



# **LA TRANSIZIONE ENERGETICA**

## **PETROLIO, GAS NATURALE E CARBONE A CONFRONTO**

**Amici della terra**



# INDICE

CAPITOLO 1: I SISTEMI ENERGETICI DEL FUTURO E LA TRANSIZIONE .....	7
1.1    I PRINCIPI FONDAMENTALI DELLA SOSTENIBILITA' ENERGETICA.....	7
1.2    IL POTENZIALE DELLE FONTI RINNOVABILI.....	11
1.3    L'IDROGENO.....	18
1.4    LA TRANSIZIONE VERSO LA SOSTENIBILITA' ENERGETICA.....	23
CAPITOLO 2: PETROLIO, GAS NATURALE E CARBONE A CONFRONTO.....	25
2.1    RISERVE PROVATE E TEMPO DI ESAURIMENTO .....	25
2.2    DISTRIBUZIONE DELLE RISERVE PROVATE E STABILITA' DELL'OFFERTA .....	28
2.3    IL COSTO SOCIALE DI ESAURIBILITA' DELLE FONTI FOSSILI.....	32
2.4    IL RENDIMENTO DI SECONDO PRINCIPIO .....	36
2.5    EMISSIONI DI GAS SERRA .....	43
2.6    ESAURIBILITA', EFFICIENZA, EFFETTO SERRA: UNA VALUTAZIONE CONGIUNTA.....	48
CAPITOLO 3: CONSUMI DI COMBUSTIBILI FOSSILI IN ITALIA E NEL MONDO .....	55
3.1    LA RINUNCIA ITALIANA AL CARBONE.....	55
3.2    IL CONCETTO DI SPAZIO AMBIENTALE APPLICATO AI COMBUSTIBILI FOSSILI .....	58
3.3    UNA POSSIBILE EVOLUZIONE DEI CONSUMI MONDIALI DI COMBUSTIBILI FOSSILI .....	62
CAPITOLO 4: ESTERNALITA' E TECNOLOGIE PULITE DEL CARBONE .....	67
4.1    COMBUSTIBILI E ESTERNALITA'.....	67
4.2    L'USO PULITO DEL CARBONE CON LE ATTUALI TECNOLOGIE: IL CASO DI BRESCIA .....	70
4.3    LE TECNOLOGIE EMERGENTI PER L'USO PULITO DEL CARBONE.....	73
4.4    LA PRODUZIONE DI IDROGENO DA CARBONE.....	78
BIBLIOGRAFIA.....	80



*“Occorre costruire un ponte fino a quando avremo un’economia basata sul patrimonio energetico naturale, riservando petrolio e gas naturale all’industria petrolchimica e conservandone il più possibile nel sottosuolo per i casi di emergenza. Occorre sviluppare l’utilizzazione sofisticata del carbone, soprattutto in impianti di piccola scala. Tra le tecnologie di transizione, le più apprezzabili appaiono quelle basate su un impiego efficiente di questo combustibile così largamente diffuso”.*

Amory B. Lovins, 1976



# **CAPITOLO 1: I SISTEMI ENERGETICI DEL FUTURO E LA TRANSIZIONE**

## *1.1 I PRINCIPI FONDAMENTALI DELLA SOSTENIBILITA' ENERGETICA*

Se si guarda all'intensità energetica come indicatore del grado d'efficienza nell'utilizzo dell'energia, l'Italia appare avvantaggiata, in un percorso verso la sostenibilità, rispetto alla maggior parte dei Paesi industrializzati; al contrario, molti Paesi meno sobri di energia rispetto all'Italia sembrano più preparati, specialmente per quanto riguarda le posizioni della classe politica, ad avviare iniziative verso obiettivi di sostenibilità energetica. Nel complesso, comunque, i sistemi energetici di tutti i Paesi industrializzati, tra cui l'Italia, risultano molto lontani dalla sostenibilità essenzialmente per i seguenti motivi:

- essi sono caratterizzati da un'efficienza molto bassa, di molto inferiore ai valori tecnicamente raggiungibili;
- sono prevalentemente fondati sull'uso di risorse fossili non rinnovabili, il che contrasta con gli obiettivi di sostenibilità per più di un aspetto, come meglio illustrato in seguito.

I sistemi energetici del futuro dovranno necessariamente essere fondati su fonti non esauribili. Sebbene lentamente, l'opzione nucleare –anche se continua ad essere riproposta in alcune sedi internazionali- sta perdendo consensi a causa degli elevati costi e dell'elevata intensità di capitali, dei problemi di sicurezza, delle incertezze sul destino finale delle scorie radioattive, dei rischi di proliferazione delle armi nucleari e della scarsa accettabilità da parte dell'opinione pubblica. La posizione dell'Unione Europea è quella di lasciare aperta questa opzione per i Paesi che intendano proseguirla; il Parlamento europeo l'ha più volte definita un'operazione costosa e inadatta a risolvere i problemi energetici del futuro, mentre la riluttanza del Congresso Americano ha per il momento fermato il progetto internazionale di grande scala, ITER, sulla fusione termonucleare.

Le fonti energetiche rinnovabili derivate dall'energia solare rappresentano l'opzione riconosciuta capace di garantire la sostenibilità dei futuri sistemi energetici. Un insieme di tecnologie, già oggi mature o in fase di sviluppo, potrà consentire di soddisfare la domanda di energia tanto dei Paesi sviluppati che di quelli in via di sviluppo senza ricorrere né ai combustibili fossili né all'energia nucleare. Queste tecnologie, diversificate, adeguate in scala, distribuzione geografica e qualità alle necessità degli usi finali, possono consentire di eliminare pesanti strutture centralizzate, di diminuire le perdite di distribuzione, di adeguare l'offerta alla domanda con flessibilità e rapidità. Esse consentono inoltre un sostanziale decentramento della politica e della gestione dell'energia.

La radiazione solare al suolo è abbondante in tutti i Paesi (in Italia varia tra 1 e 1,5 milioni di kcal/m<sup>2</sup> anno). Per arrivare a sistemi energetici interamente fondati sull'energia solare è necessario captarla e convertirla nella forma utile con una buona efficienza e, soprattutto, superare l'ostacolo della sua intermittenza temporale mediante la realizzazione di opportuni sistemi di accumulo. Esiste la possibilità di accumulare energia in varie forme: meccanica, elettrica, termica, chimica; quest'ultima forma, cioè la trasformazione dell'energia solare in idrogeno o in altri combustibili di sintesi (etanolo, metanolo), si qualifica tra le più interessanti in quanto tali combustibili possono divenire tecnicamente compatibili con le attuali tecnologie di utilizzo nei vari settori, in particolare in quello dei trasporti.

Dopo il primo allarme scientificamente argomentato lanciato nel 1972 dal Club di Roma con "I limiti dello sviluppo", numerosi documenti di istituzioni internazionali hanno trattato la materia dello sviluppo sostenibile e in particolare delle politiche energetiche sostenibili: per citare solo i principali, il Rapporto Brundtland, l'Agenda 21, il Quinto programma politico e d'azione della Comunità Europea a favore dell'ambiente e di uno sviluppo sostenibile, i numerosi rapporti prodotti dall'IPCC, il libro bianco della Commissione Europea sulle fonti rinnovabili di energia.



Anche se non sempre enunciati e illustrati in forma organica, i principi fondamentali che, secondo questi documenti, dovrebbero guidare, in un'ottica di sostenibilità, le politiche dell'energia sono sostanzialmente i seguenti:

- rispettare la capacità ricettiva e funzionale dell'ambiente;
- ridurre gradualmente il ricorso alle fonti fossili fino ad annullarlo prima del loro esaurimento;
- garantire un'equa ripartizione delle risorse energetiche tra Paesi sviluppati e Paesi in via di sviluppo.

Si tratta di principi il cui rispetto non potrà certo essere garantito dall'impegno di singoli Paesi né dal ricorso ai consueti meccanismi di mercato.

Mentre si è cominciato ad affrontare, sia a livello di politiche nazionali che di accordi internazionali, il problema della capacità ricettiva e funzionale dell'ambiente, quello dell'esauribilità e quello di un'equa ripartizione sono toccati solo marginalmente dalle trattative in materia di cambiamenti climatici; anch'essi andrebbero invece prontamente affrontati per evitare conseguenze traumatiche, nel medio termine, sull'economia e sugli equilibri politici. La loro soluzione, in un'ottica di sostenibilità, implica una svolta culturale senza precedenti nei rapporti internazionali e richiede di percorrere la transizione energetica verso sistemi fondati sulle fonti rinnovabili attraverso un ricorso concordato e programmato a carbone, petrolio e gas naturale ben diverso, per quantità assolute e relative, da quello attuale.

Le attuali politiche energetiche non sono sufficientemente orientate –o non lo sono affatto- al rispetto di questi principi. Se è vero che da qualche decennio governi e istituzioni internazionali hanno stabilito alcune regole ed accordi finalizzati a proteggere la capacità ricettiva e funzionale dell'ambiente, è altrettanto noto che queste misure sono state adottate con ritardo e sono inadeguate. Lo dimostrano il continuo inasprimento delle normative sull'inquinamento atmosferico, la lentezza con cui esse vengono messe a punto e rese operative (è emblematico il caso del programma europeo Auto Oil tendente alla riduzione delle emissioni dei trasporti stradali), le allarmanti

conclusioni di recenti ricerche condotte da organismi internazionali come la stessa Unione europea e l'Organizzazione Mondiale della Sanità; l'inadeguatezza e la non sostenibilità della Convenzione Quadro sui Cambiamenti Climatici e del Protocollo di Kyoto si commentano da sole se si confronta la modestia degli obiettivi concordati (che con ogni certezza non saranno nemmeno raggiunti) con la riduzione delle emissioni di gas serra indicata dallo stesso IPCC come necessaria per stabilizzarne la concentrazione a livelli non troppo superiori a quelli attuali e per evitare aumenti di temperature superiori a 0,1°C per decennio (almeno il 50% a livello mondiale entro il 2050).

Quanto agli altri principi, quello relativo all'esauribilità e quello relativo all'equità, essi vengono nella pratica completamente ignorati; e non potrebbe accadere diversamente, dato che il consumo delle risorse fossili è unicamente governato dalle forze di mercato, che tendono ad essere miopi, a ignorare le conseguenze di lungo termine. Il problema dell'esauribilità dei combustibili fossili è particolarmente serio, perché ad essi è affidato il compito di consentire all'umanità di percorrere, possibilmente senza traumi, la transizione verso i sistemi energetici del futuro; è quindi importante che a livello mondiale se ne controlli il prelievo in modo da evitarne l'esaurimento prima che la fase di transizione sia completata.

Il principio di equità richiede che venga garantita un'equa ripartizione di tutte le risorse e in particolare di quelle fossili, tra Paesi industrializzati e Paesi in via di sviluppo. Si tratta di un concetto proposto da molti organismi non governativi sin dagli anni '60, che si è via via fatto strada presso istituzioni internazionali come le Nazioni Unite, l'Unione Europea, l'OCSE e la Banca Mondiale. I Paesi ricchi dovrebbero garantire un adeguato accesso alle risorse fossili anche ai Paesi poveri, proprio per consentirne il graduale sviluppo e per evitare pesanti conseguenze sugli equilibri politici internazionali.

Non si può fare a meno di osservare che il crescente ricorso al gas naturale, praticato in questi anni dai Paesi sviluppati, consente ad essi di risolvere in modo relativamente semplice molti problemi ambientali e di ridurre o contenere le emissioni di anidride carbonica; ma contravviene agli ultimi due principi della sostenibilità energetica, quello relativo all'esauribilità e quello relativo all'equità. Il gas è un combustibile pregiato,

versatile, che può essere impiegato mediante tecnologie semplici e affidabili; non è giusto che i Paesi sviluppati, che già ne consumano la quota maggiore, ne accelerino l'esaurimento a detrimento dei Paesi in via di sviluppo.

## *1.2 IL POTENZIALE DELLE FONTI RINNOVABILI*

In un recente studio sulle fonti rinnovabili di energia effettuato per conto del Ministero dell'Ambiente, gli Amici della Terra hanno approfondito il ruolo che tali fonti possono assumere nel disegnare un nuovo percorso energetico ambientalmente sostenibile. Nello studio vengono illustrate in dettaglio le qualità positive e quelle negative delle fonti rinnovabili, viene introdotto il concetto di "giacimento" d'energia rinnovabile, e viene dimostrato che i fattori che limitano il potenziale effettivamente praticabile sono:

- l'intermittenza temporale;
- la scarsa fruibilità in settori di consumo diversi da quello elettrico.

Riportiamo qui di seguito le principali conclusioni dello studio.

Il territorio possiede una valenza energetica in relazione alla quantità di energia solare, primaria e derivata, che insiste su di esso. Si considera come energia primaria quella associata alla radiazione solare globale, sia diretta che diffusa, che complessivamente raggiunge il suolo. Inoltre, su ogni m<sup>2</sup> di terreno, è presente anche una certa quantità di energia solare derivata, quale si può considerare quella cinetica del vento e quella idraulica connessa alla raccolta di acqua piovana. Pertanto, al livello del suolo, si trovano presenti tre forme di energia:

1. l'energia associata alla radiazione solare globale, sia diretta, che diffusa, presente al suolo;
2. l'energia del vento;
3. l'energia potenziale dell'acqua delle piogge, che si raccoglie nei bacini naturali e artificiali o che fluisce nei torrenti e nei fiumi.

A loro volta, da queste forme di energia derivano quelle che solitamente vengono indicate come le fonti rinnovabili, cioè:

- l'energia eolica, elettricità derivante dallo sfruttamento dell'energia cinetica del vento;
- l'energia solare termica, ottenuta dalla conversione termica della radiazione solare;
- l'energia solare termodinamica, elettricità ottenuta attraverso la conversione termoelettrica dell'energia solare termica;
- l'energia fotovoltaica, ricavata dalla conversione diretta della radiazione solare in elettricità;
- l'energia delle biomasse, calore e/o elettricità derivante dal concorrente apporto sulle coltivazioni di piante da parte della radiazione solare, dell'acqua piovana e delle sostanze nutrienti del terreno;
- l'energia idroelettrica, ottenuta attraverso la conversione elettromeccanica dell'energia cinetica dei flussi d'acqua.

E' allora intuibile che la quantità di energia, disponibile sul terreno per lo sfruttamento, è una grandezza locale, collegata strettamente al sito, sia attraverso i parametri geografici (caso della radiazione solare), sia attraverso le condizioni climatiche generali e microclimatiche puntuali (ventosità, piovosità e morfologia del terreno). Per questo motivo e per analogia concettuale con le risorse energetiche non rinnovabili, le forme assunte dall'energia rinnovabile possono essere pensate come se fossero strettamente inerenti al territorio ed immagazzinate in altrettanti "giacimenti", ciascuno caratterizzato dalla densità superficiale di energia, che si rende disponibile annualmente per lo sfruttamento (potenziale energetico locale). Si avrà, così, il giacimento eolico, quello solare termico e termodinamico, quello fotovoltaico, quello delle biomasse e quello idraulico. Ciascuno di questi giacimenti, rispetto a quelli energetici tradizionali (es. carbone e petrolio), possiede due notevoli differenze:

1. la prima consiste nel fatto che l'energia chimica immagazzinata nei giacimenti di idrocarburi fossili è statica, nel senso che essa può rimanere anche per lunghissimi periodi di tempo ferma e concentrata in attesa di sfruttamento. Al contrario, per le

energie rinnovabili, la caratteristica principale è costituita dalla loro “fluenza casuale”, sia temporale, sia spaziale. Ciò ha come naturale conseguenza che i sistemi di sfruttamento delle fonti rinnovabili devono catturare i flussi di energia in tempo reale, o attraverso tecnologie di conversione diretta, o attraverso mezzi di accumulo per il successivo sfruttamento (es. bacini idroelettrici e coltivazioni di biomasse).

2. la seconda differenza consiste nel fatto che l’energia delle fonti rinnovabili possiede una bassa densità rispetto al territorio. Infatti la quantità di energia presente per unità di superficie ha un valore notevolmente più basso di quello corrispondente ai depositi di idrocarburi.

Queste due caratteristiche, comuni a tutti i tipi di energia rinnovabile, si riflettono in modo penalizzante sui costi di produzione dell’unità di energia e costituiscono oggettivamente altrettanti aspetti di svantaggio per lo sviluppo delle fonti rinnovabili. Tuttavia, soprattutto in relazione alle promettenti caratteristiche ambientali, resta fermo il fatto che, attraverso adeguate tecnologie di conversione energetica, risulta conveniente attingere energia dai giacimenti rinnovabili per portare un contributo rilevante al soddisfacimento delle esigenze energetiche dell’umanità nel quadro di uno sviluppo sostenibile.

In definitiva, nella rappresentazione logica qui adottata e in uno scenario di produzione di energia rinnovabile su larga scala, il territorio, corredato dai suoi “giacimenti” di energia, viene ad assumere l’aspetto di una vera e propria risorsa, comune a tutte le forme di energia rinnovabile. Il processo di sfruttamento di tutti i giacimenti passa attraverso una più o meno pronunciata occupazione del suolo, che, in tal modo, si viene a porre come condizione necessaria per l’attuazione del processo di produzione di energia.

I giacimenti di energia rinnovabile, pensati come se appartenessero al territorio, vengono “coltivati” con le opportune tecnologie di trasformazione per dar luogo ad alcuni prodotti energetici collocabili sul mercato: calore, elettricità, bio-idrocarburi.

L'adozione di questo modello concettuale rende disponibile un metodo di confronto tra le varie opzioni rinnovabili che si presentano su un determinato sito. Infatti, a prescindere dal tipo di energia prodotto, si può effettuare una valutazione delle varie quantità di energia annualmente producibili da ciascuna fonte su ogni m<sup>2</sup> di terreno. Ciò permette, soprattutto in relazione ai rispettivi costi di produzione dell'energia, di avere alcuni elementi di decisione in merito alle scelte strategiche.

La tabella 1 fornisce, per ciascuna fonte e con riferimento allo stato attuale delle tecnologie di sfruttamento, la densità superficiale di energia tipica dell'Italia e dell'Europa meridionale. I valori indicati sono su base annua e sono espressi in GWh/km<sup>2</sup> se l'energia è ottenuta sotto forma di elettricità, in TJ/km<sup>2</sup> (TJ=terajoule=10<sup>12</sup> Joule) se l'energia è ottenuta in forma termica (chimica nel caso di biocombustibili). Per eliminare questa disomogeneità ed agevolare i confronti, nell'ultima colonna è riportata la quantità di petrolio, espressa in tonnellate equivalenti di petrolio (tep), necessaria per ottenere, in impianti convenzionali, le stesse quantità di energia ottenibili dalle fonti rinnovabili esaminate: in altre parole, l'ultima colonna rappresenta la quantità di petrolio che può essere annualmente risparmiato per ogni km<sup>2</sup> di territorio "coltivato" con la rispettiva fonte rinnovabile.

La tabella 2, analoga alla precedente, si riferisce all'evoluzione prevedibile nel medio termine per le varie tecnologie di sfruttamento.

**Tab. 1 : Situazione attuale della densità superficiale di energia rinnovabile sul territorio tipica del Sud Europa**

<b>Fonte rinnovabile</b>	<b>Tipo d'energia Prodotta</b>	<b>Densità d'energia sul terreno (E/km<sup>2</sup>)</b>	<b>Energia chimica equivalente al petrolio per km<sup>2</sup></b>
<b>Eolico</b>	Elettrica	13 ÷ 18 GWh	( 2.9 ÷ 4.0 ) 10 <sup>3</sup> tep
<b>Solare termico</b>	Termica	736 ÷ 800 TJ	( 21 ÷ 22 ) 10 <sup>3</sup> tep
<b>Solare termodinamico</b>	Elettrica	30 ÷ 41 GWh	( 6.7 ÷ 8.9 ) 10 <sup>3</sup> tep
<b>Solare fotovoltaico</b>	Elettrica	68 ÷ 76 GWh	( 15 ÷ 17 ) 10 <sup>3</sup> tep
<b>Biomasse: usi termici</b>	Termica	24 ÷ 42 TJ	( 0.57 ÷ 1.0 ) 10 <sup>3</sup> tep
<b>Biomasse: biocombustibili</b>	Chimica	1 ÷ 3 TJ	( 0.024 ÷ 0.072 ) 10 <sup>3</sup> tep
<b>Idroelettrico</b>	Elettrica	0.02 ÷ 0.06 GWh	( 0.004 ÷ 0.013 ) 10 <sup>3</sup> tep

**Fonte:** *Amici della Terra*

**Tab. 2 : Situazione in prospettiva di medio termine della densità superficiale di energia rinnovabile con il miglioramento delle tecnologie**

<b>Fonte rinnovabile</b>	<b>Tipo d'energia Prodotta</b>	<b>Densità d'energia sul terreno (E/km<sup>2</sup>)</b>	<b>Energia chimica equivalente al petrolio per km<sup>2</sup></b>
<b>Eolico</b>	Elettrica	18 ÷ 25 GWh	( 4.0 ÷ 5.5 ) 10 <sup>3</sup> tep
<b>Solare termico</b>	Termica	981 ÷ 1067 TJ	( 23 ÷ 25 ) 10 <sup>3</sup> tep
<b>Solare termodinamico</b>	Elettrica	60 ÷ 82 GWh	( 13.4 ÷ 17.8 ) 10 <sup>3</sup> tep
<b>Solare fotovoltaico</b>	Elettrica	100 ÷ 114 GWh	( 22 ÷ 25 ) 10 <sup>3</sup> tep
<b>Biomasse: usi termici</b>	Termica	24 ÷ 42 TJ	( 0.57 ÷ 1.0 ) 10 <sup>3</sup> tep
<b>Biomasse: biocombustibili</b>	Chimica	2 ÷ 6 TJ	( 0.048 ÷ 0.144 ) 10 <sup>3</sup> tep
<b>Idroelettrico</b>	Elettrica	0.02 ÷ 0.06 GWh	( 0.004 ÷ 0.013 ) 10 <sup>3</sup> tep

**Fonte:** *Amici della Terra*

Immaginando in via cautelativa di utilizzare un mix di fonti caratterizzato da una densità di energia pari mediamente a  $15 \times 10^3$  tep/km<sup>2</sup>, si deduce che per produrre in un anno una quantità di energia pari a 180 Mtep (l'attuale fabbisogno italiano di fonti fossili, incluso l'equivalente dell'energia elettrica importata), sarebbe necessaria una occupazione di spazio dell'ordine di 12000 km<sup>2</sup>, poco più della metà della superficie che una ricerca del CNR –Progetto Finalizzato Energetica- aveva individuato come terreno agricolo abbandonato, ora incolto, ma adatto a colture energetiche, nella sola Italia centro-meridionale e insulare. Tenendo inoltre conto che l'eolico è compatibile con l'uso agropastorale dei terreni e che il solare termico utilizza prevalentemente le coperture degli edifici, si può concludere che, per l'Italia come per gli altri Paesi del Sud Europa, la disponibilità di territorio non costituisce certo un fattore limitante per l'impiego estensivo delle fonti rinnovabili.

Sulla base delle considerazioni precedenti, delle informazioni disponibili sui “giacimenti” esistenti in Italia e sull'evoluzione delle tecnologie di trasformazione, nonché di numerosi altri elementi dettagliatamente illustrati nello studio, è stata costruita la tabella 3 che fornisce separatamente, per ciascuna fonte, una valutazione del potenziale accessibile e del potenziale effettivamente praticabile al 2010.

Per potenziale accessibile intendiamo il potenziale energetico che sarebbe sfruttabile in assenza di ostacoli tecnici ed economici o tramite adeguate tecnologie in grado di superare tali ostacoli.



**Tab.3 - Potenziale delle nuove fonti rinnovabili in Italia al 2010**

<b>Fonte rinnovabile praticabile</b>	<b>Potenziale accessibile</b>	<b>Potenziale</b>
Eolico	20 TWh/a (4.4 Mtep/a)	15 TWh/a (3.3 Mtep/a)
Solare termico	2 Mtep/a	2 Mtep/a
Fotovoltaico	Ordine 1000 TWh/a (220 Mtep/a)	5 TWh/a (1.1 Mtep/a)
Biomasse	13 Mtep/a	13 Mtep/a
<b>Totale</b>	<b>239 Mtep/a</b>	<b>19.4 Mtep/a</b>

**Fonte:** *Amici della Terra*

Il contributo del fotovoltaico emerge per la sua grande rilevanza nel lungo termine. Questo fatto è dovuto essenzialmente al simultaneo verificarsi di alcune condizioni favorevoli, come la disponibilità di grandi aree marginali utilizzabili per installare gli impianti, la notevole efficienza di conversione della radiazione solare già in parte raggiunta con l'attuale tecnologia di fabbricazione delle celle e dei moduli, le interessanti prospettive di ulteriore notevole miglioramento di tale efficienza (20-30% contro l'attuale 10%), cosa che, unita all'abbassamento dei costi di produzione atteso per gli effetti di economia di scala, dovrebbe portare l'energia di questa fonte nel lungo periodo (circa nel 2020) alla competitività economica.

Il potenziale energetico effettivamente praticabile con le attuali strategie di sviluppo delle fonti rinnovabili coincide con il potenziale accessibile per l'eolico, il solare termico e le biomasse (rifiuti e scarti agroindustriali, coltivazioni lignee a corta rotazione, biocombustibili); è invece di gran lunga inferiore al potenziale accessibile per il fotovoltaico. Per questa fonte la tabella indica un contributo di soli 5 TWh all'anno, da intendersi come complementare al contributo eolico (15TWh all'anno) rispetto al limite tecnico complessivo di circa 20 TWh all'anno, imposto dall'intermittenza temporale di queste due fonti. La ripartizione del contributo tra l'eolico e il fotovoltaico

potrà anche essere diversa da quella indicata nella tabella, tuttavia il valore complessivo del loro potenziale praticabile si potrà discostare di poco dal valore di circa 20 TWh all'anno, risultante dall'assunzione, a lungo discussa dagli esperti, che la massima potenza intermittente accettabile sulla rete italiana sia dell'ordine dei 10.000 MW e che mediamente gli impianti eolici e fotovoltaici abbiano un fattore di carico non superiore a 0,25 (rapporto annuale tra le ore equivalenti di funzionamento a piena potenza e le 8.760 ore all'anno).

Il difetto dell'intermittenza penalizza in modo drastico la fonte fotovoltaica, il cui potenziale accessibile sarebbe in grado di soddisfare da solo l'intero bilancio energetico nazionale. Il problema dell'intermittenza è tuttavia sormontabile sul piano tecnico mediante lo sviluppo di adeguati sistemi di accumulo, tra i quali andranno preferiti quelli capaci di vettoriare l'energia rinnovabile verso settori di consumo diversi da quello elettrico. L'energia elettrica intermittente generata dalle fonti rinnovabili può essere trasformata e immagazzinata sotto forma di energia chimica in alcuni eco-combustibili di sintesi (idrogeno, etanolo, metanolo), tecnicamente compatibili con le attuali tecnologie di utilizzo nei vari settori ed in particolare in quello dei trasporti.

### *1.3 L'IDROGENO*

L'attuale struttura dei sistemi e dei mercati energetici tende ad attribuire alle energie rinnovabili un ruolo secondario, sia a causa dei loro costi che attualmente sono superiori a quelli dei combustibili fossili, sia a causa della intermittenza che le caratterizza. In un'ottica di sostenibilità, il problema dei costi va affrontato effettuando un confronto corretto tra le varie fonti, cioè contabilizzando, oltre ai costi di natura aziendale, anche i costi esterni generati dalla produzione di energia; questi ultimi, nel caso delle fonti fossili, possono risultare preponderanti rispetto ai costi aziendali specialmente a causa delle componenti legate ai possibili effetti delle emissioni di gas serra ed alla loro esauribilità.

Il problema dell'intermittenza non è stato finora adeguatamente affrontato se non per l'energia idroelettrica. Il possibile contributo di altre fonti rinnovabili, quali l'eolico e il

fotovoltaico, risulta fortemente limitato o dai forti costi dei sistemi convenzionali di accumulo (tipicamente batterie elettriche) ovvero dalla necessità di far lavorare gli impianti in collegamento diretto con sistemi energetici più ampi, in cui l'aleatorietà della fornitura possa essere stemperata nella complessità spazio-temporale della domanda di energia. Tipico esempio è costituito dal caso del collegamento diretto dei generatori fotovoltaici o eolici ad una rete elettrica esistente, alimentata da una molteplicità d'impianti convenzionali: l'intermittenza della generazione pone un limite tecnico obiettivo al grado di penetrazione delle fonti intermittenti nella rete (10-20% in termini di potenza). Succede così che mentre il potenziale del fotovoltaico, valutato sulla base degli attuali rendimenti di conversione e della disponibilità dei terreni marginali, inutilizzabili per l'agricoltura (2 milioni di ettari), è largamente sovrabbondante rispetto al fabbisogno energetico nazionale, il suo potenziale tecnicamente praticabile risulta pari solo ad una piccola frazione di questo fabbisogno.

E' quindi fondamentale superare questo atteggiamento strategico riduttivo, che finora ha confinato le fonti rinnovabili in un ruolo quantitativamente marginale, portando alla fase commerciale un sistema di accumulo di grande scala, che consenta la trasformazione dell'energia intermittente in un vettore energetico adatto ad essere utilizzato, in tempi differiti rispetto al momento della sua produzione, nel mercato generale dell'energia primaria in alternativa ai combustibili fossili.

L'idrogeno è un gas leggerissimo, non presente allo stato libero, ma abbondante in natura in molte sostanze: l'acqua, le biomasse, gli stessi combustibili fossili. La sua reazione di combustione con l'ossigeno genera calore e vapore d'acqua (oltre ai soliti indesiderati ossidi di azoto  $\text{NO}_x$ , le cui emissioni possono però venire ridotte o eliminate). Esiste un generale consenso che l'idrogeno potrà costituire il vettore energetico su cui fondare i sistemi energetici sostenibili del futuro. Esso può essere prodotto e gestito in condizioni di sicurezza ed è un combustibile pulito, versatile e universale; può essere usato per produrre calore, può sostituire i carburanti usati dai mezzi di trasporto, può alimentare le celle a combustibile per produrre elettricità con grande efficienza e senza inquinamento. A loro volta le celle a combustibile si prestano ad una varietà di applicazioni stazionarie e mobili, particolarmente di piccola taglia

(generazione elettrica e cogenerazione distribuita nei settori civile e industriale, impiego in veicoli elettrici).

L'idrogeno può essere ricavato dal gas naturale con un processo catalitico detto "steam reforming"; esso avviene in due fasi e richiede l'uso di vapore. In pratica il processo trasforma il metano in idrogeno liberando, come è inevitabile, la stessa quantità di CO<sub>2</sub> che verrebbe prodotta con la combustione diretta. Con processi più complicati l'idrogeno può essere ricavato dall'olio combustibile o dal carbone (gassificazione). Il gas di sintesi che si ottiene è una miscela di idrogeno e di ossido di carbonio (CO); quest'ultimo bruciando genera la solita CO<sub>2</sub>. Ricavare l'idrogeno dalle fonti fossili non risolve il problema delle emissioni di gas serra e naturalmente nemmeno quello della loro esauribilità; appaiono inappropriati e in conflitto con gli obiettivi di sostenibilità i filoni di ricerca sulle possibilità di confinamento della CO<sub>2</sub> così prodotta in fondo agli oceani, nei pozzi di petrolio e di gas naturale esauriti o negli acquiferi salini del sottosuolo.

I problemi dei gas serra e dell'esauribilità vengono superati solo se l'idrogeno viene ricavato da risorse non fossili come l'acqua o le biomasse e con l'impiego di fonti energetiche rinnovabili. Dall'acqua l'idrogeno può essere ricavato essenzialmente con i seguenti metodi:

- elettrolisi, un processo noto da due secoli che utilizza la corrente elettrica per scomporre la molecola d'acqua (H<sub>2</sub>O) nei due elementi che la costituiscono (idrogeno e ossigeno);
- elettrolisi del vapore, una variante in cui una parte dell'energia necessaria a scomporre la molecola d'acqua viene fornita sotto forma di calore, rendendo il processo più efficiente;
- scomposizione termochimica, in cui i due atomi di idrogeno vengono separati dall'atomo di ossigeno, in tre fasi, per mezzo di reazioni con bromo o iodio che richiedono energia sotto forma di calore;
- fotolisi, un processo non dissimile dalla fotosintesi che scompone la molecola dell'acqua in presenza della luce del sole e di opportuni catalizzatori;

- scomposizione biologica, in cui certi microbi, con la loro attività metabolica, non solo producono idrogeno, ma allo stesso tempo esplicano un'azione di depurazione (la scomposizione è detta fotobiologica se richiede la luce del sole);
- scomposizione termica, un processo assai diverso dai precedenti (che è stato studiato negli Stati Uniti, in Giappone, in Canada e in Francia), che richiede temperature molto elevate (3000°C).

Tutti questi processi possono essere sviluppati e realizzati in un'ottica di sostenibilità se l'energia necessaria alla produzione dell'idrogeno (quantitativamente sempre superiore a quella che poi l'idrogeno cederà durante il suo utilizzo) proviene da fonti rinnovabili. Nel caso dell'elettrolisi, che è il processo già oggi commercialmente maturo, l'energia elettrica necessaria potrà essere generata da impianti idroelettrici, eolici o fotovoltaici; se si guarda all'idrogeno come al vettore energetico di larga diffusione, sostitutivo dei combustibili fossili in quasi tutte le applicazioni e perciò necessario in quantità rilevanti, l'opzione fotovoltaica appare come la più percorribile in virtù del grande potenziale esistente e della sua distribuzione sul territorio. Tra le altre tecnologie citate merita attenzione la produzione fotobiologica, che con l'impiego di opportuni catalizzatori può raggiungere buone efficienze e utilizza in modo ambientalmente compatibile la radiazione solare.

Mentre i problemi della produzione e dell'impiego dell'idrogeno non appaiono troppo complessi, appare più impegnativa la soluzione del problema del suo immagazzinamento. Una prima forma di immagazzinamento è necessaria se l'idrogeno deve essere trasportato tramite gasdotto dal luogo di produzione a località remote, in quanto occorre immetterlo nella rete eliminando le fluttuazioni di produzione dell'impianto di elettrolisi, che riproducono fedelmente le fluttuazioni temporali della radiazione solare (questa oscilla giornalmente tra 0 e oltre 1000 W/m<sup>2</sup>, con un valore medio annuo di circa 150 a Torino e 180 a Palermo). Per impianti di grossa taglia è possibile immagazzinare l'idrogeno allo stato gassoso nel sottosuolo in pozzi di petrolio o di gas naturale esauriti, in acquiferi o in cavità saline o rocciose.

L'idrogeno compresso a pressioni elevatissime può essere accumulato in serbatoi progettati ad hoc; le tecnologie sono disponibili, anche se attualmente i costi dei compressori e dei serbatoi sono alti. Un altro metodo di accumulo consiste nel liquefare l'idrogeno; a parità di volume, l'energia accumulata è maggiore, ma è anche maggiore l'energia richiesta per la liquefazione.

I sistemi più promettenti per l'accumulo a bordo di veicoli sono basati sulla proprietà che ha l'idrogeno di reagire con molti metalli (tra i quali ferro, titanio, nickel) formando idruri stabili e liberando una certa quantità di calore. La reazione è reversibile, e quindi scaldando gli idruri si separa nuovamente l'idrogeno dal metallo. Questi idruri metallici si dividono in due categorie: quelli che per la separazione dell'idrogeno richiedono alte temperature (300-400°C) e quelli che richiedono temperature più basse (25-200°C). L'accumulo sotto forma di idruri consente una densità energetica superiore a quella della compressione; se l'idrogeno è sufficientemente puro, lo stesso supporto metallico può essere "caricato" e scaricato alcune migliaia di volte senza degradarsi apprezzabilmente.

Un'altra forma efficace di accumulo, che può raggiungere la densità energetica dell'idrogeno liquido, è costituita dall'adsorbimento su carbone attivo. E' stata anche sperimentata la possibilità di accumulare l'idrogeno all'interno di piccole sfere di vetro, nelle quali il gas viene fatto entrare sotto l'azione di alte pressioni e temperature; a temperatura ambiente il vetro non si lascia attraversare dall'idrogeno, che così rimane intrappolato nelle sfere.

A livello internazionale, le prime importanti ricerche sulle tecnologie dell'idrogeno sono state compiute dall'industria aerospaziale. Si segnala poi il progetto pilota Euro-Quebec Hydro, avviato nel 1986 dall'Unione Europea e dal Canada, che ha dimostrato la fattibilità della produzione dell'idrogeno con l'energia idroelettrica in Canada e del suo trasporto via mare in Europa (Germania), dove viene immagazzinato e impiegato per vari usi: propulsione di veicoli stradali, di aerei, di navi, produzione di acciaio, cogenerazione. La Germania, in joint-venture con l'Arabia Saudita, sin dal 1993 ha condotto ricerche per verificare, su scala industriale, la fattibilità tecnica ed economica

del ciclo dell'idrogeno solare sia in Arabia che in Baviera; BMW e Mercedes-Benz intendono produrre, trasportare e distribuire l'idrogeno per l'impiego su veicoli stradali ad Amburgo (progetto Weit).

Il Governo Giapponese ha varato un piano, chiamato WE-Net (World Energy Network for Environmentally Clean Energy), che intende sviluppare in trent'anni le tecnologie dell'idrogeno e fare del Giappone il leader mondiale del settore. L'Islanda, che copre i due terzi del suo fabbisogno di energia con fonti idroelettriche e geotermiche, ha deciso di diventare la prima economia del mondo alimentata ad idrogeno; il suo Governo ha elaborato un piano per fondare sull'idrogeno, entro 15-20 anni, il proprio sistema energetico e per vendere idrogeno ad altri Paesi.

#### *1.4 LA TRANSIZIONE VERSO LA SOSTENIBILITA' ENERGETICA*

L'obiettivo della sostenibilità energetica è la realizzazione, attraverso un percorso di transizione della durata di alcuni decenni, di sistemi energetici interamente fondati sulle fonti rinnovabili. Il raggiungimento di tale obiettivo, che consentirà di rispettare i principi fondamentali prima delineati, sarà possibile se i Paesi industrializzati attueranno uno sforzo congiunto per diminuire progressivamente il loro consumo di combustibili fossili e per condurre efficaci programmi di ricerca e sviluppo sulle fonti rinnovabili e sui sistemi di accumulo dell'energia solare. L'Italia può giocare un ruolo attivo in questo processo, che dovrebbe coinvolgere –per mezzo di accordi e progetti comuni- i Paesi europei, gli altri Paesi industrializzati e, quando possibile, i Paesi in via di sviluppo. La transizione energetica sarà tanto più facile quanto più saranno condivisi internazionalmente gli obiettivi di sostenibilità energetica e gli sforzi per raggiungerli.

La progressiva riduzione del consumo di combustibili fossili da parte dei Paesi industrializzati potrà essere conseguita dapprima attraverso miglioramenti di efficienza –sia dal lato dell'offerta che dal lato della domanda- ottenuti con tecnologie già oggi disponibili o prossime alla maturità, e successivamente attraverso la graduale sostituzione dei combustibili fossili con energia prodotta da fonti rinnovabili. A proposito dei miglioramenti di efficienza va detto che essi, se non inseriti in una

strategia complessiva, non assicurano necessariamente la riduzione dei consumi; possono, al contrario, provocare un aumento della domanda legato alla riduzione dei costi di esercizio dei beni o dei servizi la cui efficienza è migliorata.

La riduzione del consumo di combustibili fossili non implica necessariamente la riduzione dei consumi energetici; questi potrebbero virtualmente rimanere agli stessi livelli attuali se le tecnologie di utilizzo delle fonti rinnovabili permettessero di sostituire quote crescenti di combustibili fossili con pari quantità di energia prodotta da fonti rinnovabili. A questo proposito va sottolineata l'importanza di dare un forte impulso alla ricerca e sviluppo sui sistemi d'accumulo, senza i quali il contributo delle fonti rinnovabili, penalizzate dal difetto dell'intermittenza, potrebbe rappresentare, in termini di combustibili convenzionali sostituiti, solo una piccola parte degli attuali fabbisogni. Il superamento del problema dell'intermittenza consentirebbe, invece, di soddisfare fabbisogni energetici anche superiori agli attuali con il ricorso esclusivo alle fonti rinnovabili.

La riduzione dei fabbisogni di energia, anche nell'ipotesi ottimistica di un'abbondante offerta di fonti rinnovabili, capace di soddisfare una domanda non diversa dall'attuale, rappresenta comunque un obiettivo di tipo "no regret" per le positive ricadute generali (minore impiego di risorse e di territorio, impianti di taglia minore, etc.). Essa inoltre permetterà di raggiungere prima e più facilmente l'obiettivo di un sistema energetico interamente fondato sulle fonti rinnovabili.

La transizione verso la sostenibilità energetica sarà lunga; occorreranno molte attività di ricerca e l'attuazione di strategie innovative per arrivare a sistemi energetici interamente fondati sulle fonti rinnovabili. Giocheranno un ruolo fondamentale la collaborazione internazionale e al tempo stesso la capacità di modificare struttura e organizzazione degli attuali modi di produzione e consumo dell'energia. Saranno i combustibili fossili a garantire il percorso verso la sostenibilità energetica, e questo percorso di transizione sarà tanto più sicuro ed equilibrato quanto più intelligente e razionale sarà il ricorso che ad essi verrà fatto.



## **CAPITOLO 2: PETROLIO, GAS NATURALE E CARBONE A CONFRONTO**

### *2.1 RISERVE PROVATE E TEMPO DI ESAURIMENTO*

La tabella 4, elaborata su dati del 2000, illustra in forma sintetica la situazione a livello mondiale dei tre principali combustibili fossili: petrolio, gas naturale e carbone. La prima colonna fornisce la consistenza delle rispettive riserve; si tratta delle cosiddette riserve provate, o riserve accertate recuperabili, cioè di quelle quantità di combustibile che le più recenti indagini geologiche hanno accertato essere presenti nei giacimenti conosciuti e che potranno essere estratte con le vigenti tecniche di produzione. La seconda colonna indica, per ciascun combustibile, la produzione annua, cioè la quantità che ne è stata estratta nell'ultimo anno (2000); a meno delle variazioni delle scorte e di qualche incompletezza o incoerenza nei dati statistici internazionali, la produzione coincide con il consumo che di quel combustibile si è avuto nello stesso anno.

Osserviamo che, mentre petrolio e gas naturale hanno caratteristiche energetiche relativamente uniformi e indipendenti dal giacimento di provenienza, per il carbone il discorso è alquanto più complesso. Esistono infatti molte qualità di carbone, dalle più pregiate quali l'antracite e il litantrace fino alla lignite xiloide e alla lignite torbosa, molto differenti tra loro sia per struttura chimica, contenuto di zolfo, di ceneri, di umidità sia per potere calorifico. Il World Energy Council ha stabilito di raggruppare le varie qualità di carbone in due categorie principali: lo "hard coal", cioè le antraciti e i carboni bituminosi, aventi potere calorifico maggiore di 5700 kcal/kg, e il "brown coal", cioè i carboni sub-bituminosi e le ligniti, aventi un potere calorifico minore di 5700 kcal/kg. Per il carbone, quindi tanto il dato relativo alle riserve, quanto il dato relativo alla produzione annua andrebbero disaggregati almeno in due voci, secondo la classificazione del World Energy Council; ma, visto il carattere tipicamente indicativo della tabella, abbiamo preferito fornire dati cumulativi, relativi alle varie qualità di carbone nel loro complesso.

La terza colonna della tabella è ricavata semplicemente facendo il rapporto tra i dati della prima e quelli della seconda colonna, cioè tra riserve provate e produzione annua di ciascun combustibile; il risultato di questo rapporto (durata convenzionale) rappresenta evidentemente la durata delle riserve nell'ipotesi che il prelievo annuo resti costante e pari a quello attuale.

**Tabella 4 : Riserve provate di combustibili fossili e loro durata convenzionale (2000)**

	<b>R</b> ( Mtep )	<b>P</b> ( Mtep/anno )	<b>R / P</b> ( anni )	<b>R / P<sub>tot</sub></b> ( anni )
<b>Petrolio</b>	142.000	3.590	40	18
<b>Gas naturale</b>	135.000	2.180	61	17
<b>Carbone</b>	486.000	2.140	227	61
		<b>P<sub>tot</sub> = 7.910</b>		

**Fonte:** *Elaborazione Amici della Terra su dati BP Amoco*

**R** = riserve mondiali provate a fine 2000

**P** = produzione mondiale nel 2000

**P<sub>tot</sub>** = produzione complessiva nel 2000 di petrolio, gas naturale e carbone

**R / P** = durata convenzionale ai tassi di produzione attuali

**R/P<sub>tot</sub>** = durata convenzionale ai tassi di produzione complessiva attuali

Risulta dalla tabella che, ai ritmi attuali di consumo, il carbone durerebbe 227 anni, quasi sei volte più del petrolio e quattro volte più del gas naturale. Osserviamo che la durata convenzionale ha un valore essenzialmente indicativo, utile agli analisti per fare confronti e comprendere le tendenze del mercato, ma non è un indicatore sufficientemente preciso di quello che sarà l'effettivo tempo di esaurimento della risorsa. Da una parte, infatti, la scoperta di nuovi giacimenti, la rivalutazione di quelli già noti e l'evoluzione delle tecnologie estrattive tendono ad allungare il tempo di esaurimento; dall'altra, l'incremento demografico dei Paesi in via di sviluppo e l'aumento dei consumi pro capite che accompagna il loro sviluppo tendono ad

accorciarlo. Succede quindi che, anziché diminuire regolarmente, la durata convenzionale è soggetta a fluttuazioni anche cospicue non sempre prevedibili; negli ultimi anni l'aumento delle riserve ha compensato i consumi mantenendo sostanzialmente invariata, per tutti e tre i combustibili, la durata convenzionale. E' comunque evidente che questa circostanza non deve generare atteggiamenti di semplicistico ottimismo né deve servire da alibi per rimandare l'avvio di nuove strategie energetiche, non esistendo dubbi circa l'esauribilità delle risorse fossili e la crescita della domanda da parte dei Paesi in via di sviluppo.

Prima o poi le riserve provate cominceranno a diminuire; il tempo che ci separa dal loro esaurimento sarà magari di molti decenni ma, non certo di molti secoli. Il prezzo degli idrocarburi salirà in termini reali e le preoccupazioni per gli aspetti ambientali, che finora hanno preceduto quelle per l'esauribilità ed hanno prevalso su di esse, saranno superate da queste ultime.

Un'ulteriore precisazione riguarda la distinzione tra riserve provate come prima definite, e risorse geologiche, intese queste ultime come potenzialità dei giacimenti conosciuti, indipendentemente dalle condizioni tecniche ed economiche del loro sfruttamento. Le risorse geologiche sono maggiori delle riserve accertate per ciascuno dei tre combustibili, ma mentre nel caso del petrolio e del gas naturale la differenza tra risorse geologiche e riserve accertate non è macroscopica, per il carbone già nel 1980 il WOCOL (World Coal Study, un progetto internazionale di ricerche intersettoriali sulle possibilità di aumentare incisivamente il ruolo del carbone tra le fonti primarie), indicava in 7 milioni di Mtep la consistenza delle risorse geologiche. Si tratta quindi di quantità di molto superiori alle riserve provate a fine 2000 che compaiono nella tabella. Se quindi i tempi di esaurimento fossero riferiti non alle riserve accertate ma alle risorse geologiche, il carbone, che già è nettamente in testa rispetto agli altri due combustibili, acquisterebbe un vantaggio ben più cospicuo.

L'ultima colonna della tabella, infine, fornisce un dato del tutto fittizio ma non per questo meno significativo: si tratta, per ciascun combustibile, del rapporto tra riserve provate e produzione complessiva di combustibili fossili nel 2000, cioè del tempo di esaurimento delle riserve nell'ipotesi che d'ora in poi si utilizzasse solo il combustibile

in esame, prelevandone ogni anno dai giacimenti una quantità avente il contenuto energetico della produzione complessiva dei tre combustibili fossili nel 2000. Se usassimo solo petrolio potremmo andare avanti 18 anni, se usassimo solo gas naturale 17 anni, se usassimo solo carbone ne avremmo per 61 anni (ma ne avremmo per molti secoli se fossimo in grado di sfruttarne le intere risorse geologiche).

In conclusione, il carbone è, tra i combustibili fossili, quello che può consentire di superare la transizione energetica senza traumi, riducendo gradualmente il ricorso alle fonti fossili fino ad annullarlo prima del loro esaurimento. La scelta del carbone come fonte energetica essenziale nella fase di transizione dovrebbe essere adottata come scelta consapevole e razionale, evitando di trasformarla in scelta forzata resa inevitabile dall'esaurimento del petrolio e del gas naturale.

## *2.2 DISTRIBUZIONE DELLE RISERVE PROVATE E STABILITA' DELL'OFFERTA*

La tabella 5 illustra un'altra caratteristica positiva del carbone. Essa fornisce la distribuzione geografica delle riserve provate dei tre combustibili fossili. Il mondo è diviso in sette aree: Nord America, America Latina, Europa, Africa, Medio Oriente, ex Unione Sovietica, Asia e Oceania.

Dalla tabella risulta che in due di queste aree, Medio Oriente ed ex Unione Sovietica, è concentrato oltre il 70% delle riserve provate di petrolio e di gas naturale. Questo non succede per il carbone che è molto meglio distribuito nel mondo, e che in particolare è fortemente concentrato in Asia dove è anche concentrata una popolazione in forte sviluppo. Giacimenti importanti di carbone sono presenti anche in aree diverse da quelle in cui sono concentrati gli idrocarburi.

**Tabella 5: Distribuzione delle riserve accertate recuperabili di combustibili fossili a fine 2000 (in % del totale)**

	<b>Nord Americ a</b>	<b>Americ a Latina</b>	<b>Europa</b>	<b>Africa</b>	<b>Medio Oriente</b>	<b>Ex URSS</b>	<b>Asia e Oceania</b>	<b>Totale</b>
<b>Petrolio</b>	6,1	9,0	1,9	7,1	65,3	6,4	4,2	<b>100</b>
<b>Gas Naturale</b>	4,9	4,6	3,5	7,4	35,0	37,8	6,8	<b>100</b>
<b>Carbone</b>	26,1	2,2	12,4	6,2	-	23,4	29,7	<b>100</b>

**Fonte:** *BP Amoco*

Il carbone è quindi la fonte meno soggetta a rischi dal punto di vista della vulnerabilità degli approvvigionamenti, ed è la meno esposta alle perturbazioni geopolitiche e di mercato. Il mercato del carbone, tanto a causa della distribuzione geografica delle riserve quanto, soprattutto, a causa della struttura della sua industria che è completamente diversa da quella degli idrocarburi, è sostanzialmente indipendente dal mercato del petrolio e del gas. Questi fattori, unitamente alla pronunciata concorrenza tra i produttori e alla affidabilità delle infrastrutture di estrazione e di trasporto, garantiscono una stabilità di offerta impensabile per gli idrocarburi.

E' emblematico il caso dell'Italia che, con un grado di dipendenza dall'estero per le fonti primarie pari all'80%, è particolarmente esposta alle fluttuazioni dei prezzi internazionali degli idrocarburi. Nel 1999 l'Italia ha importato 80 milioni di tonnellate di petrolio greggio (38,8% dal Medio Oriente, 37% dall'Africa, 19% dall'ex Unione Sovietica), il cui prezzo è passato da 10 a 25 dollari al barile tra il gennaio e il dicembre dello stesso anno, per poi superare i 30 dollari nel 2000. Ancora più vulnerabile è la situazione nei riguardi del gas naturale, la cui importazione avviene essenzialmente tramite tre metanodotti. Nel 1999 l'Italia ha importato 49,5 miliardi di metri cubi di gas naturale (corrispondenti a 41 Mtep), per il 54% dall'Algeria, per il 38,6% dalla Russia e per il 5,8% dall'Olanda. Data la natura dei contratti di fornitura del gas naturale, il suo

prezzo è meno soggetto a rapide fluttuazioni, ma è comunque correlato a quello del greggio e ne segue l'andamento, sia pure con qualche attenuazione.

Le importazioni di carbone, sempre nel 1999, sono state pari a circa 12 Mtep (carbone da vapore, carbone da coke e una piccola quantità di lignite). La tabella 6 mostra che, nonostante si tratti di importazioni molto limitate rispetto a quelle di petrolio e di gas naturale, le provenienze sono assai più diversificate e riguardano, con l'eccezione del Medio Oriente che non produce carbone, tutte le aree indicate nella tabella precedente. I prezzi internazionali del carbone sono da alcuni anni in lieve ma costante diminuzione e sono comunque soggetti a oscillazioni contenute. A questo riguardo sono significativi il commento e la tabella 7 riportati qui di seguito, tratti dal Rapporto Energia e Ambiente dell'ENEA (REA 2000)

**Tabella 6: Importazioni di combustibili solidi in Italia nel 1999 (migliaia di tonnellate)**

<b>Provenienza</b>	<b>Carbone da coke</b>	<b>Carbone da vapore</b>	<b>Lignite e altri</b>	<b>Tot. Carboni</b>
<b>UE</b>	83	0	14	<b>97</b>
<b>USA</b>	3.653	0	0	<b>3.653</b>
<b>Russia</b>	32	797	75	<b>904</b>
<b>Ucraina</b>	0	0	0	<b>0</b>
<b>Polonia</b>	0	621	0	<b>621</b>
<b>Croazia</b>	0	0	0	<b>0</b>
<b>Canada</b>	1.067	0	0	<b>1.067</b>
<b>Australia</b>	1.995	1.000	304	<b>3.299</b>
<b>Sud Africa</b>	143	3.642	0	<b>3.785</b>
<b>Venezuela</b>	0	596	0	<b>596</b>
<b>Colombia</b>	0	1.362	0	<b>1.362</b>
<b>Cina</b>	151	643	0	<b>794</b>
<b>Indonesia</b>	0	1.374	0	<b>1.374</b>
<b>Altri</b>	4	0	13	<b>17</b>
<b>TOTALE</b>	<b>7.1287</b>	<b>10.035</b>	<b>406</b>	<b>17.569</b>

**Fonte:** *Bollettino Petrolifero, Ministero dell'Industria*

“Per quanto riguarda l’impatto dei prezzi sui costi di generazione dell’energia elettrica, occorre rilevare come il carbone presenti un costo variabile di combustibile notevolmente inferiore, ed anche notevolmente più stabile nel tempo, rispetto alla produzione di energia elettrica con impianti ad olio combustibile e con impianti a gas, come emerge dall’andamento dei prezzi dei combustibili nel corso degli ultimi due anni. In Italia il costo variabile di generazione elettrica da carbone è passato da un minimo di 33,34 lire/kWh nel bimestre gennaio-febbraio 1999 ad un massimo di 37,07 lire/kWh nel bimestre marzo-aprile 2000. Lo stesso costo per l’olio combustibile è passato nello stesso periodo da 38,69 lire/kWh a 70,7 lire/kWh, e per il gas naturale, il cui costo ha subito solo nell’ultimo anno oscillazioni dell’ordine dell’80% (tabella 7), è passato da 41,53 lire/kWh a 75,43 lire/kWh”.

**Tabella 7: Costo variabile per impianti funzionanti a carbone, a olio combustibile ed a metano (lire/kWh)**

<b>Periodo</b>	<b>Carbone</b>	<b>Olio combustibile</b>	<b>Metano</b>
<b>Gennaio – febbraio 1998</b>	35,03	56,89	60,77
<b>Marzo – Aprile 1998</b>	34,61	54,99	58,02
<b>Maggio – Giugno 1998</b>	35,15	47,17	51,30
<b>Luglio – agosto 1998</b>	35,15	45,16	48,76
<b>Settembre – ottobre 1998</b>	35,15	45,16	48,76
<b>Novembre – dicembre 1998</b>	34,51	41,71	44,88
<b>Gennaio – febbraio 1999</b>	33,34	39,28	43,11
<b>Marzo – Aprile 1999</b>	34,72	38,69	41,53
<b>Maggio – Giugno 1999</b>	34,72	38,69	41,53
<b>Luglio – agosto 1999</b>	36,39	42,09	45,91
<b>Settembre – ottobre 1999</b>	37,05	49,58	53,50
<b>Novembre – dicembre 1999</b>	36,78	58,32	62,38
<b>Gennaio – febbraio 2000</b>	36,35	65,28	70,04
<b>Marzo – aprile 2000</b>	37,07	70,70	75,43

**Fonte:** *Autorità per l’energia elettrica e il gas*

Per completezza di informazione, aggiungiamo che il costo variabile esposto nella tabella è quello calcolato dall’Autorità per l’energia elettrica e il gas ai fini dell’aggiornamento bimestrale delle tariffe dell’energia elettrica, sulla base dei prezzi internazionali dei combustibili e dei seguenti consumi specifici medi per le tre tipologie di impianti termoelettrici:

impianti a carbone	2.380 kcal/kWh
impianti a olio combustibile	2.235 kcal/kWh
impianti a gas naturale	2.030 kcal/kWh

A proposito del carbone, il Libro verde UE “Verso una strategia europea di sicurezza dell’approvvigionamento energetico”, pubblicato nel novembre 2000, dopo aver concluso che “sotto la pressione delle preoccupazioni ecologiche, per i combustibili solidi e il nucleare si profila un declino nella produzione di elettricità”, afferma: “Il mercato mondiale del carbone è un mercato stabile caratterizzato da risorse abbondanti e da una grande diversità geopolitica dell’offerta. Anche a lungo termine e in una situazione di aumento della domanda a livello mondiale, il rischi di una interruzione prolungata dell’approvvigionamento, pur non potendo essere completamente escluso, è minimo”.

E a proposito del gas naturale, il Libro verde afferma: “In Europa l’approvvigionamento di gas rischia a termine di creare una nuova dipendenza, tanto più marcata in caso di orientamento verso un consumo meno intensivo di carbone. L’aumento del consumo di gas potrebbe essere seguito da una tendenza all’aumento dei prezzi e indebolire la sicurezza dell’approvvigionamento dell’Unione europea”.

### *2.3 IL COSTO SOCIALE DI ESAURIBILITÀ DELLE FONTI FOSSILI*

L’emergere, a partire dalla fine degli anni ottanta, del dibattito sulla sostenibilità dello sviluppo ha rovesciato il tradizionale modo di concepire l’uso delle risorse naturali, tradizionalmente intese come beni di consumo. I combustibili fossili possono essere



infatti concepiti come una riserva di capitale non rinnovabile, accumulatasi per milioni di anni nella crosta terrestre (petrolio, gas, carbone), suscettibile di fornire benefici di sviluppo alle generazioni future. Ora, al ritmo dei nostri consumi, questo capitale sarà irrimediabilmente speso in poco tempo. Anche se ogni anno si scoprono delle nuove riserve, talvolta superiori al consumo, è evidente che le risorse fossili non saranno disponibili all'infinito nelle attuali quantità. I nostri discendenti dovranno consumarne sempre di meno. Il modo di amministrare questo capitale pone quindi un problema di equità tra le generazioni. Gli attuali prezzi dell'energia riflettono gli interessi e le preferenze di oggi e i nostri successori non possono far valere le loro preferenze nelle nostre decisioni sull'uso dell'energia. Infatti i prezzi delle materie prime sono fissati in funzione delle previsioni a breve e medio termine sulla domanda e sull'offerta, così come in funzione degli interessi particolari dei *cartelli* (OPEC) e degli Stati; essi non riflettono il valore dei danni provocati alle generazioni future da un esaurimento delle riserve di capitale naturale.

La nozione di scarsità delle risorse è assai controversa e oggetto di un dibattito in continua evoluzione. La quantificazione delle riserve accertate e potenziali (geologiche) di una certa risorsa dipende dalla ricerca esplorativa effettuata e, in ultima analisi, dallo stato di avanzamento delle conoscenze. L'aggiornamento continuo delle stime delle riserve sposta di fatto il termine temporale di esaurimento della risorsa e rende estremamente opinabile la valutazione monetaria dei costi di esauribilità.

Un altro problema, introdotto dal dibattito sulla sostenibilità dello sviluppo, è se sia sostenibile per il pianeta porre come limite ultimo dell'uso delle risorse l'entità delle riserve, e se non sia più opportuno far riferimento agli squilibri ecologici connessi all'uso delle risorse e al loro progressivo esaurimento. In quest'ultimo caso ha preso piede il concetto di *carrying capacity* (capacità ricettiva) del pianeta nello sfruttamento delle risorse ambientali, concetto che implica la necessità di introdurre dei vincoli qualitativi e quantitativi nell'uso delle risorse ambientali e che riduce notevolmente i margini temporali disponibili per pervenire a soluzioni alternative ad uno sfruttamento indiscriminato. Il coordinamento europeo degli Amici della Terra è intervenuto attivamente all'interno di questo dibattito sviluppando una metodologia di calcolo della

capacità di portata del pianeta basata sul concetto di “spazio ambientale annuo disponibile” (Cfr. Amici della Terra – Wuppertal Institut, “Verso un’Europa sostenibile”, Maggioli ed.). Tale metodologia è stata applicata a livello nazionale dagli Amici della Terra di ben 30 paesi europei, nell’ambito di una campagna di sensibilizzazione patrocinata dalla DG XI dell’Unione europea che sta conseguendo importanti risultati. Contestualmente, sono state avviate ricerche per definire opportuni indicatori di sostenibilità per i vari settori di attività. Per quanto riguarda l’uso dell’energia, il traguardo della sostenibilità impone incisivi miglioramenti di efficienza tanto sul fronte dell’offerta che su quello della domanda, per ottenere consistenti riduzioni delle emissioni di anidride carbonica secondo obiettivi graduati nel tempo. La riduzione dell’uso dei combustibili fossili è necessaria non solo per ridurre le emissioni di anidride carbonica ma anche le altre emissioni inquinanti, nonché per proteggere le risorse disponibili.

Non è stato ancora proposto un indicatore di sostenibilità per definire il merito di un processo che utilizza combustibili esauribili; tuttavia è evidente che –a parità di altre condizioni- il costo sociale connesso alla loro esauribilità risulta tanto maggiore quanto più il combustibile utilizzato è vicino all’esaurimento e quanto minore è l’efficienza del processo.

In base al primo fattore (tempo di esaurimento), se si considerano le riserve accertate delle varie fonti e ipotizzando una parità di efficienza del processo, si può verificare che il costo sociale dell’utilizzo del carbone è minore di quello dell’utilizzo del gas naturale e del petrolio. Inoltre, per quanto riguarda il secondo fattore (efficienza del processo), la scarsa efficienza dell’uso dei combustibili è doppiamente costosa, perché essa comporta il consumo di maggiori quantità di combustibile, inteso come risorsa ambientale scarsa suscettibile di usi futuri, e perché essa riversa sulla collettività esternalità negative più pesanti.

Il problema dell’esauribilità dei combustibili si intreccia perciò in modo complesso con quello del loro uso efficiente e con quello degli impatti sull’ambiente. Occorrerebbe inoltre considerare i costi sociali legati alla insicurezza degli approvvigionamenti che,

seppure di difficile valutazione, assumono particolare rilevanza per un Paese come l'Italia.

Limitandoci a considerare il problema dell'esauribilità come indipendente dagli altri problemi sopra citati, è possibile pervenire alla formulazione semplificata di un indicatore che renda conto della maggiore o minore disponibilità, a livello planetario, del combustibile considerato. Rinviando alle pubblicazioni specializzate del World Energy Council per quanto riguarda le definizioni dettagliate di riserve provate e di risorse geologiche, osserviamo che, nel costruire questo indicatore, è più opportuno fare riferimento alle riserve provate in quanto si tratta di quantità oggetto di stime ufficiali, accurate, verificate internazionalmente e continuamente aggiornate. Più precisamente, è opportuno riferirsi al contenuto energetico di dette riserve, espresso in un'unica unità di misura (ad es. Mtep), e considerare come rappresentativo della disponibilità di ciascuno dei tre combustibili fossili (petrolio, gas naturale, carbone) il rapporto tra l'entità delle sue riserve provate e l'entità delle riserve complessive dei tre combustibili, cioè il contributo del combustibile esaminato alle riserve mondiali complessive di energia fossile.

Dalla tabella 4 risultano le seguenti riserve provate:

Petrolio	142.000 Mtep
Gas naturale	135.000 Mtep
Carbone	486.000 Mtep
<b>TOTALE</b>	<b>763.000 Mtep</b>

Il contributo dei tre combustibili risulta quindi:

Petrolio	= $142.000/763.000 = 0,186 = 18,6 \%$
Gas naturale	= $135.000/763.000 = 0,177 = 17,7 \%$
Carbone	= $486.000/763.000 = 0,637 = 63,7 \%$

Per ottenere un indice normalizzato, che valga 1 per il combustibile più abbondante, il carbone, ed assuma valori minori di 1 per gli altri combustibili, si può rapportare ciascun contributo al contributo del carbone; più semplicemente, basta eseguire il rapporto tra il valore assoluto delle riserve provate di ciascuno dei tre combustibili e quello delle riserve di carbone. Potremo definire tale rapporto “indice di disponibilità”  $I_{DI}$ .

Esso assume i seguenti valori:

$$I_{DI} = 0,292 \quad (\text{petrolio})$$

$$I_{DI} = 0,278 \quad (\text{gas naturale})$$

$$I_{DI} = 1,000 \quad (\text{carbone})$$

E' ovvio che, in assenza di certezze su nuove scoperte di consistenti giacimenti in grado di modificare significativamente i contributi relativi dei tre combustibili, un uso razionale delle fonti fossili durante la lunga fase di transizione verso sistemi energetici interamente fondati sulle fonti rinnovabili richiederebbe, dal punto di vista dell'esauribilità, di privilegiare i consumi di carbone e di ridurre quelli di petrolio e gas. Insistiamo sul fatto che le considerazioni precedenti sono necessariamente semplificate, riguardano esclusivamente l'aspetto dell'esauribilità dei combustibili fossili attualmente utilizzati e si fondano sui dati ufficiali disponibili circa l'entità delle loro risorse provate. Nei paragrafi che seguono svolgeremo ulteriori considerazioni circa l'aspetto dell'efficienza e quello delle emissioni di gas serra, proponendo anche in questi casi l'adozione di opportuni indicatori semplificati per mettere a confronto processi e impianti che utilizzano i diversi combustibili.

#### 2.4 *IL RENDIMENTO DI SECONDO PRINCIPIO*

L'indice più comunemente usato per caratterizzare la bontà di un impianto per la produzione di energia elettrica e/o di calore è l'indice di utilizzazione del combustibile  $I_u$ , definito come rapporto tra l'energia utile complessivamente prodotta dall'impianto e

il contenuto energetico del combustibile consumato per produrla:

$$I_u = \frac{E_e + E_t}{E_c} = \frac{E_e}{E_c} + \frac{E_t}{E_c}$$

essendo

$E_e$  = energia elettrica utile prodotta dall'impianto in un certo periodo

$E_t$  = energia termica utile prodotta dall'impianto nello stesso periodo

$E_c$  = energia immessa nell'impianto tramite il combustibile nello stesso periodo (prodotto della quantità di combustibile consumata per il suo potere calorifico inferiore).

L'indice di utilizzazione del combustibile altro non è che il rendimento di primo principio e coincide con la somma del rendimento elettrico  $E_e/E_c$  e del rendimento termico  $E_t/E_c$ , ciascuno calcolato con riferimento ad una sola delle due forme di energia prodotte. L'indice  $I_u$  non descrive però a sufficienza la qualità termodinamica dell'impianto, in quanto esso tratta alla stessa stregua energie di pregio diverso.

Il rendimento di primo principio risponde appunto al primo principio della termodinamica, che sostanzialmente afferma la conservazione dell'energia e definisce le equivalenze tra le varie forme di energia; esso però stabilisce queste equivalenze indipendentemente dalla possibilità pratica di poter trasformare le varie forme di energia l'una nell'altra. Il rendimento di un processo, secondo il primo principio, è dato dal rapporto tra l'energia resa dal processo nella forma desiderata e l'energia assorbita dal processo stesso: si tratta cioè di un bilancio quantitativo tra l'energia in entrata e l'energia in uscita. Esso ci dice quanta dell'energia entrante nel processo è stata trasformata in energia utile, ma non ci dà alcuna valutazione sulla appropriatezza del processo o del tipo di macchina che abbiamo adottato per conseguire il nostro scopo.

E' il secondo principio della termodinamica che affronta il problema della qualità delle varie forme di energia e le suddivide in forme "nobili" o di prima specie e in forme meno pregiate o di seconda specie. E' possibile trasformare integralmente forme nobili (come l'energia meccanica o quella elettrica) in una forma di seconda specie (come

l'energia termica); quando al contrario si trasforma del calore in energia meccanica od elettrica, inevitabilmente una frazione del calore introdotto nel processo viene scaricato verso l'ambiente, e ciò avviene a una temperatura più bassa di quella originaria.

La disponibilità dell'energia termica a essere trasformata in lavoro è strettamente legata alla temperatura: 1.000 kcal a 700°C sono la stessa quantità di energia di 1.000 kcal a 100°C, ma valgono di più, hanno un maggior pregio, perché sono trasformabili in energia meccanica con rendimenti fino al 50%; mentre le 1.000 kcal a bassa temperatura non sono praticamente trasformabili in energia pregiata, o lo sono con rendimenti estremamente bassi. Il calore a bassa temperatura ha un valore termodinamico assai ridotto, che tende a zero mano a mano che la temperatura si avvicina a quella dell'ambiente. Il secondo principio della termodinamica attribuisce quindi all'energia termica un valore minore rispetto all'energia meccanica, tanto minore quanto più bassa è la temperatura a cui essa è disponibile.

Alla luce del secondo principio della termodinamica è possibile analizzare criticamente i limiti del concetto di rendimento di primo principio e introdurre un nuovo concetto di rendimento, che ci aiuta a valutare se esistono alternative migliori al processo utilizzato: si tratta del "rendimento di secondo principio". Mentre il rendimento di primo principio ci può aiutare ad apportare miglioramenti e ad ottimizzare il particolare processo adottato, quello di secondo principio ci offre molto di più perché ci dà il modo di giudicare quanto una fonte e una tecnologia siano adatte a fornire un determinato servizio energetico e quanto spazio le separi da un processo ottimale.

Il concetto di rendimento di secondo principio è stato introdotto all'indomani della cosiddetta crisi petrolifera: è stata proprio la cogenerazione a spingere i fisici a elaborare questo nuovo indicatore della qualità energetica di un processo, ribattezzando da quel momento "rendimento di primo principio" quello che fino ad allora nei testi di termodinamica era stato chiamato semplicemente "rendimento".

A differenza del rendimento di primo principio, che attribuisce lo stesso peso, indipendentemente dal loro pregio, a tutte le forme di energia, il rendimento di secondo

principio attribuisce a ciascuna di esse un peso pari alla quota suscettibile di essere convertita –con processi reversibili- in lavoro meccanico. All’energia elettrica e all’energia meccanica viene perciò attribuito un peso unitario, mentre all’energia termica viene attribuito il peso

$$1 - \frac{T_a}{T_t}$$

essendo  $T_a$  la temperatura assoluta ambiente (convenzionalmente pari a 15°C) e  $T_t$  la temperatura assoluta alla quale l’energia termica stessa è resa disponibile. Il calore “vale” tanto più quanto maggiore è la sua temperatura, cioè quanto più alta è la sua capacità di essere trasformato in energia pregiata.

E’ significativo il confronto tra i valori dei due rendimenti in alcuni casi correnti come la produzione di elettricità in una centrale termoelettrica convenzionale (a vapore a condensazione), la produzione di vapore a 200°C per usi di processo, la produzione di acqua calda a 80°C per riscaldamento ambientale, la produzione di acqua calda sanitaria a 50°C, la produzione combinata di elettricità e calore tramite impianti di cogenerazione.

Nel caso della centrale termoelettrica convenzionale l’energia utile è l’elettricità, alla quale si attribuisce peso unitario; quindi l’espressione del rendimento di secondo principio non differisce da quella del rendimento di primo principio:

$$R_I = R_{II} = \frac{E_e}{E_c}$$

Nei tre casi in cui l'energia utile è calore a diverse temperature, il rendimento di secondo principio si calcola attribuendo all'energia termica utile prodotta dall'impianto il peso  $1 - T_a/T_t$ :

$$R_I = \frac{E_t}{E_c} \qquad R_{II} = \frac{E_t}{E_c} \cdot \left( 1 - \frac{T_a}{T_t} \right)$$

Nel caso della cogenerazione , si hanno per i due rendimenti le seguenti espressioni:

$$R_I = \frac{E_e}{E_c} + \frac{E_t}{E_c} \qquad R_{II} = \frac{E_e}{E_c} + \frac{E_t}{E_c} \cdot \left( 1 - \frac{T_a}{T_t} \right)$$

Come già detto, il rendimento di primo principio attribuisce peso unitario ad entrambe le forme di energia prodotta, mentre il rendimento di secondo principio attribuisce peso 1 all'energia elettrica e peso  $1 - T_a/T_t$  all'energia termica.

La tab. 8 fornisce, per ciascuno di questi processi, i valori tipici del rendimento di primo principio e del rendimento di secondo principio con riferimento alla qualità dell'attuale parco di impianti esistente in Italia .



**Tab. 8: Valori dei rendimenti di primo e secondo principio per alcuni impianti convenzionali**

<b>Impianto</b>	<b>Rendimento di primo principio</b>	<b>Rendimento di secondo principio</b>	<b>Indice di merito energetico</b>
<b>Centrale termoelettr. convenzionale</b>	0,33 ÷ 0,40	0,33 ÷ 0,40	0,55 ÷ 0,67
<b>Caldaia (vapore 200°C)</b>	0,80 ÷ 0,90	0,30 ÷ 0,35	0,50 ÷ 0,58
<b>Caldaia (acqua 80°C)</b>	0,70 ÷ 0,80	0,13 ÷ 0,15	0,22 ÷ 0,25
<b>Caldaia (acqua 50°C)</b>	0,70 ÷ 0,80	0,08 ÷ 0,09	0,13 ÷ 0,15
<b>Impianto di cogenerazione</b>	0,60 ÷ 0,90	0,40 ÷ 0,60	0,67 ÷ 1,00

**Fonte:** *Amici della Terra*

La tabella mette in luce la irrazionalità termodinamica della produzione di calore a bassa temperatura con le tecnologie convenzionali; essa infatti, pur essendo caratterizzata da valori elevati del rendimento di primo principio, occupa gli ultimi posti nella graduatoria stabilita dal rendimento di secondo principio, che termodinamicamente è quella corretta in quanto rappresentativa della bontà del processo. Ovunque c'è una fiamma, la sua energia pregiata dovrebbe essere utilizzata per produrre lavoro meccanico, energia elettrica o calore ad alta temperatura; bruciare un combustibile per produrre acqua calda per riscaldamento ambientale o per usi sanitari significa degradare e sciupare la qualità energetica del calore ad alta temperatura prodotto dalla combustione. Passando dalla temperatura della fiamma a temperature di poco superiori a quella ambiente, noi degradingo la qualità dell'energia fino ai livelli più bassi della scala termodinamica: perdiamo cioè la possibilità di utilizzare l'energia del combustibile per produrre energia di prima specie. Questa forma di "spreco termodinamico" viene sistematicamente praticata nel settore civile (residenziale e terziario).

La tabella 8 mette anche in evidenza la superiorità termodinamica della cogenerazione rispetto alla produzione termoelettrica convenzionale. Nel caso della cogenerazione, i valori più elevati del rendimento di primo principio si hanno per impianti con motore

alternativo, quelli più elevati del rendimento di secondo principio per impianti con turbina a gas, nei quali è più alta la temperatura del calore recuperato. La tabella non considera, in quanto non “convenzionali” per il parco termoelettrico italiano, gli impianti a ciclo combinato gas-vapore per sola produzione di elettricità; per questi ultimi in effetti sono già oggi raggiungibili valori di  $R_I$  e di  $R_{II}$  pari a 0,55 (e nel medio termine valori di 0,60), il che qualifica questi impianti come impianti aventi pari merito termodinamico rispetto ai migliori impianti di cogenerazione.

Il concetto di rendimento di secondo principio è stato recepito dalla Norma UNI – CTI n. 8887 “Sistemi per processi di cogenerazione – Definizioni e classificazione”, alla quale rimandiamo per una trattazione rigorosa dei principali aspetti riguardanti la tecnologia della cogenerazione.

Al rendimento di secondo principio come sopra definito viene mossa una critica: quella di fare riferimento a processi reversibili non praticabili e quindi di rappresentare un indicatore non realistico del merito energetico di un processo. E’ quindi probabile che in futuro vengano adottati criteri di valutazione, già allo studio in alcune sedi scientifiche, più aderenti alla realtà e ai traguardi raggiungibili con le tecnologie disponibili.

Ovviamente il concetto di rendimento di secondo principio prescinde dal combustibile utilizzato, riferendosi esclusivamente al suo contenuto energetico (inteso come potere calorifico inferiore). E’ quindi possibile adottare il rendimento di secondo principio come strumento per confrontare il merito termodinamico di impianti e di processi, anche se questi utilizzano combustibili differenti.

Volendo costruire un “indice di merito energetico”  $I_{ME}$  che valga 1 per i processi più meritevoli ed assuma valori minori di 1 per tutti gli altri, si può adottare la seguente espressione:

$$I_{ME} = \frac{R_{II}}{R_{II.max}} = \frac{R_{II}}{0,60} \leq 1$$

nella quale si è assunto che le attuali tecnologie consentano di raggiungere al massimo un rendimento di secondo principio pari a 0,60. La suddetta espressione è facilmente aggiornabile nel caso che l'evoluzione tecnologica consenta di ottenere valori di  $R_{II}$  superiori a 0,60.

L'ultima colonna della tabella 8 riporta, per i vari impianti considerati, i valori dell'indice di merito energetico calcolato secondo la precedente espressione. La produzione di calore a bassa temperatura, praticata essenzialmente nel settore civile, è caratterizzata da un indice che al massimo vale 0,25, cioè un quarto del valore massimo oggi raggiungibile. La razionalità termodinamica vorrebbe invece che venissero utilizzati solo processi caratterizzati da un indice di merito il più possibile prossimo a 1.

## 2.5 *EMISSIONI DI GAS SERRA*

E' noto che il clima del pianeta viene controllato in gran parte dalla composizione dell'atmosfera, e in particolare dalla concentrazione dei cosiddetti gas serra, che sono trasparenti alla radiazione solare incidente ma opachi alla radiazione ad onda lunga emessa dalla terra.

Il principale gas serra è il vapore d'acqua, i cui livelli in atmosfera sono determinati dall'equilibrio naturale tra evaporazione e precipitazioni e non sono direttamente influenzati dalle attività umane. Seguono in ordine di importanza l'anidride carbonica, il metano, alcuni ossidi di azoto, l'ozono e altri composti presenti naturalmente in tracce che, insieme al vapore d'acqua, fanno sì che l'atmosfera terrestre produca un effetto serra naturale di circa 34°C (se non ci fosse l'atmosfera la temperatura media del pianeta sarebbe pari a -19°C, mentre in realtà è di +15°C).

Ai gas serra naturali si aggiungono i gas serra di origine antropica, che in parte sono gli stessi di quelli naturali e in parte sono gas artificiali, come i composti alogenati (clorofluorocarburi, idroclorofluorocarburi, idrofluorocarburi); essi provocano un effetto serra aggiuntivo rispetto a quello naturale. La Comunità scientifica internazionale ha valutato la capacità di ciascuno di essi di contribuire all'effetto serra aggiuntivo

rapportandola a quella del più importante, che è l'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) e che viene prodotta da tutti i processi di combustione. Le emissioni antropiche di gas serra possono quindi essere valutate in termini di CO<sub>2</sub>-equivalente secondo i coefficienti di conversione di seguito elencati (GWP, Global Warming Potential):

Anidride carbonica (CO <sub>2</sub> )	1
Metano (CH <sub>4</sub> )	21
Protossido di azoto (N <sub>2</sub> O)	310
Idrofluorocarburi (HFC)	140 ÷ 11.700 (in media 1.600)
Perfluorocarburi (PFC)	6.500 ÷ 9.200 (in media 7.000)
Esafluoruro di zolfo (SF <sub>6</sub> )	23.900

Oltre che da tutti i processi di combustione, l'anidride carbonica viene prodotta da alcuni processi industriali, in particolare quello della produzione del cemento. Il metano è prodotto da alcuni processi industriali, dalle discariche di rifiuti, in zootecnia e agricoltura nonché dalle perdite nella distribuzione del gas naturale. Il protossido di azoto viene generato essenzialmente in agricoltura, nella combustione e in alcuni processi industriali. Gli idrofluorocarburi sono dei sostitutivi dei clorofluorocarburi (CFC) nelle schiume isolanti e antincendio, nei circuiti frigoriferi e di condizionamento. Anche i perfluorocarburi sono impiegati nella refrigerazione nonché nella produzione di alcuni metalli. L'esafluoruro di zolfo è utilizzato in alcune produzioni industriali tra cui quella dell'alluminio.

I sei gas serra sopra elencati sono quelli presi in considerazione dal Protocollo di Kyoto, approvato nel dicembre 1997, che impegna i Paesi industrializzati e i Paesi dell'est europeo a ridurre entro il 2008-2012 le loro emissioni annue complessive del 5,2% rispetto ai livelli del 1990. Gli obiettivi per i singoli Paesi sono differenziati: Russia, Ucraina e Nuova Zelanda 0%; Canada, Ungheria, Polonia e Giappone -6%; Usa -7%; Unione Europea -8%.

Nel giugno 1998 il Consiglio dei Ministri dell'ambiente dell'Unione Europea ha stabilito gli obiettivi di riduzione per gli Stati membri in grado di consentire il

raggiungimento dell'obiettivo comune dell'8% fissato dal Protocollo di Kyoto. All'Italia è stato assegnato un obiettivo di riduzione pari al 6,5% che, considerando la crescita tendenziale delle emissioni, corrisponde a circa 100 milioni di tonnellate di anidride carbonica equivalente.

In termini di CO<sub>2</sub> equivalente, le emissioni italiane risultano imputabili per circa l'80% alla CO<sub>2</sub>, per circa il 10% al metano, per il 9% al protossido di azoto e per poco più dell'1% all'insieme degli idrofluorocarburi e dell'esafluoro di zolfo; i perfluorocarburi forniscono un contributo insignificante.

La delibera CIPE del 19 novembre 1998 ha individuato le seguenti azioni, stabilendo per ognuna di esse obiettivi di riduzione delle emissioni da raggiungere entro il 2003, il 2006 e il 2008-2012:

- aumento di efficienza del sistema elettrico;
- riduzione dei consumi energetici nel settore dei trasporti;
- produzione di energia da fonti rinnovabili;
- riduzione dei consumi energetici nei settori industriale, abitativo e terziario;
- riduzione delle emissioni nei settori non energetici;
- assorbimento delle emissioni di CO<sub>2</sub> da parte delle foreste.

In questa sede non affrontiamo il problema dell'adeguatezza del Protocollo di Kyoto al raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità climatica indicati dall'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), né i problemi legati alla sua mancata ratifica; ci limitiamo ad osservare, sulla base delle nostre precedenti ricerche in tema di uso razionale dell'energia e di promozione delle fonti rinnovabili, che le azioni individuate dalla Delibera CIPE, pur non essendo inquadrare in un progetto organico orientato alla sostenibilità, potrebbero consentire all'Italia di ottemperare largamente agli impegni di Kyoto. Questi impegni dovrebbero però essere sentiti dalla classe politica come un obiettivo prioritario e le azioni dovrebbero essere intraprese con fermezza, con il coinvolgimento attivo e intelligente di tutti gli attori interessati.

L'uso dei combustibili comporta emissioni di gas serra durante tutte le fasi del loro ciclo di vita: ricerca ed estrazione dai giacimenti, trattamento e raffinazione, trasporto

ed infine combustione nell'impianto utilizzatore. La quota maggiore di queste emissioni è imputabile alla fase di combustione nell'impianto utilizzatore, ma anche nelle fasi pre-combustione si hanno emissioni non trascurabili. Non esistono studi sistematici che mettano a confronto le emissioni di gas serra nelle fasi pre-combustione di carbone, petrolio e gas naturale; e in effetti la materia è molto complessa, in quanto queste emissioni sono fortemente legate alle specificità dei siti e dei processi e in molti casi non sono facilmente quantificabili. Molti dati sono contenuti negli studi di caso pubblicati nell'ambito del progetto comunitario ExternE, che costituisce il corpo più autorevole e aggiornato di ricerche in tema di esternalità nel settore dell'energia e in quello dei trasporti. Le emissioni più importanti si hanno per il carbone durante l'estrazione e il trasporto, per i prodotti petroliferi in fase di raffinazione, per il gas naturale ancora durante l'estrazione e il trasporto. Nel caso di centrali a olio e a carbone occorre anche contabilizzare le emissioni imputabili ai sistemi di desolforazione e al trasporto dei sottoprodotti dei sistemi di desolforazione e denitrificazione nonché delle ceneri (fasi post-combustione).

Nel loro complesso, le emissioni di gas serra imputabili a fasi diverse da quella di combustione possono raggiungere, in termini di CO<sub>2</sub> equivalente, il 5 ÷10% di quelle imputabili alla fase di combustione. Nel seguito ci riferiremo, per motivi di semplicità, esclusivamente a queste ultime, e più precisamente alle sole emissioni di CO<sub>2</sub>, essendo generalmente trascurabili, in fase di combustione, le emissioni di altri gas serra.

Le emissioni di CO<sub>2</sub> dovute alla combustione di un combustibile fossile possono essere calcolate stechiometricamente a partire dal suo contenuto di carbonio, nell'ipotesi di combustione perfetta, cioè di completa ossidazione del carbonio a CO<sub>2</sub>. Per motivi di uniformità con i criteri adottati dall'ANPA nell'elaborazione dell'inventario nazionale delle emissioni, riteniamo opportuno riferirci ai fattori di emissione proposti dalla metodologia CORINAIR, la metodologia comune europea elaborata dalla Agenzia Europea per l'Ambiente. Tali fattori di emissione differiscono leggermente da quelli stechiometrici, in quanto assumono che statisticamente una piccola frazione del carbonio contenuto nel combustibile, diversa da un combustibile all'altro ma sempre inferiore al 2%, non venga ossidata a CO<sub>2</sub>.

La tabella 9, estratta dalle pubblicazioni ANPA, riporta i fattori di emissione  $F$  dei principali combustibili e carburanti, espressi in tonnellate di  $\text{CO}_2$  per tonnellata equivalente petrolio (tep) di prodotto, adottati nell'inventario nazionale delle emissioni. A parità di contenuto energetico, carbone e lignite ( $F$  pari a circa  $4 \text{ tCO}_2/\text{tep}$ ) producono più  $\text{CO}_2$  di tutti gli altri combustibili elencati nella tabella; seguono il petrolio greggio e i prodotti della sua raffinazione ( $F$  intorno a  $3 \text{ tCO}_2/\text{tep}$ ) ed infine il gas naturale, che è il combustibile a minore emissione di  $\text{CO}_2$  ( $F = 2,338 \text{ tCO}_2/\text{tep}$ ). Questa caratteristica, unita alla sua versatilità d'uso e alla possibilità di ottenere elevati rendimenti di conversione come nei cicli combinati gas-vapore, fanno del gas naturale il combustibile preferito dai Paesi che intendono ottemperare agli impegni di riduzione delle emissioni di gas serra.

**Tab. 9: Fattori di emissione di  $\text{CO}_2$  per alcuni combustibili e carburanti ( $\text{tCO}_2/\text{tep}$ )**

	<b>F</b>	<b>1/F</b>	<b><math>I_{\text{CO}_2} = 2,338/F</math></b>
<b>Carbone da vapore</b>	3,936	0,254	0,594
<b>Lignite</b>	4,149	0,241	0,564
<b>Petrolio greggio</b>	3,037	0,329	0,770
<b>Olio combustibile denso</b>	3,205	0,312	0,729
<b>Gasolio</b>	3,068	0,326	0,762
<b>Jet Kerosene (carboturbo)</b>	2,962	0,338	0,789
<b>Benzine</b>	2,870	0,348	0,815
<b>GPL</b>	2,612	0,383	0,895
<b>Gas naturale</b>	2,338	0,428	1,000

**Fonte:** *elaborazione ANPA secondo metodologia IPCC*

Volendo costruire, come per l'esauribilità e per l'efficienza termodinamica, un indice di merito nei confronti del problema dei gas serra (che assuma il valore 1 nel caso migliore e valori via via minori mano a mano che il fattore  $F$  aumenta), si può semplicemente eseguire, combustibile per combustibile, il rapporto  $2,338/F$ . Si ottiene in tal modo un "indice di merito di  $\text{CO}_2$ "  $I_{\text{CO}_2}$  il cui valore fornisce una misura del merito del

combustibile considerato relativamente al problema dell'effetto serra. Solo per il gas naturale tale indice vale 1; per tutti gli altri combustibili di origine fossile esso vale meno di 1, consentendo di formare una graduatoria di merito decrescente, i cui ultimi posti sono occupati dal carbone e dalla lignite.

L'espressione dell'indice di merito di CO<sub>2</sub> è quindi:

$$I_{CO_2} = \frac{1}{F} \times 2,338$$

Il fattore 1/F rappresenta la quantità di combustibile, espressa in tep, che bruciando produce una tonnellata di CO<sub>2</sub>; quanto maggiore è tale quantità, tanto maggiore è il merito del combustibile. Il fattore 2,338 (che altro non è che il fattore di emissione F del gas naturale) viene introdotto per far assumere all'indice il valore unitario nel caso del combustibile migliore, che è il gas naturale.

## 2.6 *ESAURIBILITA', EFFICIENZA, EFFETTO SERRA: UNA VALUTAZIONE CONGIUNTA*

Nei precedenti paragrafi abbiamo accennato ad alcuni aspetti che possono orientare la formulazione di una politica energetica di transizione, proponendo degli indicatori semplificati per quantificare il merito relativo dei combustibili fossili nei riguardi di tre problemi fondamentali: la loro esauribilità, l'efficienza termodinamica dei processi di trasformazione energetica e le emissioni di gas serra.

Numerosi altri aspetti, toccati solo di sfuggita nel presente rapporto, pur non prestandosi ad essere descritti per mezzo di indicatori semplificati, devono tuttavia essere presi in considerazione nel progettare il percorso della transizione energetica: la distribuzione geografica delle riserve provate, l'opportunità di diversificare ed equilibrare il mix delle fonti, la flessibilità d'uso dei diversi combustibili e la sicurezza delle modalità del loro approvvigionamento, la loro attitudine a soddisfare la crescente domanda da parte dei Paesi in via di sviluppo e a soddisfare esigenze di settori diversi da quello energetico.



Tutti questi aspetti devono concorrere a realizzare un unico obiettivo, quello di percorrere senza traumi la transizione verso i sistemi energetici del futuro, in tempi compatibili con quelli della evoluzione tecnologica e delle modifiche strutturali e culturali necessarie.

La circostanza delle maggiori emissioni di CO<sub>2</sub> rispetto agli altri combustibili ha indotto troppo frettolosamente molti Governi a stabilire il progressivo abbandono del carbone. In Italia questa caratteristica negativa del carbone è stata utilizzata, talvolta anche a livello istituzionale, per ostacolare un riequilibrio del mix energetico, estremamente opportuno in particolare nel settore termoelettrico. Gli Amici della Terra non ritengono che le maggiori emissioni di CO<sub>2</sub> debbano pregiudicare un incremento del contributo del carbone alla produzione di elettricità, né condividono la facile ma poco lungimirante tendenza, dimostrata da molti Paesi e anche dall'Italia dopo la ratifica della Convenzione sul clima, a spostare verso il gas naturale il consumo di fonti primarie.

L'aumento di emissioni di CO<sub>2</sub> conseguente ad una maggiore penetrazione del carbone nel settore termoelettrico può essere largamente compensato da incisive azioni di miglioramento dell'efficienza sia sul fronte dell'offerta che su quello della domanda in tutti i settori, e particolarmente in quello elettrico, in quello dei trasporti e in quello civile. Si tratta sostanzialmente delle azioni previste dalla Delibera CIPE del 19 novembre 1998 prima ricordata, che non ha trovato finora pratica attuazione. In un volume pubblicato nel 1998 ("La scommessa di Kyoto", Franco Angeli) gli Amici della Terra hanno esposto i risultati di una ricerca svolta su incarico del Ministero dell'ambiente in vista della Conferenza di Kyoto. La terza parte del volume descrive le possibili strategie di riduzione delle emissioni in Italia al 2010 e contiene valutazioni e proposte circa il rinnovo del parco elettrico, interventi nel settore degli usi civili e interventi nel settore dei trasporti, individuando in ciascun caso le azioni praticabili più efficaci e quantificando le riduzioni conseguibili.

A puro titolo indicativo, osserviamo che il consumo specifico medio del parco termoelettrico dell'ENEL è attestato da circa 15 anni su valori molto bassi, come conseguenza dei continui rinvii del programma di dismissioni degli impianti più vecchi,

della mancata realizzazione di impianti a ciclo combinato (nuovi o da trasformazione di impianti esistenti) e in generale della assenza di adeguati stimoli verso un miglioramento di efficienza. Il contratto di programma stipulato tra il Ministero dell'Industria e l'ENEL nel 1991, che mirava a ridurre entro il 1995 il consumo specifico medio a 2.260 kcal/kWh (-1,5% rispetto al 1989), ha fallito il suo obiettivo. Ancora oggi questo modesto traguardo non è stato raggiunto, come risulta dalla tab. 10.

**Tab. 10: Consumo specifico medio e rendimento medio del parco termoelettrico ENEL dal 1987 al 1999**

	1987	1989	1991	1993	1995	1997	1999
<b>Consumo specifico medio (kcal/kWh)</b>	2.303	2.295	2.315	2.288	2.284	2.266	2.268
<b>Rendimento medio (%)</b>	37,34	37,47	37,15	37,59	37,65	37,95	37,92

**Fonte:** ENEL, *Produzione e consumo, anni vari*

*GRTN, Dati statistici 1999*

La tabella 11 contiene maggiori dettagli sulla produzione termoelettrica dell'ENEL nel 1999, fornendo per ciascuna categoria di combustibile (carbone, prodotti petroliferi, gas naturale) la produzione netta, il consumo assoluto e specifico e quindi il rendimento. Anche considerando che i rendimenti indicati sono valori medi annui di un insieme di impianti diversi per età e caratteristiche e che essi risentono degli abbassamenti dovuti alla modulazione e agli avviamenti, si può osservare che essi sono in tutti e tre i casi molto al di sotto dei valori che un parco moderno può raggiungere oggi. Emerge con particolare evidenza il cattivo uso che l'ENEL fa del gas, che dovrebbe invece essere utilizzato per usi termoelettrici solo in impianti ad elevata efficienza. In proposito osserviamo che per ogni TWh prodotto da gas con un rendimento del 55% anziché del 39,74% si eviterebbero emissioni di CO<sub>2</sub> pari a 0,14 Mt; se quindi l'intera produzione da gas (44 TWh) fosse avvenuta con un rendimento medio del 55% si sarebbero evitate

emissioni di CO<sub>2</sub> pari a  $0,14 \times 44 = 6,16$  Mt (e si sarebbero risparmiati 2,64 Mtep di gas).

**Tab. 11: Produzione termoelettrica dell'ENEL nel 1999**

	<b>Carbone</b>	<b>Prodotti petroliferi</b>	<b>Gas naturale</b>
<b>Produzione netta (TWh)</b>	21,3	71,6	44,0
<b>Consumo (Mtep)</b>	5,1	16,4	9,5
<b>Consumo specifico (kcal/kWh)</b>	2.408	2.289	2.164
<b>Rendimento (%)</b>	35,71	37,57	39,74

**Fonte:** *GRTN, Dati statistici 1999*

Il cattivo uso che l'ENEL fa del gas risulta ancora più evidente se si tenta una applicazione combinata degli indici precedentemente proposti:

indice di disponibilità  $I_{DI}$  ( $I_{DI} = 1$  per il carbone);

indice di merito energetico  $I_{ME}$  ( $I_{ME} = 1$  per i processi che hanno rendimento  $R_{II} = 0,60$ )

indice di merito di CO<sub>2</sub>  $I_{CO2}$  ( $I_{CO2} = 1$  per il gas naturale).

Esistono vari modi per combinare tra loro più indici del tipo proposto (valori crescenti al crescere del merito, valore massimo 1). Se si rinuncia ad attribuire ad essi pesi differenti, in funzione dell'importanza del problema che ciascuno di essi descrive, il modo più semplice è quello di farne il prodotto; il risultato sarà tanto più vicino a 1 quanto più alto sarà il merito del processo esaminato nei riguardi dei tre problemi (esauribilità, efficienza termodinamica, emissioni di gas serra). Se allora proviamo, in via preliminare, a mettere a confronto l'uso che l'ENEL ha fatto nel 1999 di carbone, petrolio e gas, dobbiamo calcolare nei tre casi il prodotto

$$I = I_{DI} \times I_{ME} \times I_{CO2}$$

I valori di  $I_{DI}$  e di  $I_{CO2}$  sono quelli indicati in precedenza (per quanto riguarda l'indice di merito di  $CO_2$  da attribuire ai prodotti petroliferi, adottiamo il valore che compete all'olio combustibile, dato che nel caso dell'ENEL esso rappresenta oltre il 90% di questi prodotti); per quanto riguarda  $I_{ME}$ , ricordiamo che esso è pari al rendimento di secondo principio diviso per 0,6 e che il rendimento di secondo principio, nel caso della produzione termoelettrica, coincide con il rendimento di primo principio, che è quello dichiarato nella tabella 11.

**Tab. 11: Indici di merito della produzione termoelettrica ENEL nel 1999 da carbone, prodotti petroliferi e gas naturale.**

	$I_{DI}$	$I_{ME}$	$I_{CO2}$	$I = I_{DI} \cdot I_{ME} \cdot I_{CO2}$
<b>Carbone</b>	1,000	0,595	0,594	0,353
<b>Prodotti petroliferi</b>	0,292	0,626	0,729	0,133
<b>Gas naturale</b>	0,278	0,662	1,000	0,184

**Fonte:** Elaborazione *Amici della Terra* su dati *BP Amoco*, Norma *UNI-CTI n.8887*, ANPA

La tabella 12 riporta i risultati delle considerazioni precedenti. Il problema dell'esauribilità, che determina il valore dell'indice di disponibilità, grava su petrolio e gas in modo così pesante da non poter essere compensato dal vantaggio che essi hanno sul carbone nei riguardi del problema delle emissioni di  $CO_2$ . La prestazione migliore è quindi quella del parco a carbone, seguito dal parco a gas e poi da quello a olio combustibile. L'indice di merito energetico, abbastanza simile per i tre combustibili, non influisce significativamente sulla graduatoria.

Se il parco a gas avesse il miglior rendimento oggi ipotizzabile ( $R = 0,60$  e quindi  $I_{ME} = 1$ ), il suo indice complessivo passerebbe da 0,184 a 0,278, valore ancora insufficiente a raggiungere la prestazione del parco a carbone. Se poi si effettua una valutazione

analoga per la produzione di acqua a 80°C (riscaldamento degli ambienti con una caldaia convenzionale a gas avente rendimento di primo principio pari a 0,80 e rendimento di secondo principio pari a 0,15), il risultato complessivo si riduce a valori dell'ordine di 0,070 (e a valori ancora inferiori se la caldaia è alimentata a gasolio) a causa della irrazionalità termodinamica del processo, che degrada in modo irreversibile la qualità energetica del calore ad alta temperatura generato dalla combustione.

Le considerazioni precedenti rappresentano un tentativo di esprimere in forma quantitativa la gravità dei problemi dell'esauribilità, dell'efficienza e dell'effetto serra, i quali non possono essere considerati in maniera disgiunta e parziale. Il problema dell'effetto serra è uno dei problemi ambientali prioritari, ma non può essere affrontato ignorando la serietà degli altri problemi connessi all'uso delle fonti fossili. Pur non attribuendo agli indici proposti alcuna autorevolezza scientifica ma considerandoli solo un tentativo preliminare e semplificato, essi confermano la nostra convinzione che un riequilibrio a favore del carbone del mix di fonti per la produzione termoelettrica nazionale è non solo proponibile ma senz'altro opportuno.



## **CAPITOLO 3: CONSUMI DI COMBUSTIBILI FOSSILI IN ITALIA E NEL MONDO**

### *3.1 LA RINUNCIA ITALIANA AL CARBONE*

La tabella 13 fornisce i consumi pro capite annui dei tre combustibili fossili. Il mondo (6 miliardi di abitanti) è suddiviso in tre aree:

- Paesi OCSE. Essi comprendono i 15 Paesi dell'Unione Europea (375 milioni di abitanti, di cui 57 in Italia), sette Paesi europei non membri dell'Unione (Repubblica ceca, Ungheria, Islanda, Norvegia, Polonia, Svizzera, Turchia) e i seguenti Paesi extraeuropei: USA, Giappone, Messico, Canada, Australia, Nuova Zelanda, Corea del Sud. Nel complesso i Paesi OCSE contano circa 1,1 miliardi di abitanti;
- Paesi dell'Europa Centrale e dell'Est (PECE) ed ex Unione Sovietica (CIS, Confederazione degli Stati Indipendenti). Essi contano complessivamente 355 milioni di abitanti, di cui 292 nella ex Unione Sovietica; l'insieme dei Paesi PECE-CIS è caratterizzato da consumi di energia omogenei e notevolmente superiori a quelli dei Paesi in via di sviluppo;
- Resto del Mondo, che conta oltre 4,5 miliardi di abitanti responsabili di consumi energetici molto modesti ma in rapida evoluzione. Questo gruppo comprende la Cina (1,28 miliardi), l'India (1 miliardo), tutti gli altri Paesi asiatici e del Medio Oriente non inclusi nei gruppi precedenti (900 milioni), l'America centrale e del sud (520 milioni) e l'Africa (800 milioni).

**Tabella 13: Consumi di combustibili fossili per abitante nel 2000 (tep/ab.)**

	<b>OCSE</b>	<i>(UE 15)</i>	<i>(Italia)</i>	<b>PECE-CIS</b>	<b>Resto del Mondo</b>	<b>Mondo</b>
<b>Petrolio</b>	1,97	1,68	1,62	0,58	0,25	<b>0,59</b>
<b>Gas naturale</b>	1,07	0,90	1,00	1,47	0,10	<b>0,37</b>
<b>Carbone</b>	1,00	0,56	0,20	0,58	0,20	<b>0,37</b>
<b>Totale</b>	<b>4,04</b>	<b>3,14</b>	<b>2,82</b>	<b>2,63</b>	<b>0,55</b>	<b>1,33</b>

**Fonte:** elaborazione Amici della Terra su dati BP Amoco e Nazioni Unite

I consumi sono espressi in tonnellate equivalenti di petrolio (tep) pro capite e sono riferiti al 2000. Vediamo che un abitante dei Paesi OCSE consuma mediamente 4 tep all'anno, un'abitante dei Paesi dell'Europa centro-orientale e della ex Unione Sovietica poco più di 2,5 tep, mentre nel resto del mondo il consumo pro capite annuo supera di poco mezza tep. Siamo ben lontani dal rispettare il principio di equità. Rispetto alla media mondiale (1,33 tep), i consumi di combustibili fossili nei Paesi OCSE sono circa tripli, quelli dell'Europa dei 15 pari circa a due volte e mezzo; il rapporto passa rispettivamente a 7 e 6 se ci riferiamo ai consumi del resto del mondo.

E' ovvio che ci dobbiamo aspettare una situazione assai critica dei mercati energetici. La attuale disparità tra i consumi pro capite tenderà a diminuire, nel senso che quelli dei Paesi in via di sviluppo aumenteranno gradualmente nei prossimi decenni. L'evoluzione dei consumi pro capite sarà accompagnata, nei Paesi in via di sviluppo, da un forte incremento demografico. Secondo il Dipartimento degli Affari Economici e Sociali delle Nazioni Unite (previsione "media"), nel 2050 la popolazione mondiale raggiungerà i nove miliardi; la popolazione degli attuali Paesi OCSE sarà pari a 1,2 miliardi, quella dei Paesi PECE-CIS resterà praticamente costante, e quella del resto del mondo passerà dagli attuali 4,5 miliardi a quasi 7,5 miliardi. In termini assoluti, quindi, la domanda di energia da parte del resto del mondo sarà ben superiore a quella attuale e provocherà forti tensioni sui mercati. Anche ipotizzando nuovi ritrovamenti e un conseguente allungamento della loro durata, gas e petrolio costeranno sempre più cari e saranno molto più vicini all'esaurimento rispetto al carbone.



La tabella 13 mostra che, per quanto concerne petrolio e gas, l'Italia è allineata con la media europea; per quanto riguarda il carbone il consumo pro capite italiano è molto inferiore al consumo medio dei Paesi OCSE a quello europeo, ed è addirittura inferiore alla media mondiale (0,20 tep contro 0,37). La politica energetica italiana è stata cioè caratterizzata non solo dalla rinuncia al nucleare, ma anche da una evidente rinuncia al carbone, nonostante gli obiettivi più volte enunciati in sede di programmazione. In una visione semplificata, certamente utopistica, di completa eguaglianza internazionale, in cui tutti i cittadini del mondo abbiano diritto a ricevere annualmente la stessa quantità di combustibili, l'Italia dovrebbe fortemente ridurre i consumi di petrolio e gas ma potrebbe aumentare quelli di carbone.

La rinuncia italiana al carbone risulta più chiaramente dalla tabella 14 che fornisce, per alcuni Paesi, per l'Unione Europea, per l'insieme dei Paesi OCSE e per il mondo intero, il contributo del carbone al fabbisogno totale di energia primaria (incluso nucleare e elettricità primaria) e alla produzione termoelettrica. In entrambi i casi questo contributo in Italia è assai inferiore a quello che si registra mediamente nell'Unione europea, il quale a sua volta è inferiore a quello che si ha nell'OCSE e nel mondo. E' emblematico il caso della Danimarca, che pur non possedendo carbone nazionale, ha avviato un programma di conversione delle proprie centrali termoelettriche da petrolio a carbone proprio negli anni in cui venivano scoperti e valutati i giacimenti di petrolio e gas naturale del mare del nord.

Il sistema elettrico danese, la cui struttura è intimamente legata alla eccezionale penetrazione del teleriscaldamento e alla forte tradizione cooperativistica diffusa nel Paese sin da prima dell'ultima guerra, ha meritato il lusinghiero giudizio dell'Agenzia Internazionale dell'Energia. Secondo l'Agenzia, la Danimarca è il Paese europeo che fa il miglior uso dell'energia primaria, che produce l'elettricità ai costi più bassi, che è leader mondiale nelle tecnologie della cogenerazione e dell'energia eolica, e che ha meglio sviluppato e applicato efficaci sistemi di depurazione dei fumi.

Il caso della Danimarca è particolarmente significativo in quanto dimostra che la promozione del carbone può avere pieno successo anche in un Paese in cui la sensibilità ambientale è molto spinta. La volontà politica di spostare decisamente i consumi verso

il carbone non si è manifestata attraverso procedure centralistiche e impositive, ma al contrario attraverso il coinvolgimento attivo delle amministrazioni periferiche a tutti i livelli e la trasparente e corretta informazione del pubblico e delle comunità locali.

**Tabella 14: Contributo percentuale del carbone (2000)**

**(A) al totale delle fonti primarie**

**(B) alla produzione termoelettrica**

	<b>(A)</b>	<b>(B)</b>
<b>Mondo</b>	25	46
<b>OCSE</b>	21	65
<b>USA</b>	25	75
<b>UE 15</b>	15	39
<b>Danimarca</b>	24	45
<b>Germania</b>	25	65
<b>Regno Unito</b>	17	41
<b>Italia</b>	7	12

**Fonte:** elaborazione Amici della Terra su dati BP Amoco, Commissione Europea e ENEA (REA 2000)

**(A)** Sono stati utilizzati i seguenti fattori di conversione:

TWh = 0,086 Mtep per l'elettricità da fonti rinnovabili (860 kcal/kWh)

TWh = 0,260 Mtep per l'elettricità da fonte nucleare (2600 kcal/kWh)

**(B)** Energia da carbone immessa nel parco termoelettrico / energia totale immessa

### 3.2 *IL CONCETTO DI SPAZIO AMBIENTALE APPLICATO AI COMBUSTIBILI FOSSILI*

Il calcolo degli obiettivi di sostenibilità può essere effettuato utilizzando la metodologia dello "spazio ambientale", intesa come insieme di principi e indicatori individuati in coerenza con i principi e gli indirizzi della Dichiarazione di Rio de Janeiro (1992) e

dell'Agenda XXI. Tale metodologia è stata sviluppata nei suoi aspetti generali dagli Amici della Terra europei in collaborazione col Wuppertal Institut già nel 1995, ed è stata successivamente applicata per monitorare la sostenibilità dello sviluppo in più occasioni e contesti di riferimento (prevalentemente nazionali). Qui di seguito, prima di procedere con la sua applicazione, ne illustriamo le caratteristiche principali.

Il punto di partenza della metodologia dello spazio ambientale è l'assunzione che le gravi minacce alla vita del pianeta (mutamento climatico, impoverimento dello strato di ozono, piogge acide, erosione, desertificazione e perdita di biodiversità) siano la conseguenza di un uso squilibrato e inappropriato delle risorse naturali. E' quindi necessario disporre di un concetto innovativo, che risulti possibilmente di semplice utilizzo, per stabilire il livello di consumo dei beni considerato sostenibile, tale cioè da limitare i gravi danni al pianeta determinati dal prelievo delle risorse naturali e da livelli di inquinamento superiori alla capacità di assorbimento degli ecosistemi. Il concetto di spazio ambientale può essere così formulato: il quantitativo di risorse ambientali rinnovabili e non rinnovabili che può essere usato senza mettere a rischio la ricettività dell'ambiente e l'esaurimento delle risorse, al fine di mantenere la capacità dell'ambiente di assolvere alla funzione di sostegno allo sviluppo delle generazioni future.

I principi di base usati nell'individuazione degli indicatori e nel calcolo degli obiettivi di sostenibilità delle politiche di protezione del clima sono quelli già illustrati nel Capitolo 1, che ripetiamo brevemente:

- rispettare la capacità ricettiva (carrying capacity) dell'atmosfera: ciò avviene ponendo dei limiti alle emissioni globali annue di gas serra;
- evitare l'esaurimento delle fonti energetiche non rinnovabili: ciò avviene stabilendo delle quote minime di riserve di gas, petrolio e carbone da destinare agli usi non energetici delle future generazioni;
- consentire lo sviluppo dei Paesi poveri garantendo ad ogni abitante del globo di accedere ad una equa porzione delle risorse esauribili e non rinnovabili (principio di

equità): ciò implica una ripartizione delle emissioni e delle riserve di fonti fossili fra gli Stati in rapporto alla propria popolazione.

Gli indicatori individuati sulla base dei suddetti principi sono di due tipi: indicatori di emissione (emissioni nazionali annue pro capite di gas serra) e indicatori di risorse (consumo nazionale annuo di combustibili fossili).

Le modalità e i risultati del calcolo degli obiettivi di sostenibilità sono dettagliatamente esposti, sia per quanto riguarda le emissioni che per quanto riguarda il consumo di fonti energetiche non rinnovabili, nel già citato volume “La scommessa di Kyoto” (FrancoAngeli ed.), al quale rimandiamo per ogni approfondimento. Il calcolo degli obiettivi di sostenibilità per le emissioni di gas serra, basato sugli studi effettuati dall’IPCC, l’organismo intergovernativo incaricato della valutazione scientifica dei vari temi connessi ai cambiamenti climatici, ha messo in evidenza la “insostenibilità” del Protocollo di Kyoto e cioè la inadeguatezza degli impegni di riduzione da esso stabiliti. Il traguardo di una riduzione del 5,2% rispetto al livello del 1990 entro il 2012 per il complesso dei 38 Paesi industrializzati elencati nell’Annesso B al Protocollo è del tutto insufficiente se si tiene conto dei prevedibili incrementi di emissioni da parte dei Paesi in via di sviluppo e degli obiettivi di sostenibilità climatica delineati dall’IPCC.

Inoltre né il Protocollo né la Convenzione quadro sui cambiamenti climatici prevedono obiettivi orientati direttamente al problema dell’esauribilità delle risorse fossili. In realtà, gli impegni di riduzione delle emissioni previsti dal Protocollo incidono sulle convenienze di uso dei combustibili fossili, favorendo il ricorso al gas naturale (la fonte più scarsa in termini di riserve accertate ed economicamente convenienti), e, quindi, aggravano il problema della sua esauribilità. Considerata la scarsa elasticità di aggiustamento dei prezzi alla rarefazione delle fonti fossili, per uno sviluppo sostenibile sarebbe auspicabile accompagnare gli obiettivi di riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> con “tetti” di consumo delle fonti fossili più scarse.

Per quanto riguarda lo spazio ambientale dell’Italia in termini di combustibili fossili, esponiamo qui di seguito una procedura di calcolo sintetica e semplificata, basata sui seguenti criteri:

- costruire uno scenario esteso fino al 2050, basato sulle riserve attualmente accertate (non si prendono in considerazione i giacimenti di idrati di metano, il cui sfruttamento commerciale è improbabile entro l'arco di tempo esaminato, né quelli di scisti bituminosi, la cui competitività economica rispetto alle tecnologie solari emergenti è dubbia);
- assumere che nuovi ritrovamenti di combustibili vengano destinati a riserva per le future generazioni per usi di emergenza e per usi non energetici;
- ripartire equamente le riserve di combustibili fossili tra i vari Stati in ragione della rispettiva popolazione (tenendo conto delle previsioni delle Nazioni Unite circa l'evoluzione demografica, ciò significa che all'Italia da qui al 2050 spetta una quota pari all'0,76%);
- assumere che il 50% delle riserve attualmente provate di carbone venga indefinitamente conservato nel sottosuolo (per limitare le emissioni di CO<sub>2</sub>).

Sulla base di questi criteri è stata costruita la tabella 15 che, partendo dalla entità delle riserve provate dei tre combustibili, fornisce per ciascuno di essi lo spazio ambientale per l'Italia e il relativo tempo di esaurimento, nell'ipotesi che i consumi nazionali annui si mantengano costanti e pari a quelli del 2000. L'Italia, agli attuali ritmi di consumo, esaurirà la sua quota di petrolio in meno di 12 anni e quella di gas naturale in meno di 17, mentre riuscirà a rispettare lo spazio ambientale del carbone: più di 150 anni, cioè ben oltre il 2050. Anche raddoppiando il consumo annuo di carbone, il tempo di esaurimento della quota spettante all'Italia sarebbe sempre di quasi 80 anni.

Ovviamente, questo è solo un esercizio che traduce in maniera coerente i principi etico-politici della dichiarazione di Rio de Janeiro e della Convenzione quadro sui cambiamenti climatici. Ciò non significa che entro breve tempo l'Italia non disporrà più di gas e petrolio, bensì che l'Italia sta consumando risorse globali scarse, sottraendole non solo alle future generazioni, ma anche ad altri Paesi che, in base alle dimensioni della loro popolazione e alle loro esigenze di sviluppo, hanno pari interesse e diritto al loro consumo.

**Tabella 15: Spazio ambientale di petrolio, gas naturale e carbone per l'Italia, 2001-2050**

	<b>Petrolio</b>	<b>Gas naturale</b>	<b>Carbone</b>
<b>Riserve mondiali provate a fine 2000 (Mtep)</b>	142.000	135.000	486.000
<b>Disponibilità 2001-2050 al netto delle riserve da proteggere (Mtep)</b>	142.000	135.000	243.000
<b>Spazio ambientale per l'Italia 2001-2050 (0,76%) (Mtep)</b>	1.079	1.026	1.847
<b>Consumo nel 2000 (Mtep)</b>	93,3	60,9	11,7
<b>Tempo di esaurimento dello spazio ambientale italiano (anni)</b>	11,6	16,8	157,8

**Fonte:** *elaborazione Amici della Terra su dati BP Amoco. Wuppertal Institut, ENEA (REA 2000)*

### **3.3 UNA POSSIBILE EVOLUZIONE DEI CONSUMI MONDIALI DI COMBUSTIBILI FOSSILI**

A livello internazionale vengono elaborate diverse previsioni sulla evoluzione della domanda mondiale di combustibili fossili nei prossimi decenni. Senza l'intento di metterne in discussione l'affidabilità, esponiamo qui di seguito i risultati di una simulazione effettuata in proposito dagli Amici della Terra, allo scopo di mettere in luce come il problema dell'esauribilità del petrolio e del gas naturale diventerà più grave mano a mano che si farà sentire l'effetto combinato dell'aumento demografico e dell'aumento dei consumi pro capite dei Paesi in via di sviluppo.

La simulazione è basata, per quanto riguarda l'andamento della popolazione nelle varie aree del mondo, sulle previsioni del Dipartimento degli Affari Economici e Sociali delle Nazioni Unite ("World Population Prospects – The 1998 Revision", Medium variant). Anche in questo caso il mondo è stato suddiviso nelle seguenti aree caratterizzate da consumi omogenei:

- area OCSE, dalla quale, per motivi di coerenza tra le varie fonti di dati utilizzate, sono stati esclusi i tre Paesi entrati per ultimi a far parte di questa organizzazione (Polonia, Ungheria e Corea del Sud);
- area PECE-CIS (comprende anche Polonia e Ungheria);
- resto del mondo (comprende anche Corea del Sud).

Secondo queste proiezioni (le ultime elaborate dalle Nazioni Unite, corrette al ribasso rispetto alle precedenti), la popolazione mondiale, che oggi è di 6 miliardi, sarà di 7,5 miliardi nel 2020 e di 8,9 miliardi nel 2050. La popolazione OCSE raggiungerà il suo massimo nel 2035 e poi inizierà a decrescere. Nel 2020, anno in cui si arresta la nostra simulazione, l'insieme dei Paesi OCSE e PECE-CIS conterà 1,5 miliardi di abitanti e il resto del mondo 6 miliardi.

Per quanto riguarda i consumi pro capite, la simulazione si è basata sui valori storici dal 1975 al 1998. Per gli anni successivi (fino al 2020), essi sono stati ricavati in base alle seguenti assunzioni:

- nei Paesi appartenenti all'OCSE i consumi pro capite evolvono secondo la tendenza dell'ultimo decennio (carbone -9%; gas naturale +12,5%; petrolio +1,5%);
- nei Paesi del gruppo PECE-CIS i consumi pro capite evolvono tendendo ad eguagliare nel 2020 quelli dei Paesi OCSE. Questo comporta un lieve aumento dei consumi pro capite di carbone e gas ed un marcato aumento di quelli di petrolio;
- nei Paesi del resto del mondo i consumi pro capite aumentano linearmente fino a raggiungere nel 2020 il 40% di quelli dei Paesi OCSE.

Quest'ultima assunzione corrisponde ad una attuazione graduale dei principi di equità internazionale, inattaccabile sul piano etico-politico anche se improbabile e difficilmente realizzabile da un punto di vista tecnico-economico. In termini di consumi assoluti dei tre combustibili, questa assunzione è determinante in quanto la popolazione

del resto del mondo è numericamente preponderante rispetto a quella delle aree OCSE e PECE-CIS; nel 2020 essa rappresenterà l'80% dell'intera popolazione mondiale.

Le assunzioni sopra esposte non tengono conto di parametri economici né di possibili strategie energetiche adottate a livello internazionale né delle inevitabili ricadute sul problema dei cambiamenti climatici. Lo scopo della simulazione non è quello di formulare delle previsioni, ma solo quello di evidenziare la gravità del problema dell'esauribilità e di dimostrare come esso si intrecci con quello dell'equità internazionale e si aggravi tanto più quanto più sarà garantito ai Paesi in via di sviluppo l'accesso alle risorse fossili. La simulazione fornisce al 2020 un consumo pro capite di 4,2 tep/anno per i Paesi OCSE, appena superiore al livello attuale ma con un mix spostato a favore del gas e a discapito del carbone. Lo stesso valore è previsto per i Paesi PECE-CIS, e questo comporta in questo caso un forte aumento dei consumi petroliferi rispetto al mix attuale che è dominato dal gas. Per il resto del mondo il traguardo di 1,68 tep/anno (40% del valore previsto per i Paesi sviluppati) corrisponde a forti aumenti per tutti e tre i combustibili: da 0,25 a 0,84 tep/anno per i prodotti petroliferi, da 0,10 a 0,53 per il gas naturale e da 0,20 a 0,30 per il carbone.

Le assunzioni circa l'evoluzione dei consumi pro capite, combinate con le proiezioni delle Nazioni Unite, consentono di calcolare anno per anno i consumi di combustibili nelle tre aree considerate e, per somma, nel mondo. Per brevità, ci limitiamo a fornire i risultati relativi all'ultimo anno considerato nella simulazione, il 2020 (v. tabella 16). Il consumo mondiale complessivo di combustibili fossili supererà 16.000 Mtep, sarà cioè più che doppio rispetto all'attuale. Il consumo dei Paesi sviluppati sarà di oltre 6.000 Mtep (+17% rispetto al 2000), quello del resto del mondo sarà di 10.000 Mtep (4 volte il valore del 2000).

Nel ventennio 2001-2020, secondo la simulazione, si consumeranno complessivamente circa 110.000 Mtep di petrolio (il 75% delle riserve attualmente provate), 70.000 Mtep di gas naturale (50%) e 50.000 Mtep di carbone(10%). Anche ammettendo, in via semplificativa, che nuovi ritrovamenti compensino fino al 2020 i consumi annui e cioè che l'entità delle riserve provate rimanga invariata ed identica a quella che si aveva alla



fine del 2000, i tempi di esaurimento, valutati rispetto ai consumi annui del 2020, si ridurranno a 17, 26 e 164 anni rispettivamente per il petrolio, il gas e il carbone.

**Tabella 16: Consumi di combustibili fossili nel 2020 (Mtep)**

	<b>Petrolio</b>	<b>Gas</b>	<b>Carbone</b>	<b>TOTALE</b>
<b>OCSE</b>	2.322	1.479	838	<b>4.639</b>
<b>PECE-CIS</b>	848	540	306	<b>1.694</b>
<b>RESTO DEL MONDO</b>	5.024	3.201	1.812	<b>10.037</b>
<b>MONDO</b>	8.194	5.220	2.956	<b>16.370</b>

**Fonte:** *elaborazione Amici della Terra*



## **CAPITOLO 4: ESTERNALITA' E TECNOLOGIE PULITE DEL CARBONE**

### *4.1 COMBUSTIBILI E ESTERNALITA'*

Un confronto corretto tra i diversi combustibili utilizzati per la generazione di energia non può essere limitato alla sola fase di combustione, ma richiede l'analisi e la valutazione degli impatti sociali e ambientali connessi a tutte le fasi del loro ciclo di vita:

- estrazione del combustibile grezzo;
- trasporto del combustibile grezzo dal luogo di estrazione fino all'impianto di trattamento;
- impianto di trattamento del combustibile;
- trasporto del combustibile raffinato dall'impianto di trattamento fino all'impianto di produzione di energia;
- impianto di produzione di energia;
- trasporto dei rifiuti dell'impianto di produzione di energia fino alla discarica;
- discarica in cui vengono smaltiti i rifiuti prodotti.

Il corpo di studi più aggiornato e autorevole in materia è stato realizzato nell'ambito del progetto di ricerca denominato ExternE, finanziato dal 1991 ad oggi dalla DG 12 della Commissione Europea. Questo progetto di ricerca, monumentale per le sue dimensioni complessive, fu inizialmente avviato in collaborazione con l'US Department of Energy con l'obiettivo di raggiungere una quantificazione in termini economici del danno arrecato alla collettività dalla generazione di energia elettrica. Presto l'US DoE abbandonò il programma; la Commissione Europea continuò invece a supportarlo. Esso ha coinvolto più di 40 istituzioni di ricerca dei 15 Paesi membri e della Norvegia.

Nei primi anni sono state esaminate le varie forme di produzione di elettricità -centrali termoelettriche, idroelettriche, eoliche, fotovoltaiche, geotermiche, etc.- stimando gli effetti prodotti da impianti localizzati in oltre 60 diversi siti. I principali risultati di

questa prima parte degli studi sono stati pubblicati a cura della Commissione nel 1995, in sei tomi di oltre 2200 pagine complessive. A partire dal 1995, una volta definita e sperimentata la metodologia di valutazione dei costi esterni ambientali, il programma si è rivolto anche al settore dei trasporti, con lo scopo di valutare il costo ambientale per veicolo-km, passeggero-km e/o tonnellata-km delle principali tecnologie e modalità di trasporto. I primi risultati furono raggiunti nel 1997, e successivamente pubblicati in uno degli ulteriori quattro volumi editi dalla Commissione alla fine del 1999 (per un migliaio di pagine).

Al progetto ExternE viene riconosciuto il merito di avere impegnato in un comune lavoro competenze assai diverse: economisti, ingegneri, epidemiologi, agronomi, etc. nell'intento di approfondire con un approccio interdisciplinare le conoscenze degli effetti della produzione di energia e dei trasporti sulla salute umana e sull'ambiente. Il progetto ha definito una metodologia organica, adatta ad essere applicata all'analisi di diverse tecnologie, e a quantificare tutti gli impatti esaminati in una unica unità di misura, quella monetaria, con lo scopo di agevolare il confronto tra impatti tra loro differenti e di consentire la definizione di un ordine di merito tra diverse attività e tecnologie.

Non è possibile in questa sede sintetizzare i risultati degli studi realizzati nell'ambito del progetto ExternE, né fornire indicazioni semplificate per un confronto, anche di larga massima, tra i vari combustibili. Ognuno di essi presenta delle specificità nelle varie fasi del suo ciclo, che possono variare da un caso all'altro e che dipendono dalla localizzazione del giacimento e dell'impianto di combustione, dalle modalità di estrazione, di trattamento e di trasporto, dalla destinazione degli eventuali rifiuti, etc. In generale, sommando i valori monetari delle esternalità associate a tutte le fasi del ciclo di vita e riferendole all'unità di servizio reso (il kWh di elettricità netta generata, nel caso dell'impiego in impianti termoelettrici), il risultato più alto si ha per il carbone, seguito dai prodotti petroliferi e infine dal gas naturale.

Il progetto ExternE identifica un grande numero di impatti associati al ciclo di vita dei combustibili che colpiscono una moltitudine di ricettori e che vanno dai danni alla

salute dei lavoratori e della popolazione ai danni all'agricoltura e agli edifici, dall'occupazione di spazio alla perdita di biodiversità, dai danni agli ecosistemi acquatici agli effetti sulle foreste; per ogni fase del ciclo viene proposto un inventario di questi impatti e ne viene indicata la maggiore o minore gravità.

Un limite di ExternE ,che penalizza proprio il carbone, è l'assenza di criteri per quantificare i costi sociali associati all'esauribilità della risorsa, che pure hanno un indubbio peso, destinato ad aumentare nei prossimi decenni. Nè viene proposta una metodologia per quantificare i costi sociali di insicurezza degli approvvigionamenti e quelli dovuti alla instabilità dei prezzi, che sono certamente maggiori per il petrolio e il gas.

Un ulteriore osservazione riguarda l'utilizzo dei sottoprodotti in un impianto termoelettrico, quantitativamente molto importanti se il combustibile è carbone. E' noto che le ceneri da carbone, che sono considerate rifiuti speciali non pericolosi, vengono utilizzate per la produzione di cemento o come materiale inerte nelle pavimentazioni stradali. Analogamente, i gessi provenienti dagli impianti di desolfurazione hanno caratteristiche tali da consentirne una molteplicità di utilizzi. In questi casi gli inventari di ExternE si limitano a considerare le esternalità imputabili ai soli quantitativi non recuperati per il riutilizzo ma conferiti a discarica. In realtà una valutazione corretta deve accreditare all'impianto le esternalità evitate dal processo che utilizza tali sottoprodotti, in quanto essi vanno a sostituire una pari quantità di materiali la cui produzione e gestione non sarebbe priva di esternalità.

In conclusione, lo strumento più completo per la valutazione delle esternalità associate al ciclo di vita dei combustibili è costituito dalla metodologia ExternE, a cui rimandiamo per i necessari approfondimenti. In presenza di una base di dati adeguata e affidabile, essa consente di identificare e di quantificare sia in termini fisici che in termini monetari i principali impatti sociali e ambientali associati a tutte le fasi del ciclo di vita dei combustibili. Gli studi di caso effettuati secondo tale metodologia evidenziano che i danni preponderanti sono quelli imputabili alla fase di combustione e che essi crescono passando dal gas all'olio combustibile e al carbone. I danni associati

alle fasi diverse dalla combustione (estrazione, trattamento, trasporto del combustibile, smaltimento di eventuali rifiuti) sono generalmente pari a qualche per cento di quelli prodotti in fase di combustione, ma possono in alcuni casi superare il 10% e anche più.

Le valutazioni effettuate secondo la metodologia indicata da ExternE vanno però integrate con valutazioni riguardanti altri fattori non considerati da ExternE, per i quali non sono stati proposti criteri di quantificazione, quali essenzialmente il problema dell'esauribilità, quello della insicurezza degli approvvigionamenti, quello della instabilità dei prezzi, il credito derivante dall'utilizzo dei sotto prodotti.

#### *4.2 L'USO PULITO DEL CARBONE CON LE ATTUALI TECNOLOGIE: IL CASO DI BRESCIA*

Le tecnologie commercialmente disponibili consentono di limitare le emissioni degli impianti a carbone agli stessi livelli di quelle prodotte da impianti alimentati da combustibili liquidi.

L'emissione di polveri e di ceneri volatili viene limitata mediante l'impiego di dispositivi a ciclone, precipitatori elettrostatici o elettrofiltri, sistemi di lavaggio a umido e filtri.

Le emissioni di anidride solforosa ( $\text{SO}_2$ ), responsabile delle precipitazioni acide, possono venire ridotte in tre maniere: mediante desolforazione del carbone, mediante rimozione dei composti solforati durante il processo di combustione, mediante separazione dell'anidride solforosa dai gas combustibili. Quest'ultimo è il sistema più diffuso in tutto il mondo nelle centrali termoelettriche alimentate a polverino di carbone.

Gli ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ ), anch'essi responsabili delle piogge acide oltre che della formazione di ozono, vengono prodotti, durante la combustione del carbone, non solo a causa della combinazione dell'azoto e dell'ossigeno atmosferico alle alte temperature (fenomeno questo che avviene anche durante la combustione dei prodotti petroliferi e del gas naturale), ma anche a causa dell'ossidazione dei composti azotati presenti nel

carbone stesso. Sono state messe a punto diverse tecniche per la riduzione delle emissioni di ossidi di azoto: alcune si basano sulla rimozione degli  $\text{NO}_x$  dai gas combusti, ma la maggior parte di esse tende a limitare la formazione di tali ossidi, con accorgimenti diversi, agendo sul processo di combustione.

E' significativo il fatto che la attuale normativa italiana, che ha recepito una direttiva comunitaria del 1998, prevede, per gli impianti di combustione di potenza termica superiore a 500 MW destinati alla produzione di energia, gli stessi limiti di emissioni per gli impianti alimentati a carbone e per quelli alimentati da combustibili liquidi: 400  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  per l' $\text{SO}_2$ , 200  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  per gli  $\text{NO}_x$  e 50  $\text{mg}/\text{Nm}^3$  per le polveri. Questa circostanza dovrebbe contribuire a sfatare la convinzione che le centrali a carbone siano più inquinanti di quelle a petrolio.

Più complessa è la soluzione dei problemi ambientali e territoriali legati all'estrazione, al trattamento, allo stoccaggio, al trasporto e alla movimentazione del carbone, come anche alla collocazione dei residui di trattamento e delle ceneri. Sin dal 1980 il già citato progetto WOCOL, a cui ha partecipato anche l'Italia, nel costruire uno scenario di crescente impiego mondiale del carbone, aveva identificato le fasi più critiche indicando le soluzioni ambientalmente compatibili già disponibili e segnalando la necessità di ulteriori attività di ricerca per alcune di esse. Non possiamo in questa sede entrare nel dettaglio ma, senza voler sottovalutare né ignorare la complessità di questi problemi, esprimiamo la nostra convinzione che, se affrontati con la dovuta attenzione, essi possono trovare adeguata soluzione.

In Italia, l'ENEL ha adottato sistemi di desolfurazione a umido e di riduzione catalitica degli ossidi di azoto che consentono di contenere le emissioni inquinanti entro i limiti previsti dalla legge. L'ENEL ha inoltre sviluppato la tecnica RIDOX, basata su quattro processi indipendenti, due dei quali dedicati al contenimento degli ossidi di zolfo e due al contenimento degli ossidi di azoto, impiegabili in maniera combinata e particolarmente adatti ad essere utilizzati su impianti già in esercizio e di minore potenza.

A seguito del DM 12 luglio 1990, l'ENEL ha attuato un programma di riduzione delle emissioni degli impianti termoelettrici che dovrebbe essere completato entro il 2002. In particolare, gli impianti funzionanti a carbone vengono dotati di sistemi di desolforazione e denitrificazione dei fumi e di abbattimento delle polveri, rendendoli pienamente rispondenti alla normativa sulle emissioni. Al termine del programma, un insieme di impianti per complessivi 6000 MW dovrebbe essere in grado di bruciare 12 milioni di tonnellate all'anno di carbone in maniera ambientalmente compatibile producendo 35 TWh.

Un bell'esempio di impianto a carbone è fornito dalla caldaia messa in servizio nel 1988 dalla Azienda Servizi Municipalizzati di Brescia. La caldaia alimenta il terzo turbogruppo di cogenerazione della centrale di teleriscaldamento Lamarmora, situata nella zona sud della città, a circa 2 km dal centro storico, in prossimità di quartieri densamente popolati. L'inserimento in una zona urbana, richiesto dalla necessità di minimizzare le perdite della rete di calore, è stato consentito dalla adozione di adeguati impianti di depurazione dei fumi per l'abbattimento delle polveri e degli ossidi di zolfo e di sistemi per la riduzione della formazione di ossidi di azoto. L'impianto di scarico, movimentazione e stoccaggio del carbone è chiuso e tenuto in depressione per evitare la dispersione di polveri all'esterno; accorgimenti analoghi sono adottati nei sistemi di evacuazione delle ceneri e dei prodotti esausti del desolforatore. Le ceneri vengono utilizzate da un vicino cementificio e il residuo del desolforatore è impiegato per la produzione di malte impermeabili.

La stessa azienda di Brescia, nell'ambito di un progetto integrato per la gestione dei rifiuti solidi urbani mirante a minimizzare il ricorso alla discarica, ha realizzato un impianto di cogenerazione, il cosiddetto termoutilizzatore, alimentato dalla frazione di rifiuti non utilmente riciclabili come materiali. Al pari dell'impianto a carbone, il termoutilizzatore genera energia elettrica, che riversa sulla rete della stessa azienda, e calore, che viene immesso nella rete di teleriscaldamento; esso è situato non lontano dalla centrale Lamarmora da cui lo separa l'autostrada Milano-Venezia. Il termoutilizzatore, entrato in servizio nel 1998, fa uso delle migliori tecnologie di protezione ambientale, produce emissioni in atmosfera di livello notevolmente inferiore



a quanto prescritto dalla normativa, provvede alla inertizzazione delle polveri raccolte dai filtri e delle scorie di combustione, di cui si sta studiando il riutilizzo in sostituzione di ghiaia estratta da cava.

Gli impianti di Brescia sono un esempio unico per l'Italia, mentre nei Paesi nordici i casi di impianti urbani sono numerosi. La rete di teleriscaldamento di Vienna è alimentata da otto impianti, tre dei quali usano rifiuti solidi urbani come combustibile. Molte città danesi sono teleriscaldate da impianti di cogenerazione urbani che bruciano carbone, rifiuti, paglia o biogas. In Svizzera, paese della cui attenzione ambientale nessuno può dubitare, fabbriche e ciminiere sono nelle città; l'inceneritore di Zurigo è in centro, vicino alla stazione, per rendere più corta la rete di distribuzione del calore. Naturalmente l'impianto è costruito e gestito in modo tale da produrre disturbo e inquinamento in misura trascurabile.

Tutti questi esempi dimostrano che un impianto termoelettrico di tecnologia convenzionale, alimentato a carbone o a rifiuti, può essere tanto "pulito" da essere collocato in città. Le tecnologie già oggi disponibili consentono di realizzare e gestire impianti urbani senza generare opposizione da parte delle popolazioni.

#### *4.3 LE TECNOLOGIE EMERGENTI PER L'USO PULITO DEL CARBONE*

Se già oggi il carbone può essere impiegato in modo ambientalmente compatibile utilizzando tecnologie convenzionali, numerose tecnologie innovative emergenti, alcune delle quali già disponibili commercialmente, consentiranno nei prossimi anni di impiegarlo con sempre maggiore efficienza e minore impatto ambientale. Citiamo, tra le tecnologie promosse dal Department of Energy degli Stati Uniti, dalla Unione Europea, dal Clean Coal Center dell'Agenzia Internazionale dell'Energia e da altri organismi esteri, i sistemi avanzati a polverino di carbone, i cicli combinati a combustione esterna, le turbine a gas e i motori diesel alimentati direttamente da carbone, i sistemi di combustione a letto fluido pressurizzato o circolante, i sistemi magnetoidrodinamici, gli impianti integrati gassificazione/ciclo combinato (IGCC in sigla inglese), gli impianti integrati gassificazione/celle a combustibile.

Altre tecnologie innovative promettenti sono quelle che hanno l'obiettivo di ricavare dal carbone combustibili liquidi per la trazione e altri prodotti chimici a costi competitivi con gli analoghi prodotti derivati dal petrolio. La liquefazione diretta consiste nella conversione catalitica del carbone in idrocarburi liquidi leggeri, per reazione con idrogeno ad alta temperatura e alta pressione. La liquefazione indiretta invece è basata sulla conversione catalitica di gas di sintesi ottenuti dalla gassificazione del carbone. Entrambi i processi possono essere gestiti nel pieno rispetto di normative ambientali molto severe. Il Department of Energy degli Stati Uniti sta infine conducendo un programma, chiamato di gassificazione leggera, che mediante processi di pirolisi del carbone a bassa temperatura e successive trasformazioni fisico-chimiche, ottiene dal carbone tutta una serie di prodotti pregiati solidi, liquidi e gassosi che possono trovare impiego come combustibili e come prodotti per l'industria chimica e per altri numerosi settori industriali.

E' importante osservare che la maggior parte delle tecnologie innovative prima citate godono di una caratteristica particolarmente interessante, quella di avere un costo specifico di impianto poco dipendente dalla taglia; ad esempio, un impianto di gassificazione a ciclo combinato da 100 MW ha un costo per MW installato poco maggiore di quello di uno da 500 MW. Questa peculiarità è favorevole alla diffusione di impianti innovativi di piccola e media taglia, che non necessitano di infrastrutture di grandi dimensioni e che permettono di adeguare in tempi brevi e con flessibilità l'offerta alla domanda.

Tutte queste tecnologie, chiamate "clean coal technologies", essendo state sviluppate in tempi recenti o essendo tuttora in fase di sviluppo, garantiscono la rispondenza a standard ambientali notevolmente più severi degli attuali. In generale, possono essere rispettati limiti di emissioni confrontabili o migliori di quelli degli impianti a ciclo combinato gas-vapore alimentati a gas naturale.

I valori del rendimento netto attualmente raggiungibili vanno dal 40 al 50%; in prospettiva per alcune di queste tecnologie potranno essere ottenuti rendimenti più

elevati, fino al 55% ed oltre, dipendentemente dai perfezionamenti di alcuni materiali e componenti.

La tecnologia più promettente è quella della gassificazione, che è ormai commerciale sia in Europa che negli Stati Uniti, e che anche in Italia conta già tre impianti operativi (Sarlux, API, ISAB per la gassificazione dei residui pesanti di raffineria). L'interesse per la gassificazione è determinato da numerosi fattori, tra i quali la possibilità di utilizzare non solo carbone, ma tutta una gamma di combustibili poveri e difficili, la possibilità di impiegare il gas di sintesi in impianti a ciclo combinato gas-vapore di elevato rendimento, le basse emissioni di SO<sub>2</sub> e di NO<sub>x</sub> peculiari di questa tecnologia, il vantaggio di ottenere sottoprodotti facilmente gestibili (ad esempio zolfo ad elevato grado di purezza e quindi commerciabile, ceneri in forma di scorie vetrificate inerti, utilizzabili in edilizia).

In Italia, dopo anni di rinvii, è stato varato nel 1994 il progetto Sulcis, che prevede la realizzazione di un impianto per la produzione di energia elettrica basato sulla tecnologia di gassificazione del carbone, integrata con un ciclo combinato (IGCC). L'impianto, di potenza elettrica netta pari a 450 MW, è stato localizzato nella regione del Sulcis-Iglesiente (nel Sud della Sardegna, a 70 km da Cagliari), e prevede l'utilizzo del carbone estratto dalle locali miniere (che è un carbone di modesta qualità, con il 7% di zolfo e il 18% di ceneri) miscelato con carbone di importazione.

Come evidenziato nel Rapporto Energia e Ambiente 2000 dell'ENEA, la realizzazione dell'impianto Sulcis risponde a molteplici esigenze:

- l'utilizzazione di una importante risorsa energetica nazionale;
- il miglioramento del quadro ambientale, tramite l'adozione di una tecnologia che consente un elevato livello di controllo delle emissioni;
- il mantenimento del livello occupazionale, che costituisce un problema molto pesante in un'area caratterizzata da una cultura industriale ben radicata;

- l'acquisizione di conoscenze specifiche in un'area tecnologica (la gassificazione) in rapida evoluzione, nella quale l'Italia ha già un ruolo di primo piano che può essere definitivamente consolidato con la realizzazione del nuovo impianto.

A conclusione di questi brevi cenni sulle "clean coal technologies" riportiamo qui di seguito la scheda informativa pubblicata dall'ENEA nel Rapporto sopracitato.

## **LE TECNOLOGIE PULITE DEL CARBONE**

### **Polverizzazione del carbone (Pulverised Fuel - PF - Combustion)**

È la tecnica di combustione oggi maggiormente diffusa nella produzione di energia ed è adottata da tutti gli impianti italiani a carbone in funzione che prevedono l'utilizzo della sola turbina a vapore. Consiste nella macinazione finissima del carbone il cui pulviscolo viene iniettato in camera di combustione con un flusso d'aria tramite appositi bruciatori; l'efficienza di combustione è superiore al 99% consentendo un completo utilizzo del combustibile che non viene quindi riversato nell'atmosfera. Questa tecnologia sta avendo ulteriori sviluppi nei bruciatori a bassa emissione di NOx che utilizzano carboni sempre più finemente polverizzati.

### **Tecnologia Ultrasupercritica (USC)**

Rappresenta l'evoluzione della tecnologia tradizionale PF con turbina a vapore. I parametri termodinamici vengono spinti fino a 600-630 °C e le pressioni fino a 300-320 bar, introducendo innovazioni di tipo fluidodinamico sul macchinario e tecnologie più avanzate di combustione. La tecnologia USC si è affermata nei paesi scandinavi dove già esiste una legislazione sul controllo della CO<sub>2</sub> e si sta sviluppando in Germania dove sono in ordine impianti per 2000 MW con rendimenti attesi del 47-48%; il Giappone ha un piano USC di grande impegno ed i grandi paesi asiatici la stanno valutando attentamente per il futuro.

### **Gassificazione del carbone (Integrated Gasification Combined Cycle - IGCC)**

Rappresenta un'alternativa al sistema attuale di combustione del carbone e consiste nel portare il polverino ad elevata temperatura a contatto con vapore ed ossigeno. Tramite reazioni chimiche viene prodotto un gas utilizzato nelle turbine a gas, mentre i fumi caldi di scarico sono in grado di generare vapore che alimenta una turbina vapore. I

rendimenti attesi sono dell'ordine del 50%. L'aspetto ambientale della tecnologia è molto interessante in quanto lo zolfo presente nel carbone può essere quasi completamente recuperato in forma commerciale e le ceneri sono convertite in scorie vetrificate ambientalmente inerti. Lo stato dell'arte di questa tecnologia è rappresentato da sei progetti dimostrativi funzionanti con taglie comprese tra 80 e 318 MW, di cui quattro negli USA e due in Europa (Olanda e Spagna), realizzati con varie tecnologie che si sono progressivamente affermate (TEXACO, SHELL, DOW, KRUPP, PRENFLO).

#### **Combustione a letto fluido (Fluidised Bed Combustion - FBC)**

Si tratta di un sistema di combustione del carbone in un letto di particelle riscaldate sospese in un flusso gassoso che consente una loro rapida miscelazione. Attualmente sono disponibili due tipi di letto fluido pressurizzato: a letto ribollente ed a letto circolante, mentre quelli a pressione atmosferica hanno già raggiunto un grosso successo commerciale anche se con prestazioni limitate. Le efficienze attese sono dell'ordine del 42-45% e si collocano tra gli IGCC e gli impianti convenzionali; mentre le prestazioni ambientali sono decisamente promettenti in quanto consentono di eliminare gli SO<sub>x</sub> al 90% come residui gassosi stabili e di ridurre gli NO<sub>x</sub> prodotti date le più basse temperature di combustione. Sono attualmente in funzione sette impianti dimostrativi con potenze fino a 350 MW. A livello europeo emerge la tecnologia ABB ALSTOM con impianti in Germania, Svezia e Spagna.

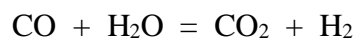
#### **Cicli combinati a combustione esterna (Externally Fired Combined Cycles - EFCC)**

Si tratta di impianti nei quali un ciclo combinato convenzionale può essere alimentato dai fumi provenienti dalla combustione esterna di combustibili "poveri" (biomasse, rifiuti) o di carbone. Essi prospettano rendimenti dell'ordine del 45-50% ma il loro stadio di maturazione è situato non prima del 2010 in quanto risulta critico lo sviluppo dello scambiatore di calore che, a causa delle alte temperature e dei fumi fortemente aggressivi, deve necessariamente essere di tipo ceramico. Programmi dimostrativi di una certa entità sono in corso in USA finanziati dal DOE ed in Europa su iniziativa di Ansaldo, ENEA ed ENEL.

#### 4.4 LA PRODUZIONE DI IDROGENO DA CARBONE

Il gas di sintesi prodotto in un impianto di gassificazione del carbone è costituito essenzialmente da ossido di carbonio (CO) e idrogeno (H<sub>2</sub>). Questa miscela, in un impianto integrato gassificazione/ciclo combinato, costituisce il combustibile dell'impianto a ciclo combinato gas-vapore. Sia l'ossido di carbonio che l'idrogeno, infatti, reagiscono con l'ossigeno dell'aria sviluppando calore.

Esistono però utilizzazioni differenti per il gas di sintesi prodotto dal gassificatore. E' infatti possibile sottoporlo ad un processo cosiddetto di "shift conversion" facendo reagire l'ossido di carbonio con del vapore d'acqua a circa 200°C. In questo modo si ottiene la trasformazione del CO in anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) secondo la seguente reazione, anch'essa esotermica:



Se si attua una trasformazione totale dell'ossido di carbonio contenuto nel gas di sintesi, il risultato finale dell'intero processo (gassificazione del carbone + shift conversion) sarà costituito da idrogeno e anidride carbonica. L'idrogeno prodotto dalla reazione di shift si aggiunge infatti a quello prodotto dal gassificatore ed è l'unica specie combustibile presente nel gas finale. La CO<sub>2</sub> può essere separata mediante processi fisici o chimici, alcuni dei quali sono già industrialmente maturi, con l'obiettivo di confinarla in fondo agli oceani o nel sottosuolo.

In luogo di una trasformazione totale del CO in CO<sub>2</sub> se ne può attuare una trasformazione parziale, ottenendo come risultato una miscela di ossido di carbonio e idrogeno più ricca in idrogeno rispetto al gas generato dal gassificatore. Questa miscela può essere utilizzata per produrre dei combustibili liquidi ossigenati come il metanolo e il dimetiletere, i quali si prestano ad essere trasportati e utilizzati a distanza e in tempo differito. Essi possono anche essere sottoposti a un semplice processo cosiddetto di "reforming" con vapore, producendo CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> e rendendo disponibile l'idrogeno presso

utenze lontane. Anche in questo caso la CO<sub>2</sub> può essere separata con l'obiettivo di confinarla.

Gli Amici della Terra esprimono forti perplessità sulle modalità di confinamento della CO<sub>2</sub>, la cui praticabilità e affidabilità non sono ancora state dimostrate; mentre ritengono interessanti le possibilità offerte dalle tecnologie di gassificazione del carbone + shift conversion totale o parziale del gas di sintesi. I meriti di queste tecnologie sono infatti quello di consentire un uso pulito ed efficiente del carbone e quello di anticipare e stimolare un interesse industriale per le applicazioni dell'idrogeno.

Un'ulteriore possibilità offerta dalla gassificazione del carbone integrata dal processo di shift conversion totale è quella di utilizzare l'idrogeno usando come comburente non aria bensì ossigeno puro. Poiché nel gassificatore è presente una sezione di produzione dell'ossigeno (in quanto l'ossigeno è necessario nel processo di gassificazione), è possibile potenziarne la capacità produttiva per ottenere anche la giusta quantità di ossigeno occorrente per la combustione dell'idrogeno. La combustione dell'idrogeno con ossigeno anziché con aria elimina il problema della formazione degli ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>), consentendo di realizzare impianti ad emissioni virtualmente nulle, in quanto gli altri inquinanti tradizionali, e in particolare la SO<sub>2</sub> e le polveri, sono assenti in virtù dei trattamenti a cui è sottoposto il gas di sintesi prima di essere avviato alla combustione.

## BIBLIOGRAFIA

- Amici della Terra, Wuppertal Institut, *Verso un'Europa sostenibile*, Maggioli 1996
- Amici della Terra, *Attuazione degli accordi internazionali per la protezione dell'atmosfera e sviluppo sostenibile, con particolare riferimento al clima globale*, Rapporto per il Ministero dell'Ambiente, 1997
- Amici della Terra, *Studio preliminare sulla quantificazione dei vantaggi della cogenerazione*, Rapporto per UNAPACE, 1997
- Amici della Terra, *La scommessa di Kyoto* (a cura di Andrea Molocchi), FrancoAngeli 1998
- Amici della Terra, *Quantificazione economica dei vantaggi ambientali di un programma di cogenerazione e teleriscaldamento*, Rapporto per la Regione Lombardia, 2000
- Amici della Terra, *La competitività delle fonti rinnovabili*, Rapporto per il Ministero dell'Ambiente, 2001
- ANPA – Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, *sito web*  
[www.sinanet.anpa.it](http://www.sinanet.anpa.it)
- BP Amoco, *BP Statistical Review of World Energy june 2001*
- CIPE, Comitato Interministeriale per la Programmazione Economica, *Linee guida per le politiche e misure nazionali di riduzione delle emissioni dei gas serra*, Deliberazione n.137 del 19 novembre 1998
- Coiante D., *Lo sviluppo delle Fonti Rinnovabili e la Produzione di Idrogeno come Combustibile Alternativo*, ENEA Rapporto tecnico RT/ERG/95/01, 1995
- Commissione delle Comunità Europee, *Energy for the future: renewable sources of energy*, (White paper) COM(97) 599 final
- Commissione delle Comunità Europee, *European Union Energy Outlook to 2020*, 1999
- Commissione delle Comunità Europee, *Verso una strategia europea di sicurezza dell'approvvigionamento energetico*, (Libro verde) COM(2000) 769 def.
- Commissione delle Comunità Europee, *Per uno sviluppo durevole e sostenibile – Programma politico e d'azione della Comunità europea a favore dell'ambiente e di uno sviluppo sostenibile*, COM(92) 23 def. 1992, (“Quinto Programma”)



ENEA, *Rapporto Energia e Ambiente (REA) 2000*

ENEL, *Dati statistici sull'energia elettrica in Italia*, anni vari

ENEL, *Rapporto ambientale 1999*

European Environment Agency (EEA), *sito web www.eea.eu.int*

ExternE (1995), *Externalities of Energy*, vol. 1-6, European Commission DG-XII, EUR 16520-16525, Bruxelles

ExternE (1999), *Externalities of Energy*, vol. 7-10, European Commission DG-XII, EUR 19083-18836-18887-18528, Bruxelles

Falchetta M., Galli S., *Idrogeno da fonti rinnovabili: limiti attuali e prospettive*, Energia Ambiente e innovazione, 1/2001

GRTN, *Dati statistici sull'energia elettrica in Italia 1999*

International Energy Agency (IEA), *World Energy Outlook 2000*

International Energy Agency (IEA) – Coal Research, *Guide to Cleaner Coal Technology-Related Websites*, 2001

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change, *Second Assessment Report*, 1995

Lovins A.B., *L'alternativa energetica*, Amici della Terra 1977

Lovins A.B., *Energia dolce*, Bompiani 1979

Ministero dell'Ambiente, *Seconda comunicazione nazionale dell'Italia alla convenzione quadro sui cambiamenti climatici*, 1998

Ogden J.M., Willams R.H., *Solar Hydrogen: Moving Beyond Fossil Fuels*, World Resources Institute, 1989

Signorino M., *Piano nazionale di sviluppo sostenibile*, su incarico del Ministro dell'ambiente, 2000

UNCED, *Agenda 21: Programme of Action for Sustainable Development*, 1992

UNCED, *Rio Declaration on Environment and Development*, 1992

UNI – CTI, n. 8887 “*Sistemi per processi di cogenerazione – Definizioni e classificazione*”

UNITED NATIONS Secretariat Department of Economic and Social Affairs, *World Population Prospects – The 1998 Revision*, 1998

USDOE, *Strategic & Multi-Year Program Plans*, Cd-rom 2001

von Weizsäcker E.U., Lovins A.B., Lovins L.H., *Fattore 4*, Edizioni Ambiente 1998

WEC, *Penetration of Intermittent Sources into Energy Systems*, Kogan Page ed., 1994

