure economiche da adottare per la riduzione delle emissioni di gas serra e la mitigazione degli impatti.

“THE ECONOMIST” (A CURA DI), *Il mondo in cifre 2009*, Fusi orari, 2008.

Il libro di classifiche e statistiche compilato ogni anno dalla redazione di “Economist”, autorevole settimanale di economia e politica inglese. Le statistiche raccolte riguardano 186 Paesi del mondo e trattano temi vari relativi, tra gli altri, a economia, energia, infrastrutture, agricoltura, ambiente, commercio di materie prime.

MICHAEL POLLAN, *Il dilemma dell'onnivoro*, Adelphi, 2008.

Pollan descrive nel libro tre tipologie di pasti: quello al fast-food, quello con carne, verdura e frutta prodotti secondo metodi industriali e quello con carne, verdura e frutta prodotti secondo agricoltura biologica, seguendo tutta la catena produttiva che porta dalla coltivazione del mais per la mucca fino alla bistecca servita sul nostro piatto. Il tutto accompagnato da osservazioni sulle implicazioni sociali e ambientali di come è impostata l'industria ali-



mentare nel mondo sviluppato in generale e negli Stati Uniti in particolare.

LEONARDO MAUGERI, *L'era del petrolio. Mitologia, storia e futuro della più controversa risorsa del mondo*, Feltrinelli, 2006.

La storia dell'ascesa del petrolio a risorsa più importante del nostro tempo. L'autore descrive in modo molto interessante i metodi di estrazione del petrolio, di esplorazione di nuove riserve e le stime attualmente disponibili. La tesi sostenuta è che ci sia abbondante disponibilità di petrolio, a patto di migliorare le tecnologie di estrazione e di esplorazione.

LEONARDO MAUGERI, *Con tutta l'energia possibile*, Sperling & Kuper, 2008.

Un'eccellente riflessione su storia, limiti e potenzialità delle principali fonti di energia fossili, rinnovabili e nucleari da parte del direttore strategie e sviluppo dell'ENI.

GIANLUCA RUGGIERI, PIETRO RAITANO, *La vita dopo il petrolio. Il mondo e la fine dell'energia a buon mercato*, Terre di Mezzo, 2008.

Il volume raccoglie 12 interviste a esperti di fama internazionale sulla fine dell'era petrolifera e del petrolio a basso costo. Grazie alle diverse provenienze professionali degli intervistati, offre risposte e spunti di discussione su svariati temi: dall'alimentazione ai trasporti, dalla finanza alla medicina, dalla crescita demografica all'utilizzo di materie prime.

GIANFRANCO BOLOGNA, *Manuale della sostenibilità. Idee, concetti, nuove discipline capaci di futuro*, Edizioni Ambiente, 2008.

L'autore ricostruisce il significato del termine "sostenibilità" dagli autori classici, alle nuove proposte interdisciplinari che ne disegnano le prospettive future, in un mosaico ben documentato che restituisce tutta la ricchezza del dibattito in corso. L'ultima parte del volume è dedicata all'approfondimento di due emergenze di portata globale: il cambiamento climatico e la progressiva distruzione della diversità biologica.

GEORGE MONBIOT, *Calore!*, Longanesi, 2007.

Dopo un'analisi sui cambiamenti climatici e gli impatti attesi, l'autore descrive scenari di drastiche riduzioni delle emissioni di gas serra che consentirebbero di evitare conseguenze disastrose. Il libro pre-



senta, con un taglio giornalistico, un'interessante analisi di come perseguire queste politiche e dimostra come una sostanziale riduzione delle emissioni sia fattibile.

UMBERTO COLOMBO, *Energia. Storia e scenari*, Donzelli, 2005.

Il volume affronta lo stretto legame tra energia e sviluppo. Attenzione è dedicata al tema della disponibilità di energia, dei "limiti dello sviluppo" e degli impatti dell'attività antropica sull'ambiente. Sono discussi gli scenari tecnologici, ambientali e culturali che la società odierna può aspettarsi nel futuro.

JEFFREY D. SACHS, *La fine della povertà. Come i paesi ricchi potrebbero eliminare definitivamente la miseria dal pianeta*, Mondadori, 2005.

L'autore descrive le proprie esperienze come consulente economico nei Paesi in via di sviluppo e propone azioni e politiche per debellare la povertà estrema. Sachs è stato consulente dell'ONU dal 2002 al 2006 e ha collaborato alla stesura degli "Obiettivi di sviluppo del millennio" approvati dai 191 Paesi membri dell'ONU. Nel libro mostra come molti di questi obiettivi siano perseguibili entro il 2025 a costi spesso contenuti.



VACLAV SMIL, *Storia dell'energia*, Il Mulino, 2000.

Il libro mostra come la storia dell'uomo e quella delle società umane siano da sempre legate all'utilizzo e alla disponibilità dell'energia: dalla forza muscolare dell'uomo usata nella preistoria, all'energia fornita dagli animali nelle società agricole tradizionali, all'energia idraulica o eolica nelle prime macchine preindustriali, fino all'energia fornita dai combustibili fossili nella società industriale contemporanea. Mentre la complessità socioeconomica e il benessere aumentano, aumenta anche l'uso dell'energia.

JARED DIAMOND, *Armi, acciaio e malattie. Breve storia del mondo negli ultimi tredicimila anni*, Einaudi, 1998.

Come suggerisce il titolo, il libro racconta la storia dell'evoluzione del genere umano, mostrando come le diversità culturali e i diversi modi di utilizzare l'energia affondino le loro radici in diversità geografiche, ecologiche e territoriali sostanzialmente legate al caso.











