

Capitolo 2 – Il ruolo dell'idrogeno nel panorama energetico mondiale

2.1 – Il problema energetico

L'energia (dal greco <<εν>> ed <<εργον>> che significano, rispettivamente, “in” e “lavoro”) è un bene di fondamentale importanza per la società. E' un'entità complessa da definire: è considerata come una capacità potenziale di compiere un lavoro. La storia dell'energia può essere suddivisa in 10 grandi tappe a partire da un milione e mezzo di anni fa (per un milione e 200 mila anni i nostri progenitori *-homo erectus-* hanno vissuto a livello animale o poco più):

- 1° tappa: l'uomo scopre il fuoco. Il fabbisogno energetico pro-capite sale da 1.100.000 calorie/anno (necessarie per la sola alimentazione) a 2.200.000;
- 2° tappa: scoperta dell'agricoltura, nel 7000 a.c. Il fabbisogno si raddoppia ancora e arriva a 4.500.000 calorie/anno;
- 3° tappa: nasce la metallurgia, nel 4000 a.c.
- 4° tappa: Antipatro di Tessalonica cita il mulino ad acqua, nel primo secolo a.c.;
- 5° tappa: gli Arabi introducono il mulino a vento, verso il 650 d.c.;
- 6° tappa: Nel 1300 viene impiegata, in Europa, la polvere da sparo, è la prima forma di energia artificiale;
- 7° tappa: verso il 1600 si introduce l'uso del carbon fossile nella produzione industriale: il fabbisogno energetico individuale subisce un'impennata da 5.000.000 a 15.000.000 di calorie;
- 8° tappa: Inizio dell'utilizzazione del petrolio;
- 9° tappa: il 2 dicembre 1942 il fisico italiano Enrico Fermi innesca la prima reazione a catena artificiale della storia: nasce l'energia nucleare. Il fabbisogno energetico si attesta a 35.000.000 di calorie annue pro capite;
- 10° tappa: non è stata ancora raggiunta, ma probabilmente consisterà nello sfruttamento dell'energia della fusione nucleare: il deuterio contenuto in un litro di acqua può produrre un'energia pari a quella fornita da oltre 300 litri di benzina o 550 Kg di carbone;

Da quanto sopra riportato si evince che il progresso umano è andato di pari passo col consumo energetico. Ancora oggi si nota che nelle regioni del mondo sottosviluppate al si sotto di una soglia

minima del consumo energetico aumenta la mortalità infantile e diminuisce l'aspettativa di vita. Nella tabella 2.1 si riportano degli esempi di consumo energetico.

UTENZA	POTENZA (KW)	ENERGIA CONSUMATA IN 8 ORE (KWh)
Lampadina elettrica	0.06	0.48
Scaldabagno	1	8
Trapano elettrico	0.7	5.6
Automobile media	50	400
Televisore	0.15÷0.25	1.2÷2
Stufa elettrica	1÷2	8÷16
Radio a transistor	0.0005	0.004
Locomotiva elettrica	3000	24000
Asciugacapelli	0.6÷1.2	4.8÷9.6
Essere umano	0.006	0.48

Tabella 2.1 – Esempio di consumi energetici [2.1]

Con la propria forza muscolare un uomo può sviluppare 100 KWh all'anno, per non morire di fame necessita di 1000 KWh/anno sotto forma di cibo, per vivere dignitosamente ha bisogno di 50000 KWh/anno (equivalenti a 6.1 Tec - tonnellate di carbone equivalente - o 63 grammi di uranio in una centrale LWR) [2.2]. E' stato quindi sempre necessario moltiplicare il lavoro prodotto dalla forza muscolare attraverso lo sfruttamento delle altre fonti di energia. Riguardo ai consumi energetici vanno evitati sprechi ed inefficienze, ma un sufficiente approvvigionamento energetico fa parte dei più elementari diritti umani (fig. 2.1).

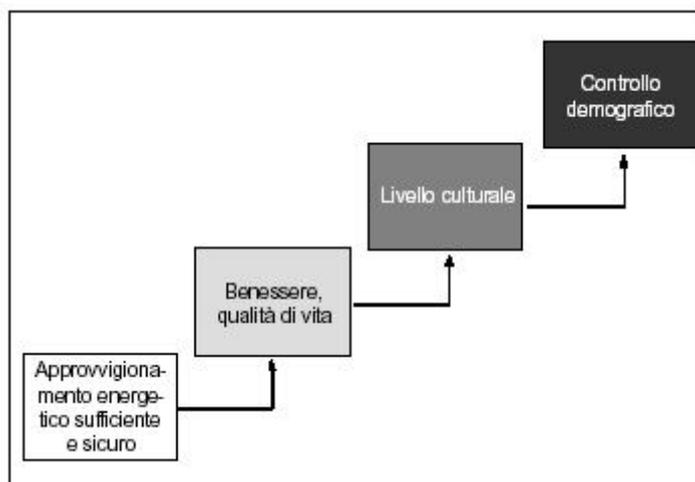


Figura 2.1 – Implicazioni di un adeguato approvvigionamento energetico

Oggi il consumo mondiale di energia si attesta a 14.3 miliardi di Tec, pari a 2.27 Tec/anno pro capite. Tuttavia sussistono differenze enormi: si va da 11.6 Tec all’anno pro capite negli USA a 0.7 nel Terzo Mondo, che quindi vivono sotto la soglia di povertà. Tale situazione è evidenziata nella tabella 2.2.

	Tep pro capite (1996)
U.S.A.	8
OCSE	4
Italia	2.9
Cina	0.9
India	0.5
Mondo	1.7

Tabella 2.2 – Consumi energetici pro capite nell’anno 1996 in Tep (Tonnellate equivalenti di petrolio) [2.3]

Dal 1850 ad oggi, la domanda mondiale di energia è cresciuta di circa 10 volte (fig. 2.2).

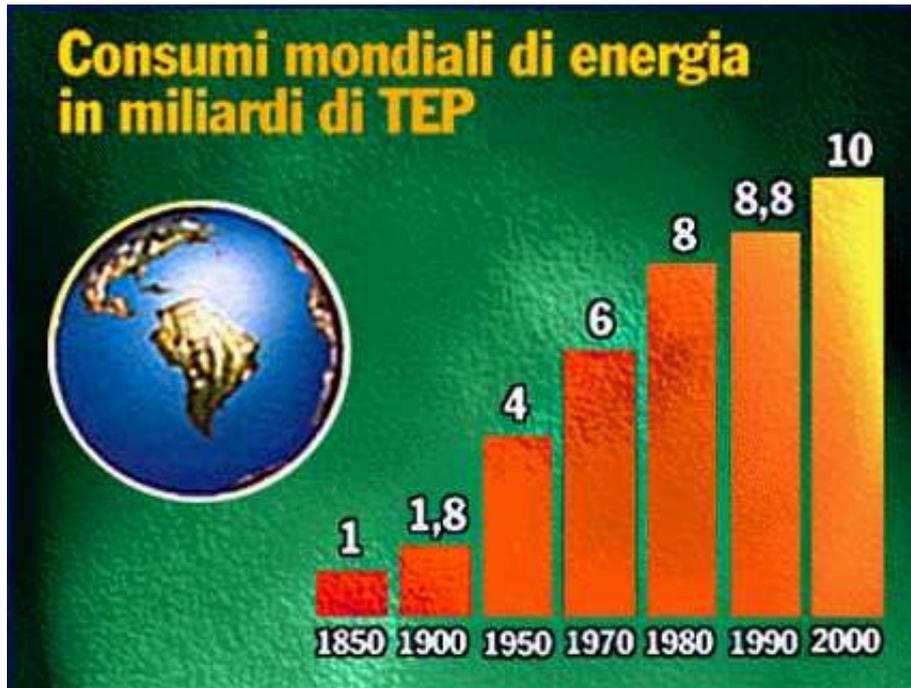


Figura 2.2 – Consumi mondiali di energia, in Tep, dal 1850 ai giorni nostri

I combustibili fossili costituiscono la quasi totalità delle fonti di energia primaria nel mondo (fig. 2.3, 2.4 e 2.5).

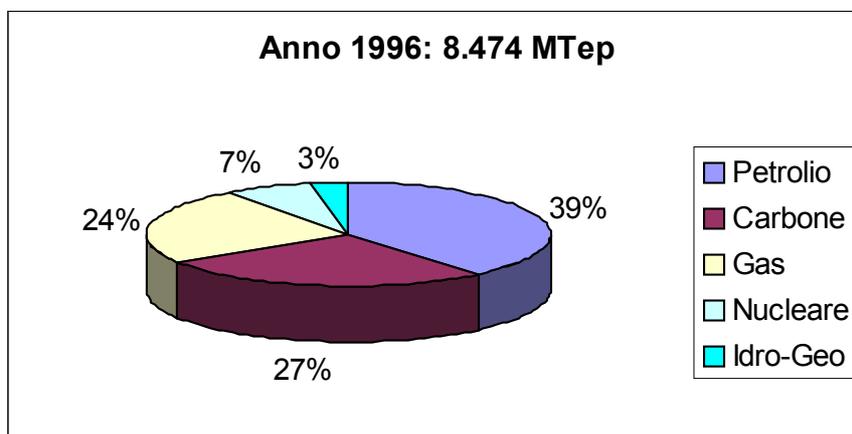
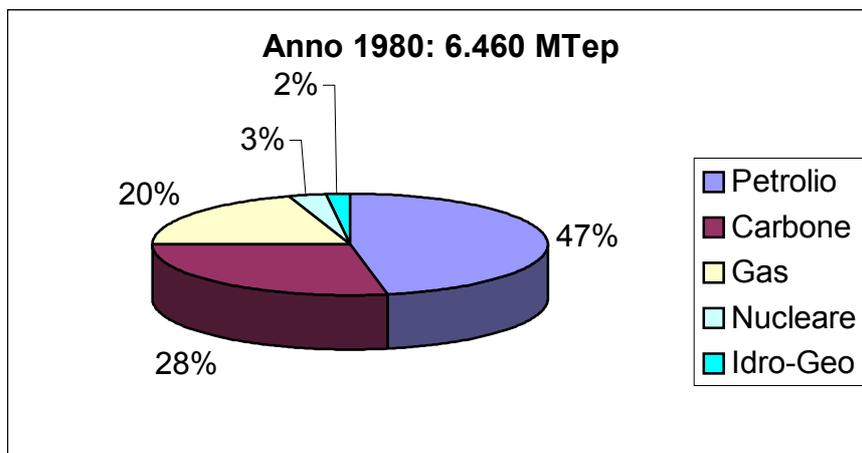


Figura 2.3 – Consumi mondiali di energia per fonti [2.3]

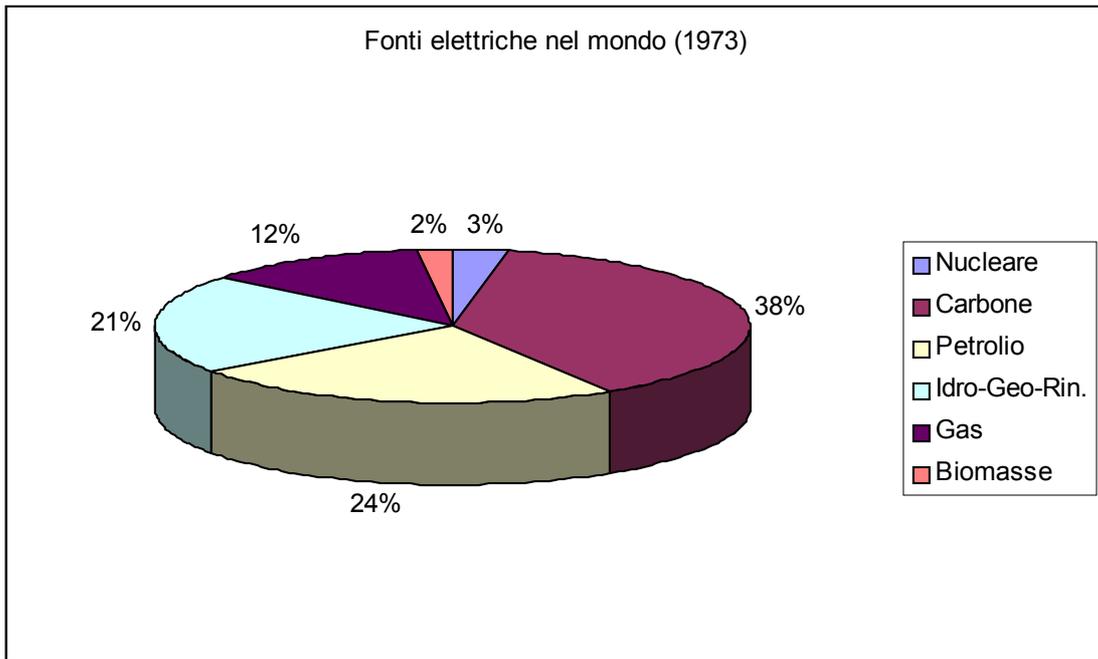


Figura 2.4 – Fonti elettriche nel mondo nel 1973 [2.23]

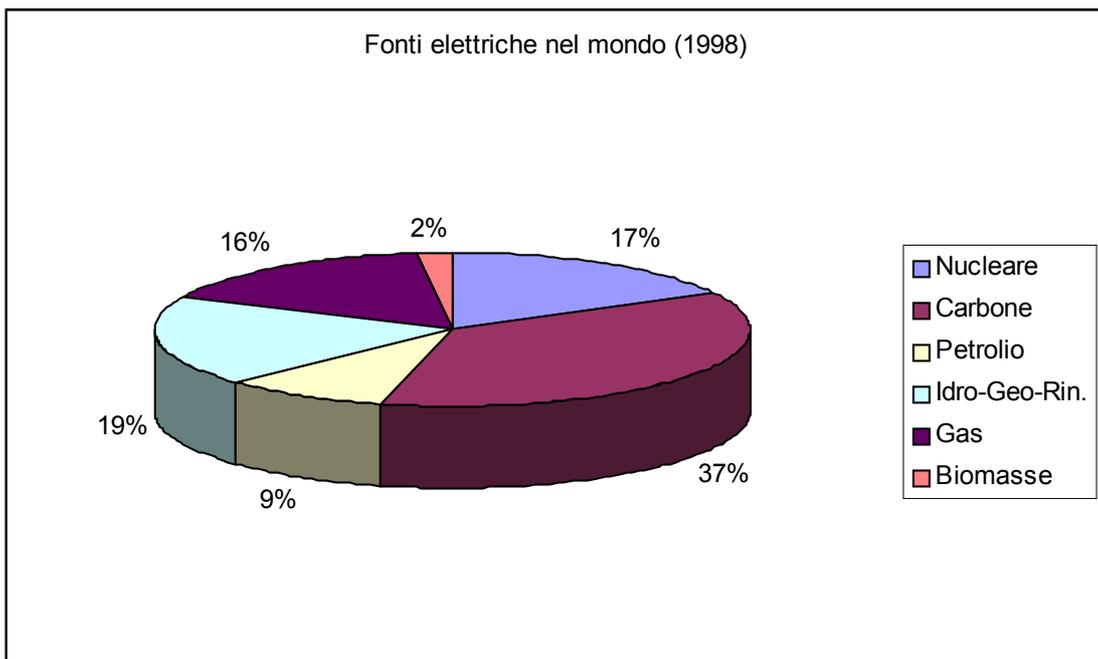


Figura 2.5 – Fonti elettriche nel mondo nel 1998 [2.23]

Per confronto si riportano i consumi italiani divisi per fonte (figura 2.6, 2.7 e 2.8).

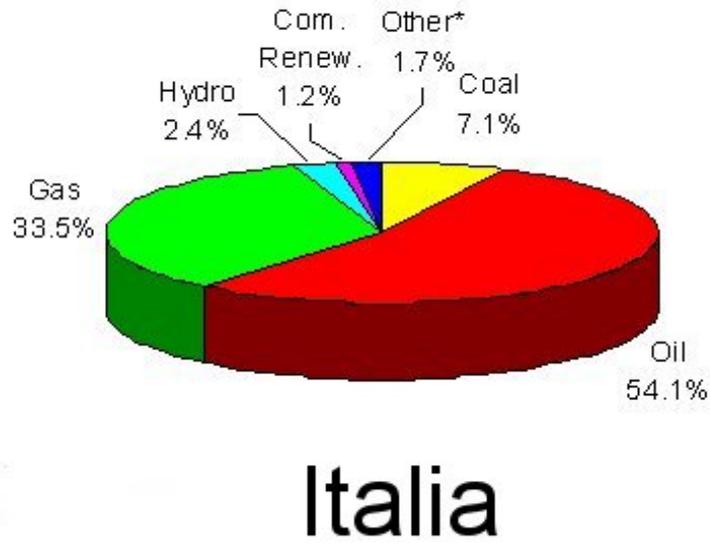


Figura 2.6 – Consumi energetici italiani divisi per fonte nel 1999 [2.21]

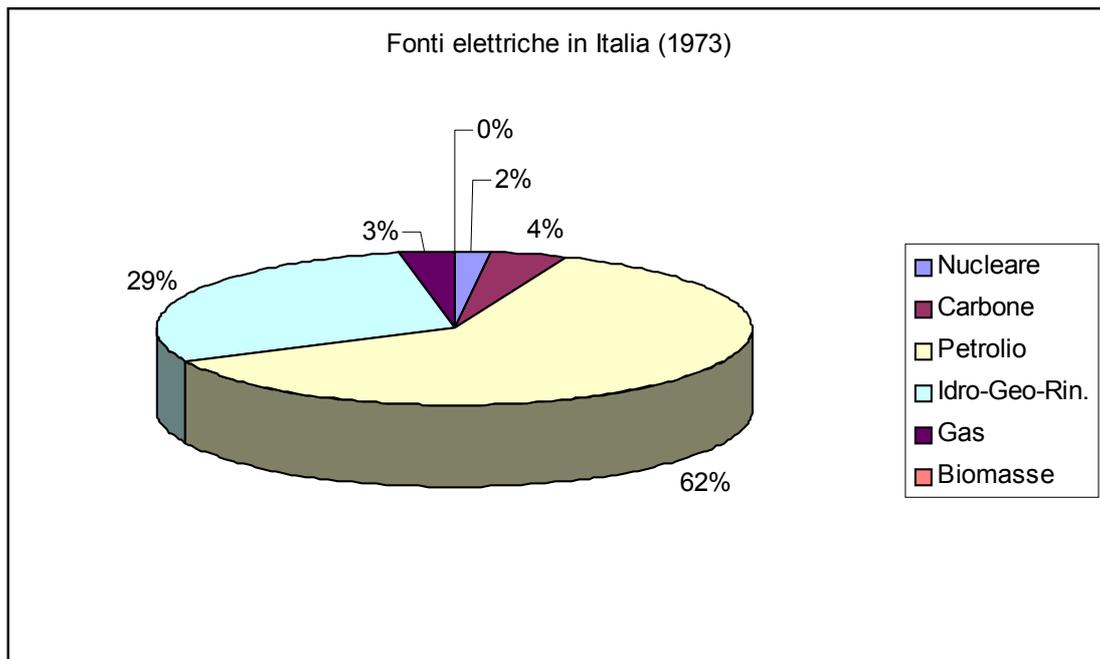


Figura 2.7 – Fonti elettriche in Italia nel 1973 [2.23]

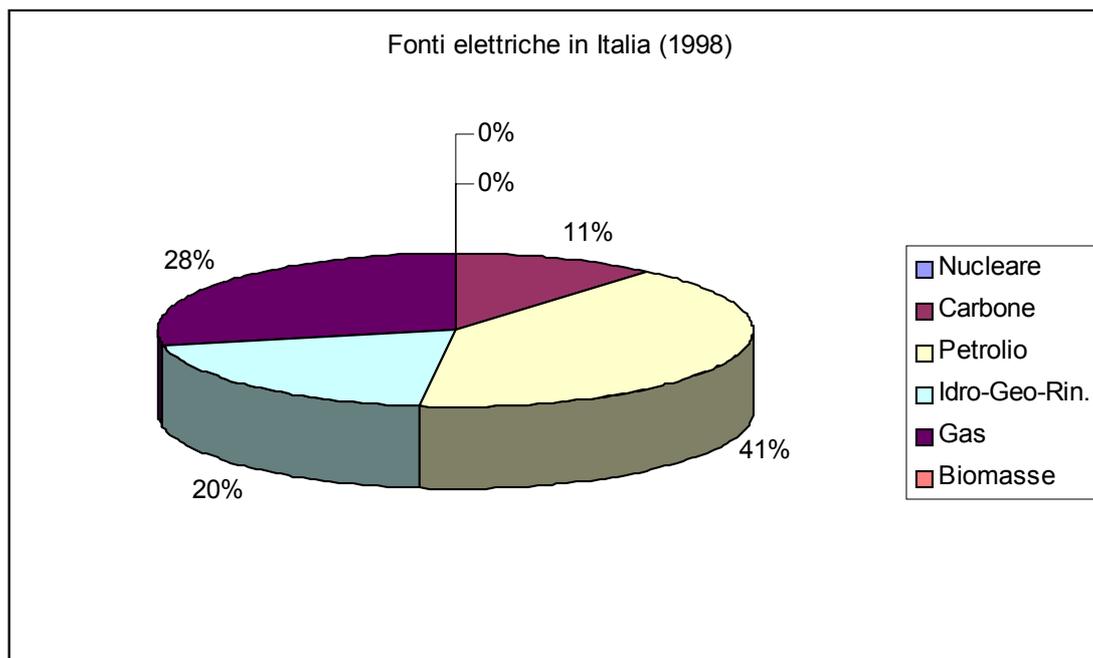


Figura 2.8 – Fonti elettriche in Italia nel 1998 [2.23]

Perché una fonte di energia primaria sia sfruttabile deve essere:

- Concentrabile
- Indirizzabile
- Frazionabile
- Continua
- Regolabile

Una fonte di energia è tanto più pregiata quanto migliori sono le caratteristiche indicate: le fonti che attualmente soddisfano opportunamente tali requisiti sono quella fossile, quella idroelettrica, e quella nucleare. Evidenti sono le difficoltà in tal senso delle cosiddette fonti rinnovabili (biomasse, solare, eolico), anche se queste presentano dei vantaggi di diversa natura (rinnovabilità, ridotto impatto ambientale). Per il benessere di tutti è necessario poi che una fonte di energia sia anche abbondante, immune da monopoli, a basso prezzo e compatibile con l'ambiente. Tutto ciò è tanto più vero rispetto alle previsioni secondo cui la domanda di energia nel 2050 triplicherà rispetto ai valori attuali [2.3] a causa:

- del generale aumento della popolazione terrestre (specialmente nei paesi in via di sviluppo e maggiormente popolosi, fig. 2.9 e 2.10);
- dell'aumento della popolazione che vivrà nei centri urbani;
- dell'aumento generale del benessere (oggi circa 2 miliardi di persone non hanno accesso a rifornimenti commerciali di energia);

- dell'aumento "esplosivo" delle richieste di energia da parte dei paesi in via di sviluppo (oggi il consumo pro capite di paesi come Cina o India si aggira attorno ad 1/10 di quello degli USA [2.3]);
- del fatto che l'energia elettrica è comoda e versatile rispetto alle altre forme di energia.

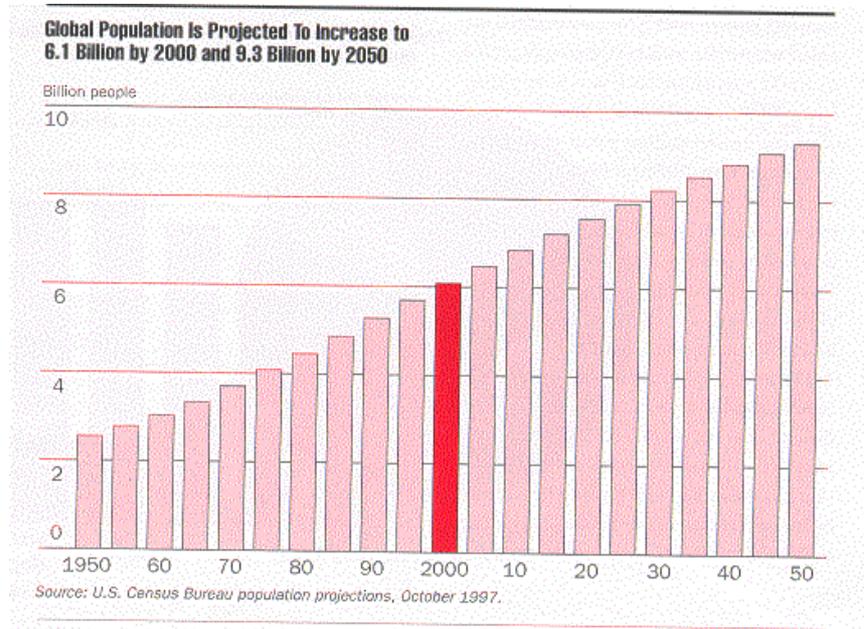


Figura 2.9 – Aumento della popolazione mondiale dal 1950 al 2050 [2.4]

Map 8 Population Growth Rates

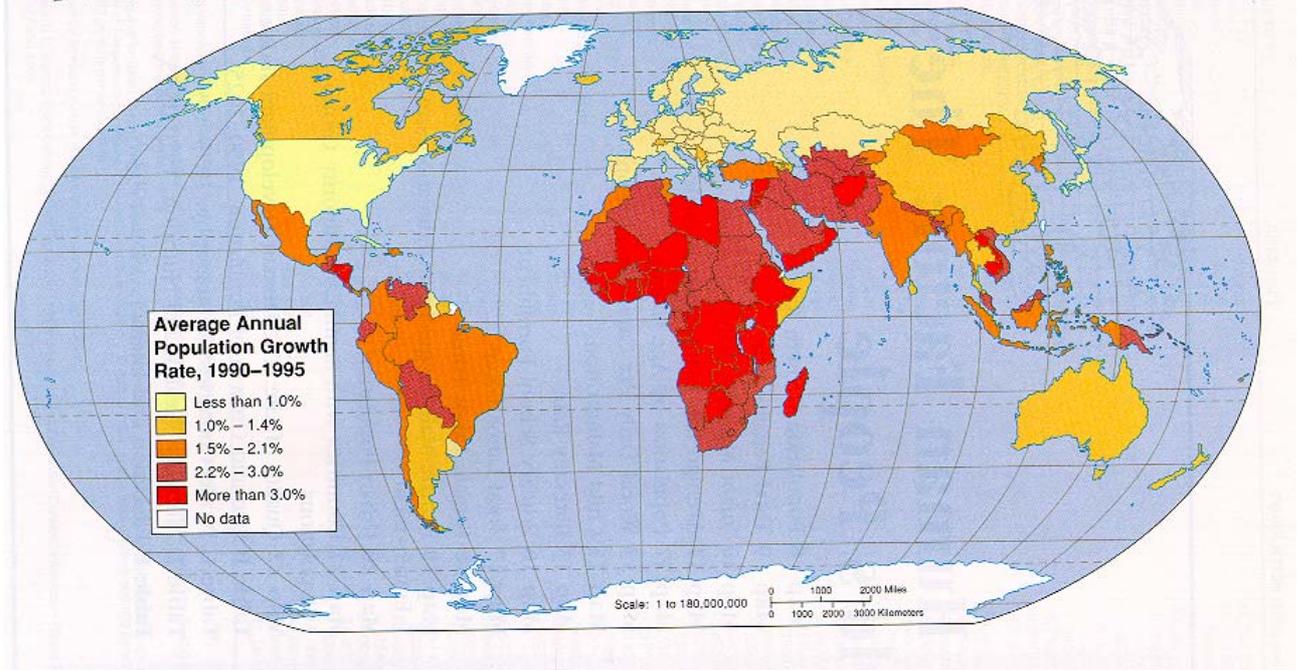


Figura 2.10 – Tassi di crescita nel periodo 1990-1995 nei vari paesi del mondo [2.6]

Nel vertice mondiale sullo sviluppo sostenibile di Johannesburg del 2002 [2.5] è emerso che l'energia rappresenta allo stesso tempo il problema e la soluzione: essa infatti rende possibile lo sviluppo ma è anche fonte di inquinamento. Attualmente circa 2 miliardi di persone non dispongono di accesso ai moderni servizi energetici, sono generalmente povere, vivono in aree rurali e fanno affidamento alla combustione della legna e delle biomasse per cucinare, scaldare, ed illuminare le proprie abitazioni. Questo porta a deforestazione e all'insorgenza di problemi respiratori a causa delle combustioni in aree chiuse. I punti fondamentali emersi nel suddetto vertice sono:

- aumento significativo del consumo energetico mondiale a partire dal 1992;
- aumento del consumo di legna da ardere;
- dal 1992 al 1999 aumento del consumo di combustibili fossili del 10%;
- l'80% della produzione energetica mondiale è affidata a combustibili fossili;
- il 95 % dell'energia utilizzata nei trasporti è di origine fossile;
- il 20% della domanda di petrolio e gas proviene dalla regione asiatica; il 50% della crescita della domanda proviene da questa regione;
- al tasso del 2% all'anno ci sarà un raddoppio della richiesta di energia entro il 2035, una triplicazione entro il 2050;
- l'energia nucleare copre il 17% del fabbisogno elettrico mondiale;
- le energie rinnovabili (idraulica, biomasse, geotermale, eolica e solare) coprono il 4% del fabbisogno mondiale.

La risoluzione dei problemi emersi ed in particolare il soddisfacimento delle richieste di energia da parte dei paesi in via di sviluppo assieme ad uno sviluppo rispettoso e compatibile con l'ambiente rappresentano uno dei problemi più importanti, delicati ed urgenti che le generazioni attuali e future sono chiamate a risolvere.

2.2 - L'inquinamento dalle fonti fossili

Data l'importanza delle fonti fossili nella produzione energetica mondiale si riportano di seguito dei grafici che illustrano il loro impatto ambientale (fig. 2.11, 2.12, 2.16) [2.7].

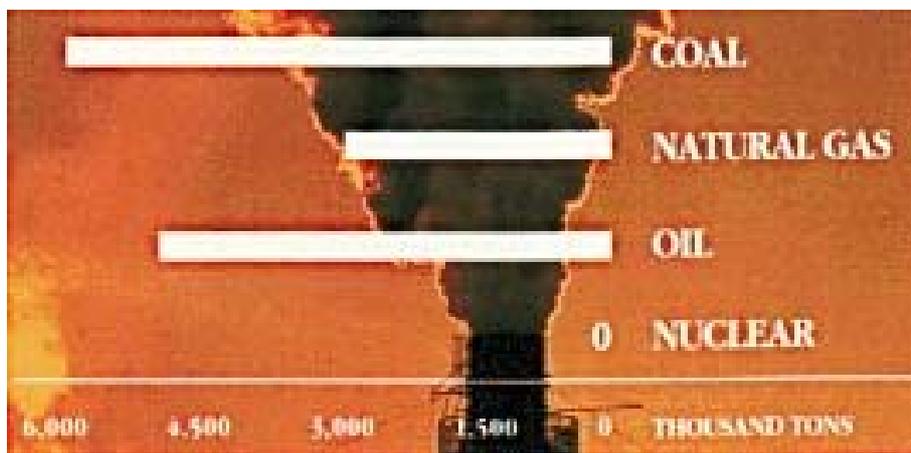


Figura 2.11 – Emissioni di biossido di carbonio da impianti di 1000 MW_e (in migliaia di tonnellate/anno) [2.7]

Si rileva che un impianto a carbone emette circa 6000 tonnellate all'anno di CO₂, uno a gas 3000 ed uno ad olio combustibile 5000. Nessuna emissione di questo tipo proviene da un impianto nucleare.

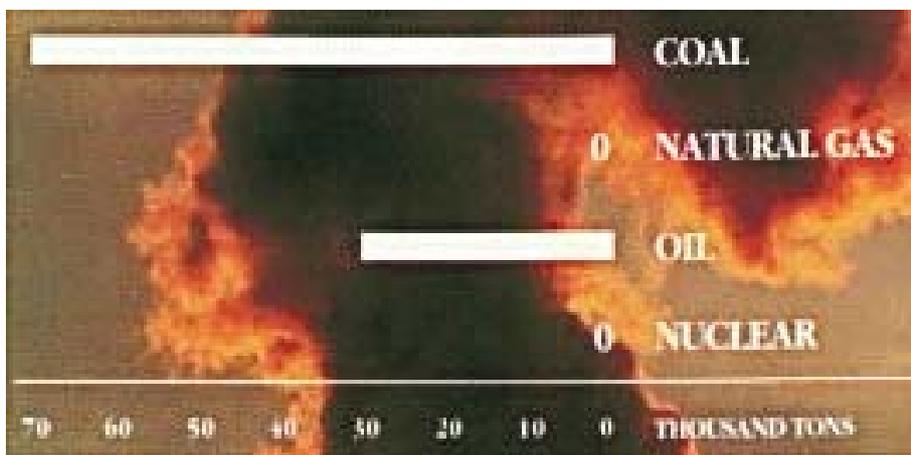


Figura 2.12 – Emissioni di biossido di zolfo da impianti di 1000 MW_e (in migliaia di tonnellate/anno) [2.7]

Si rileva che un impianto a carbone emette circa 70 tonnellate all'anno di SO₂, uno ad olio combustibile 30. Nessuna emissione di questo tipo ha origine da un impianto nucleare o a gas.

L'anidride solforosa è un gas incolore, irritante, non infiammabile, e tossico. In condizioni normali ha densità pari a 2.928 Kg/m³; è estremamente tossica per le vie respiratorie. Basta una concentrazione di 20 ppm in volume per provocare tosse ed irritazione degli occhi, mentre 1000

ppm_{vol} in dieci minuti sono letali per l'uomo [2.9]; allo stato anidro non intacca i metalli (ad eccezione dello zinco e dei metalli alcalini), ma allo stato umido diviene assai aggressiva tanto da dover impiegare per il suo maneggio e trasporto acciaio inox, hastelloy o monel [2.10]. L'anidride solforosa è la principale responsabile delle piogge acide; l'azione dell'acido solforico da essa generato per reazione con l'umidità dell'aria trasforma i carbonati insolubili dei monumenti in solfati (gesso) facilmente dilavati dalla pioggia, con notevoli danni monumentali (fig. 2.13). La reazione chimica è la seguente: $H_2SO_4 + CaCO_3 \rightarrow CaSO_4 + H_2O + CO_2$ (potenzialmente 1 Kg di SO_2 produce 1.53 Kg di H_2SO_4 , che a loro volta possono "sgretolare" 1.56 Kg di $CaCO_3$). L'acido solforico è in grado di attaccare anche il cemento armato (parte basica), i mattoni e le malte (reagendo con l'alluminato tricalcico e formando solfoalluminato di calcio, processo che porta ad aumento di volume e sgretolazione); anche i metalli quali il bronzo vengono intaccati (patine verdastre di carbonati e solfati basici di rame) [2.11].



Figura 2.13 – Effetti delle piogge acide su una statua in Westphalia (Germania);
la foto a sinistra è stata scattata nel 1908, quella a destra nel 1968 [2.11]

A basse concentrazioni rallenta la crescita delle piante, ad alte concentrazioni ne provoca la morte; gli effetti sono amplificati dalla presenza di ozono (sinergismo) [2.11]. L'aggressione chimica nei confronti delle piante può avvenire o a livello fogliare (fig.2.14) o attraverso l'alterazione della composizione chimica del terreno. Quando l'acido solforico originato dall'ossidazione della SO_2 giunge al terreno sotto forma di precipitazioni (le cosiddette piogge acide) ne attua l'acidificazione. Questo fenomeno porta ad una diminuzione di apporto di nutrienti alla pianta, che si indebolisce e risulta più esposta all'attacco di insetti, malattie e variazioni climatiche eccessive.

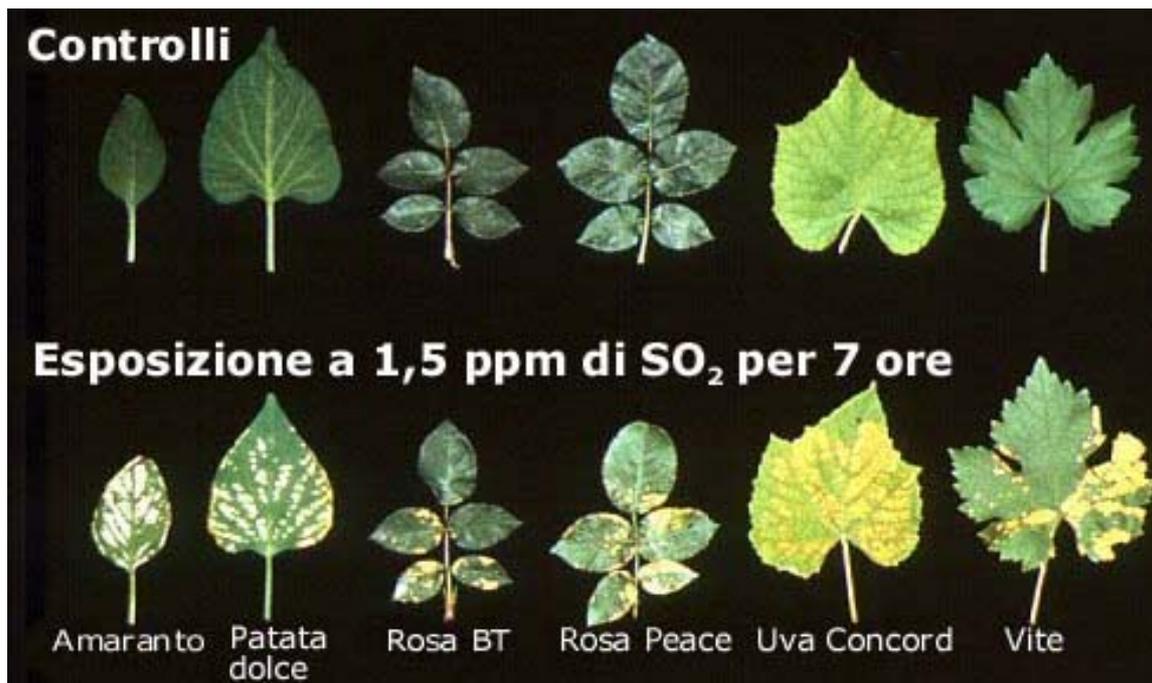


Figura 2.14 – Effetti a livello di danno fogliare per breve esposizione ad anidride solforosa [2.11]

Si noti che in Italia il 50% delle emissioni di SO_2 deriva dalla produzione di energia elettrica, il 40% da processi industriali, il 5% da riscaldamento domestico, il restante 5% da altre fonti [2.11]. Negli ultimi anni la sensibilizzazione dell'opinione pubblica italiana ha portato a notevoli riduzioni nelle emissioni rispetto agli anni '80; tuttavia queste si attestano a valori assai elevati, dell'ordine di 1 milione di tonnellate di SO_2 all'anno (fig. 2.15). La concentrazione di fondo di questo gas è stata valutata intorno a $0.2 \div 0.5 \mu\text{g}/\text{mc}$, mentre nelle aree urbane si può arrivare a $50 \mu\text{g}/\text{mc}$; nelle grandi città dei paesi in via di sviluppo si arriva a $300 \mu\text{g}/\text{mc}$ (dati dell'Organizzazione Mondiale della Sanità, 1998). L'anidride solforosa permane in atmosfera per $1 \div 4$ giorni, periodo in cui subisce reazioni di ossidazione e quindi precipita sotto forma di acido solforico. Il DPR n. 203 del 24 maggio 1988 fissa la mediana delle concentrazioni medie nelle 24 ore rilevate nell'arco di un anno al valore limite di $80 \mu\text{g}/\text{mc}$.

Emissioni di biossido di zolfo (SO_2) in Italia per macrosettore (tonnellate), 1980-1997

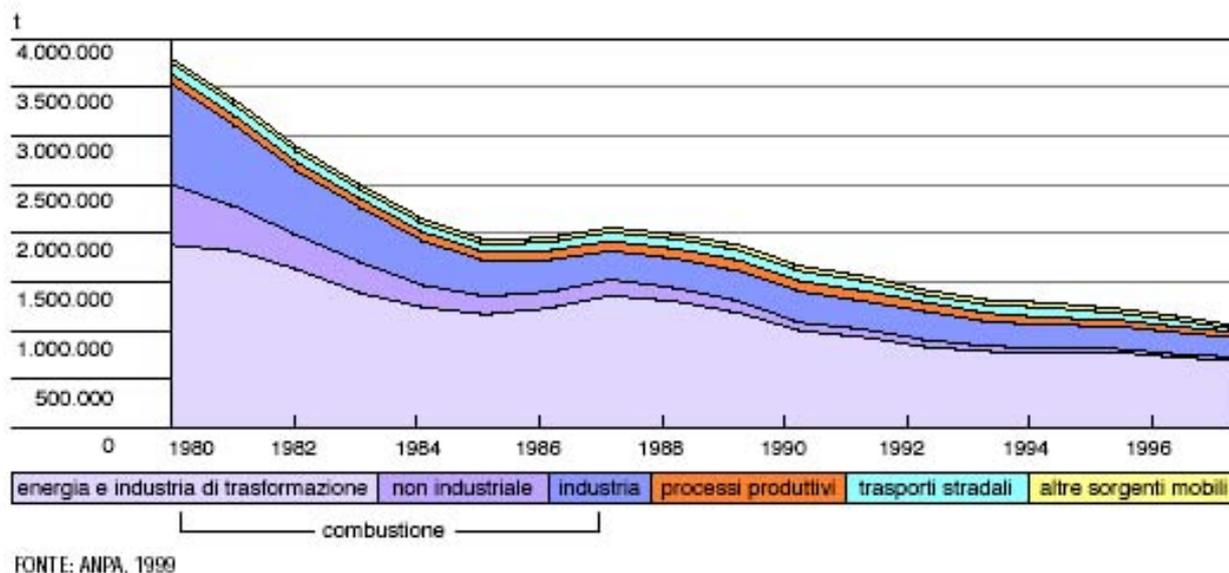


Figura 2.15 – Emissioni di anidride solforosa in Italia dal 1980 al 1997 [2.11]

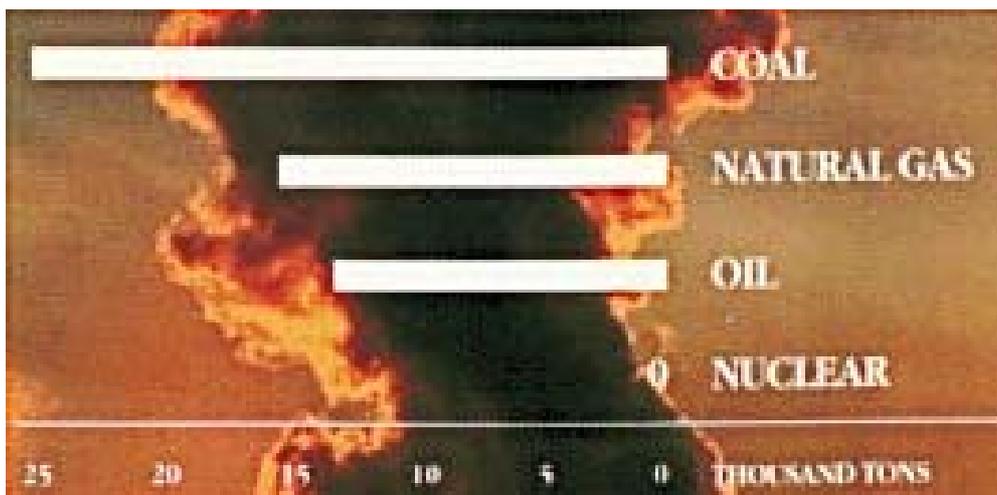


Figura 2.16 – Emissioni di ossidi di azoto da impianti di 1000 MW_c (in migliaia di tonnellate/anno) [2.7]

Si rileva che un impianto a carbone emette circa 25 tonnellate all'anno di NO_x , uno a gas 16 ed uno ad olio combustibile 14. Anche in questo caso non si ha nessuna emissione di questo tipo da un impianto nucleare.

Pur essendo presenti in atmosfera diverse specie di ossidi di azoto col termine NO_x si usa indicare una somma pesata di ossido di azoto, NO e biossido di azoto, NO_2 . L'ossido di azoto è un gas incolore, insapore ed inodore ma molto reattivo, che pertanto si ossida agevolmente con l'ossigeno dell'aria a biossido, gas di colore rosso bruno, soffocante. L'ossido di azoto si forma nei processi di combustione ad alta temperatura (il biossido formato direttamente ammonta circa al 5%). Il biossido di azoto svolge un ruolo chiave nella formazione dello smog fotochimico (fig. 2.17) in quanto

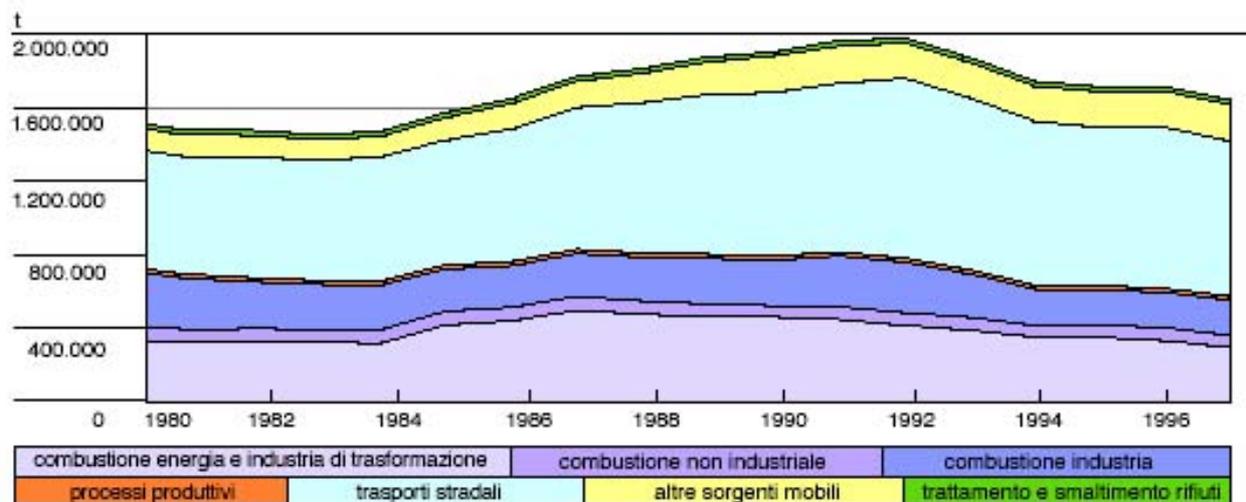
costituisce un composto intermedio per la produzione di un insieme di inquinanti molto pericolosi, quali l'ozono, l'acido nitrico, l'acido nitroso, gli alchilnitrati, ecc.



Figura 2.17 – Sullo sfondo: cappa ben visibile dovuta allo smog fotochimico nella città di Seattle (USA)

Si stima che gli ossidi di azoto contribuiscano circa al 30% alla formazione delle piogge acide. Su scala globale si ritiene che le emissioni di ossidi di azoto da fonti naturali ed antropogeniche siano dello stesso ordine di grandezza (circa 200 milioni di tonnellate). Le sorgenti naturali riguardano essenzialmente le decomposizioni anaerobiche dei nitrati e dei nitriti, i fulmini, gli incendi e le emissioni vulcaniche. La principale fonte antropogenica riguarda le combustioni ad alta temperatura dei motori degli autoveicoli (la quantità prodotta è tanto maggiore quanto più elevata è la temperatura di combustione e quanto più rapido è il raffreddamento successivo, che impedisce la decomposizione degli ossidi appena formati). Si stima che in Italia vengano immesse nell'atmosfera circa 2 milioni di tonnellate di ossidi di azoto all'anno (fig. 2.18); metà di queste deriva dai mezzi di trasporto, altre fonti minori sono costituite dagli impianti termici e le centrali termoelettriche (poiché la temperatura di combustione è più bassa).

Emissioni di ossidi di azoto (NO_x) in Italia per macrosettore (tonnellate), 1980-1997



FONTE: ANPA, 1999.

Figura 2.18 - Emissioni di ossidi di azoto in Italia dal 1980 al 1997 [2.11]

La concentrazione di ossidi di azoto in atmosfera varia da 0.2 a 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; la sua concentrazione cala nel giro di 2÷5 giorni in caso di emissione fortuita.

Gli ossidi di azoto, in particolare il biossido, è un gas irritante per le mucose e può contribuire all'insorgenza di varie alterazioni delle funzioni polmonari, quali bronchiti croniche, asma ed enfisema polmonare. L'Organizzazione Mondiale della Sanità raccomanda come limite guida per la media annuale un valore della concentrazione pari a 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

L'impatto sulla vegetazione è minore rispetto a quello del biossido di zolfo; anche in questo caso il meccanismo di aggressione delle piante riguarda l'acidificazione del terreno.

Un aspetto poco conosciuto riguardante la combustione del carbon fossile riguarda il rilascio di radioattività [2.8]: le popolazioni che vivono in prossimità degli impianti alimentati a carbon fossile ricevono equivalenti di dose superiori a quelle che vivono in prossimità degli impianti nucleari che rispettano i limiti governativi secondo standard occidentali. Difatti i rilasci degli impianti a carbone contengono elementi radioattivi naturalmente presenti, quali uranio e torio. Questo fatto è noto dal 1978, e rimane vero anche ai giorni nostri. Se tali emissioni venissero regolamentate questo si tradurrebbe in maggiori costi di impianto ed operativi, diminuendo la convenienza economica di questo tipo di impianti. Il carbone è uno dei combustibili più impuri: la sua cenere è costituita da ossidi di silicio, alluminio, ferro, calcio, magnesio, titanio, sodio, potassio, arsenico, mercurio e tracce di uranio e torio (2.5 volte più abbondante dell'uranio). Il quantitativo di uranio presente nei carboni fossili spazia in un intervallo compreso fra 1 e 10 ppm; un valore medio riconosciuto dall'EPA nel 1984 dopo l'analisi di diversi campioni è di 1.3 e 3.2 ppm rispettivamente per l'uranio

ed il torio. E' stato calcolato che nel 1982 ogni impianto a carbone negli Usa, in media, ha rilasciato nell'atmosfera 5.2 tonnellate di uranio e 12.8 di torio, che moltiplicate per i 154 impianti presenti porta a 801 tonnellate di uranio e 1971 di torio in totale. Nel mondo sono state emesse, in media, 3640 tonnellate di uranio ed 8960 tonnellate di torio (fig. 2.19). Secondo l'NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurement) un impianto a carbone rilascia 0.00427 mCi/t; secondo i report n. 92 e 95 l'esposizione della popolazione ad un impianto a carbone ed uno nucleare, rispettivamente, ammonta a 490 rem-persona/anno e 4.9 rem-persona/anno (quindi un impianto a carbone da equivalenti di dose 100 volte superiori a quelli di un impianto nucleare). E' stato addirittura calcolato che il contenuto energetico del combustibile nucleare rilasciato nelle emissioni è superiore a quello del carbone bruciato.

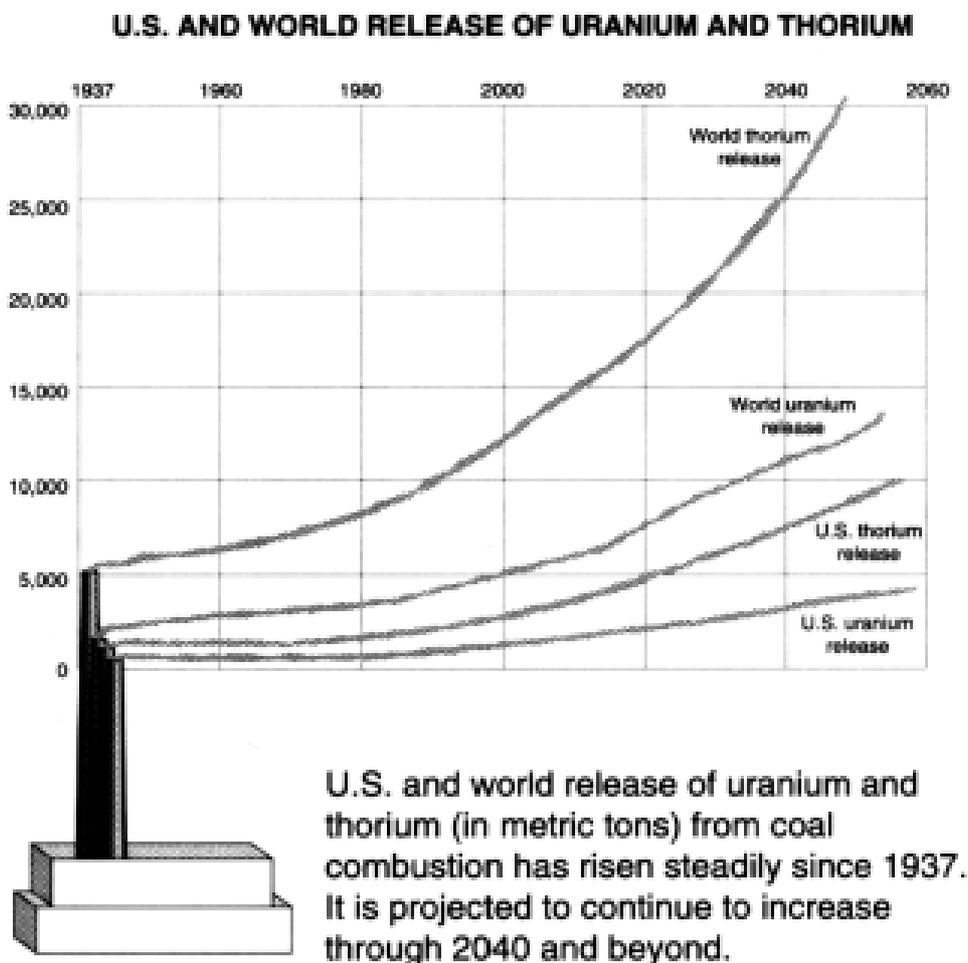


Figura 2.19 – Rilasci di uranio e torio dagli impianti a carbon fossile [2.8]

Tutti gli studi riguardanti i pericoli potenziali per la salute hanno evidenziato che la perturbazione dei livelli di dose naturale è quasi trascurabile. Tuttavia poiché i periodi di dimezzamento del

potassio 40, dell' uranio e del torio sono praticamente infiniti rispetto alla durata della vita umana l'accumulo di questi nuclidi nella biosfera è proporzionale al lasso di tempo in cui viene bruciato il carbone.

Altro problema poco conosciuto concerne la graduale produzione di plutonio attraverso il bombardamento neutronico dell'uranio 238 con i neutroni prodotti dall'interazione dei raggi cosmici con l'aria e dalle fissioni spontanee dei prodotti radioattivi del suolo. Il quantitativo di plutonio formato è ridotto, ma, essendo la sua radiotossicità molto superiore a quella dell'uranio (3.4×10^{11}), alla lunga il processo può divenire preoccupante. Infatti, basterebbero soli 2.2 mg di Pu^{239} per raddoppiare la radiotossicità delle 801 tonnellate di uranio liberate nel 1982 nella biosfera (cioè 0.27 ppb, parti per miliardo) [2.8].

Poiché nei venti anni seguenti è stata liberata una quantità annua certamente superiore ai livelli dell'82, si può supporre che si siano accumulate più di 16000 tonnellate di uranio naturale: anche senza considerare il contributo comunque presente del plutonio formatosi, la radiotossicità diffusa nell'atmosfera è dell'ordine di **dieci milioni di Sv**. Si noti che la dose letale certa ammonta a circa 50 Sv.

Le carenze in campo legislativo in merito, agli impianti a carbone consentono di rilasciare quantità di isotopi radioattivi, che, nel caso degli impianti nucleari riporrebbero fuori legge e susciterebbero un enorme impatto sull'opinione pubblica (ad esempio [2.18], l'equivalente di dose che un cittadino statunitense riceve vivendo un anno entro 50 miglia da un impianto alimentato a carbone ammonta a 0.03 mrem, mentre quello ricevuto vivendo un anno entro 50 miglia da un impianto nucleare è pari a soli 0.009 mrem!).

Sarebbe necessario quindi migliorare l'efficienza dei sistemi di ritenzione delle ceneri negli impianti fossili a carbone sia per ridurre l'impatto ambientale radiologico, sia per recuperare quantitativi importanti di materiali pregiati, opzioni queste che un giorno non potranno essere più ignorate.

2.3 – Il protocollo di Kyoto

Se nella nostra atmosfera non fossero presenti alcuni gas “serra” quali il vapore acqueo (l’acqua è presente in misura inferiore all’1% in volume, ma ha effetti enormi), l’anidride carbonica (presente mediamente in misura pari allo 0.035% in volume), ed il metano (presente in concentrazioni pari a 2 ppm, prodotto tra l’altro dai normali processi biologici degli esseri superiori, in particolare ad opera dei quasi 2 miliardi di bovini) la temperatura sulla superficie della terra non risentirebbe dell’effetto serra naturale, e si aggirerebbe intorno ai $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, rendendo impossibile la vita a noi oggi conosciuta (nonostante riceva dal sole una potenza pari a $1367^{\pm 0.5}\text{ W/m}^2$). Grazie a questo effetto infatti la temperatura media della Terra è superiore di circa $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ a quello che i calcoli indicherebbero (lo spazio cosmico si trova alla temperatura di 3 K). I gas serra infatti consentono ai raggi solari di raggiungere il suolo ma ne ostacolano, parzialmente, la riflessione (fig. 2.20).

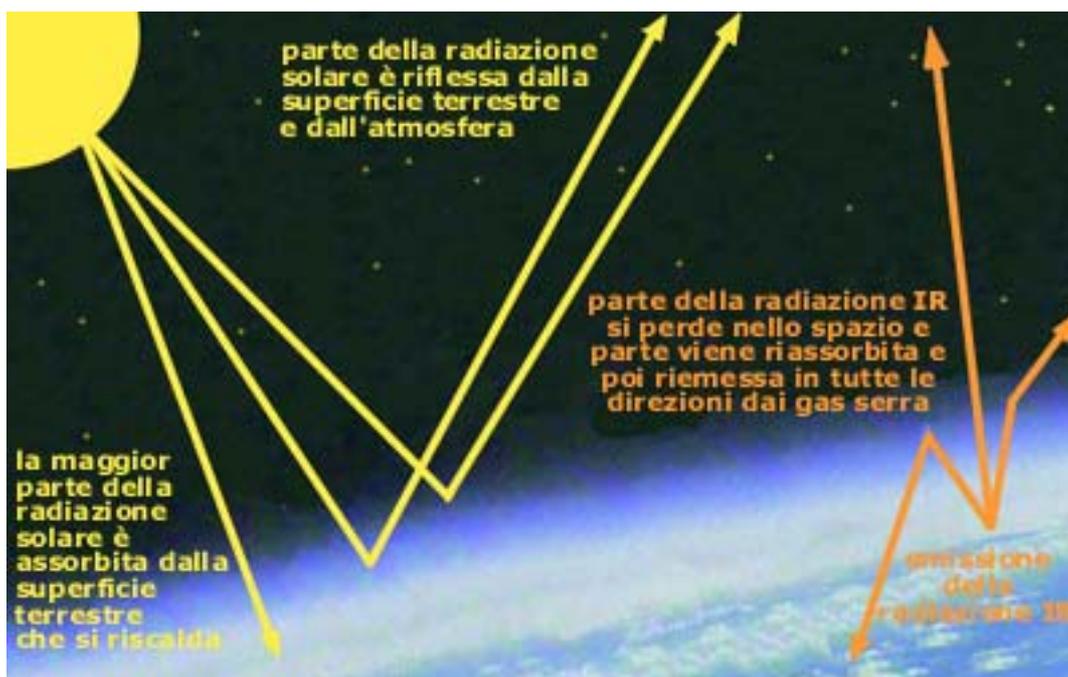


Figura 2.20 – Fenomeni legati all’effetto serra [2.11]

Il 25% della radiazione solare viene assorbita dall’atmosfera (pulviscolo, vapore acqueo, ozono), il 30% viene riflesso nello spazio cosmico. La frazione di radiazione riflessa prende il nome di *albedo* e nel caso della Terra è pari a 0.3 (i ghiacciai hanno valori dell’albedo pari a 0.9, la vegetazione a 0.1) [2.12].

Bisogna ricordare che la temperatura del nostro pianeta è una grandezza dinamica e pertanto si modifica periodicamente per cause del tutto naturali (attività solare, inclinazione dell’asse terrestre, ecc.). Gli studi attuali evidenziano una ciclicità di periodo pari a 1000 anni, persistita almeno negli

ultimi 8000-9000 anni, con cui si sono alternate diverse condizioni climatico ambientali. I dati hanno evidenziato ad esempio che nel periodo tra il 1000 ed il 1300 d.c. si è verificata una modificazione climatico-ambientale di notevole importanza definita “Effetto Serra Medievale” [2.13]. Secondo gli stessi studi in circa 40 anni, dal 1050 al 1090, si è registrata una variazione della temperatura media al suolo pari ad 1 °C. Dal momento che le modificazioni climatico-ambientali si stanno instaurando in perfetto accordo con la ciclicità millenaria sarebbe utile indagare se l’immisione antropogenica di gas serra stia effettivamente alterando o meno il fenomeno. Secondo alcuni studiosi infatti la limitazione del dibattito internazionale alla sola limitazione delle emissioni antropogeniche di gas serra per limitare gli effetti nocivi delle modificazioni climatiche appare scarsamente sostenuta scientificamente [2.13].

Tuttavia l’emissione antropogenica annuale della sola anidride carbonica ammonta a circa 30 miliardi di tonnellate, in buona parte dovute a consumi energetici fossili (autotrazione, riscaldamento, centrali energetiche). Secondo alcuni calcoli le fonti antropogeniche hanno modificato l’equilibrio energetico dell’atmosfera di 2.35 W/m². Si può notare che il principale responsabile dell’effetto serra naturale è il vapore acqueo, mentre l’anidride carbonica è la maggiore contributrice all’effetto serra antropogenico (fig. 2.21).

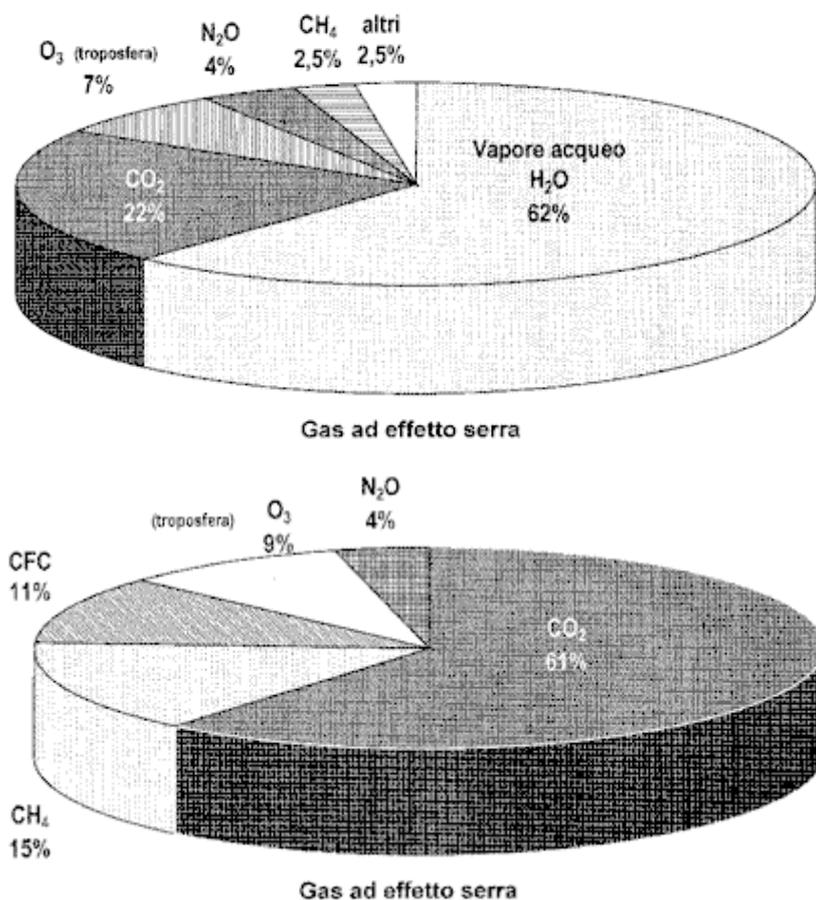


Figura 2.21 – Principali gas responsabili dell’effetto serra naturale (in alto) ed antropogenico (in basso) [2.12]

Si noti che la respirazione dei vegetali e la decomposizione delle sostanze organiche rilasciano quantitativi di anidride carbonica 10 volte superiori a quelli derivanti dalle attività umane. Non tutte le emissioni hanno effetti equiversi nella direzione del riscaldamento globale (fig. 2.22).

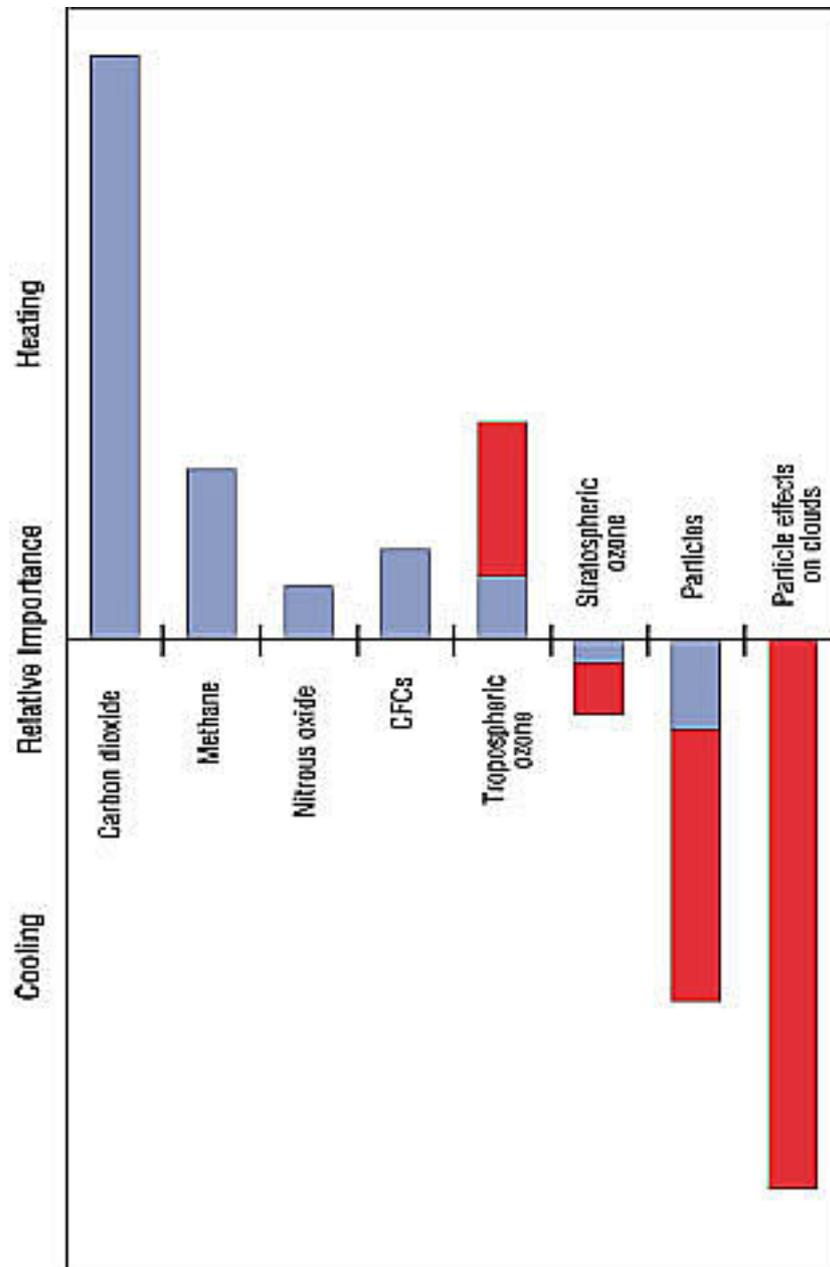


Figura 2.22 – Effetti contrastanti di diversi agenti atmosferici di provenienza antropica [2.14]

Appare evidente comunque un aumento della concentrazione di gas serra nell'atmosfera negli ultimi decenni (fig. 2.23).

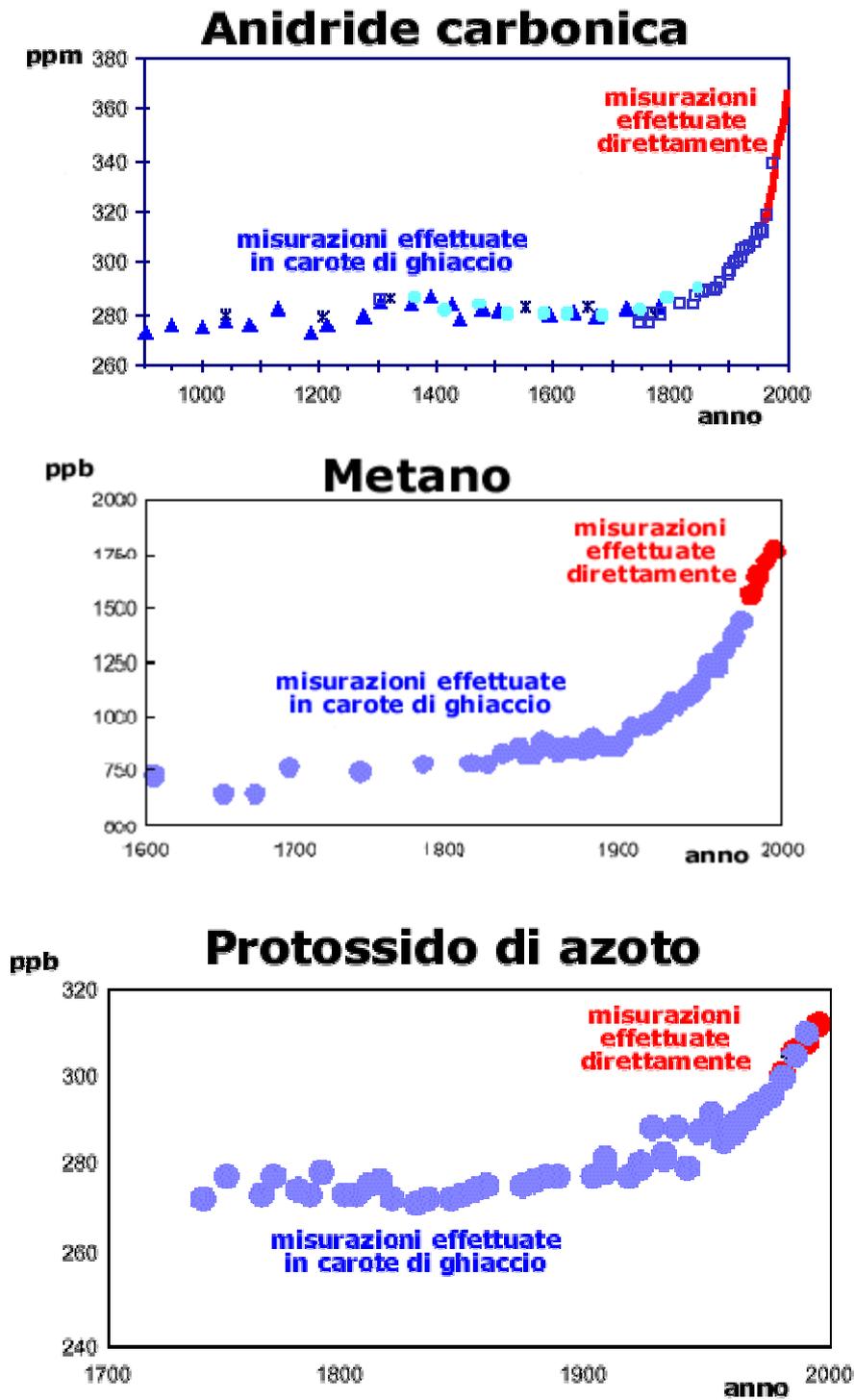


Figura 2.23 – Andamenti delle concentrazioni dei gas serra [2.11]

Appare inoltre evidente un generale aumento delle temperature medie mondiali (fig. 2.24).

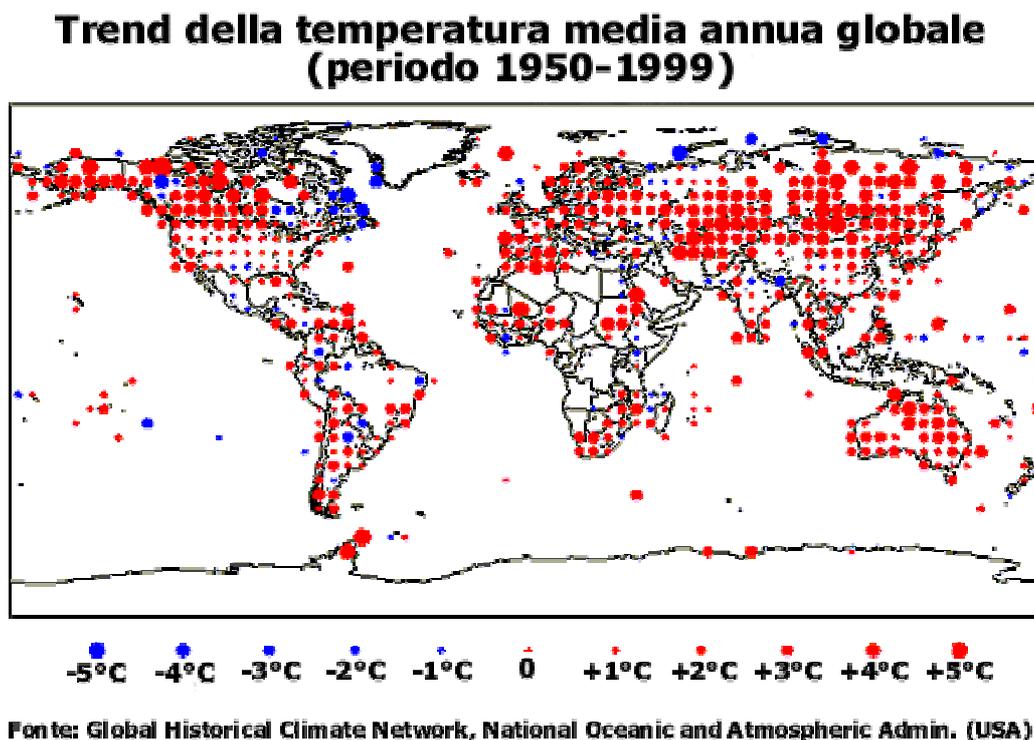


Figura 2.24 – Temperature medie globali nel periodo 1950-1999 [2.11]

Dal momento quindi che non si conosce esattamente l'effetto delle emissioni antropiche sulle modificazioni climatiche mondiali, ma evidenze incontrovertibili hanno dimostrato una modificazione della composizione chimica dell'atmosfera, è sorta la preoccupazione, a livello mondiale, di quali possano esserne le conseguenze. Con questo spirito nel dicembre del 1997 si è svolta per 11 giornate a Kyoto, in Giappone, la Convenzione Quadro sui cambiamenti climatici. L'idea di fondo è stata quella di *“impedire interferenze antropiche pericolose per il sistema climatico”*. Si approvò, per consenso, un protocollo secondo il quale i paesi industrializzati si impegnano a ridurre, per il periodo 2008-2012, il totale delle emissioni dei gas serra almeno del 5% rispetto ai livelli degli anni '90. Tale protocollo fu aperto alla firma il 16 marzo 1998, e sarebbe entrato in vigore dal novantesimo giorno successivo alla data in cui almeno il 55% dei paesi aderenti alla Convenzione (e per un totale almeno del 55% delle emissioni globali) lo avessero ratificato. Paesi in via di sviluppo come Cina ed India (i più popolosi) non sono sottoposti a nessun tipo di vincolo, e dato che la crescita delle emissioni di questi ultimi è stata negli ultimi anni tripla rispetto a quella dei paesi avanzati (circa il 25% contro l'8%) c'è il rischio che gli tutti gli sforzi di quest'ultimi siano vanificati. L'Italia ha ratificato il protocollo di Kyoto l'1 giugno 2002 con la legge n. 120. I gas presi in esame sono:

- anidride carbonica
- gas metano
- protossido di azoto

- esafluoruro di zolfo
- idrofluorocarburi
- perfluorocarburi

Le grandezze considerate sono: la *vita media atmosferica*, che rappresenta l'ammontare del tempo che ci vorrebbe perché la concentrazione di un dato inquinante ritorni al livello naturale: varia notevolmente da sostanza a sostanza, da 12 anni per il metano a 100 per l'anidride carbonica, da 120 per il protossido di azoto a 50000 per il tetrafluoruro di carbonio; è stato poi definito il **GWP** (*Global Warming Potential*) rappresentato dal rapporto fra il riscaldamento globale causato da un dato inquinante per un dato periodo (solitamente 100 anni) e l'anidride carbonica (il GWP di quest'ultima è quindi uguale ad 1, mentre quello del metano è pari a 21 - quindi assai più efficace della CO₂ -, e quello di sostanze come l'esafluoruro di zolfo è pari a 23900) [2.11].

Il protocollo di Kyoto prevede, fra le altre cose:

- il miglioramento dell'efficienza energetica;
- la protezione ed il miglioramento dei meccanismi di rimozione e di raccolta dei gas ad effetto serra;
- la ricerca, la promozione e lo sviluppo di forme energetiche rinnovabili;
- la limitazione delle emissioni di gas metano.

All'inizio dell'aprile 2001 il protocollo di Kyoto era stato firmato solo da 33 paesi su 84, tutti in via di sviluppo. La situazione attuale è riportata in figura 2.25.

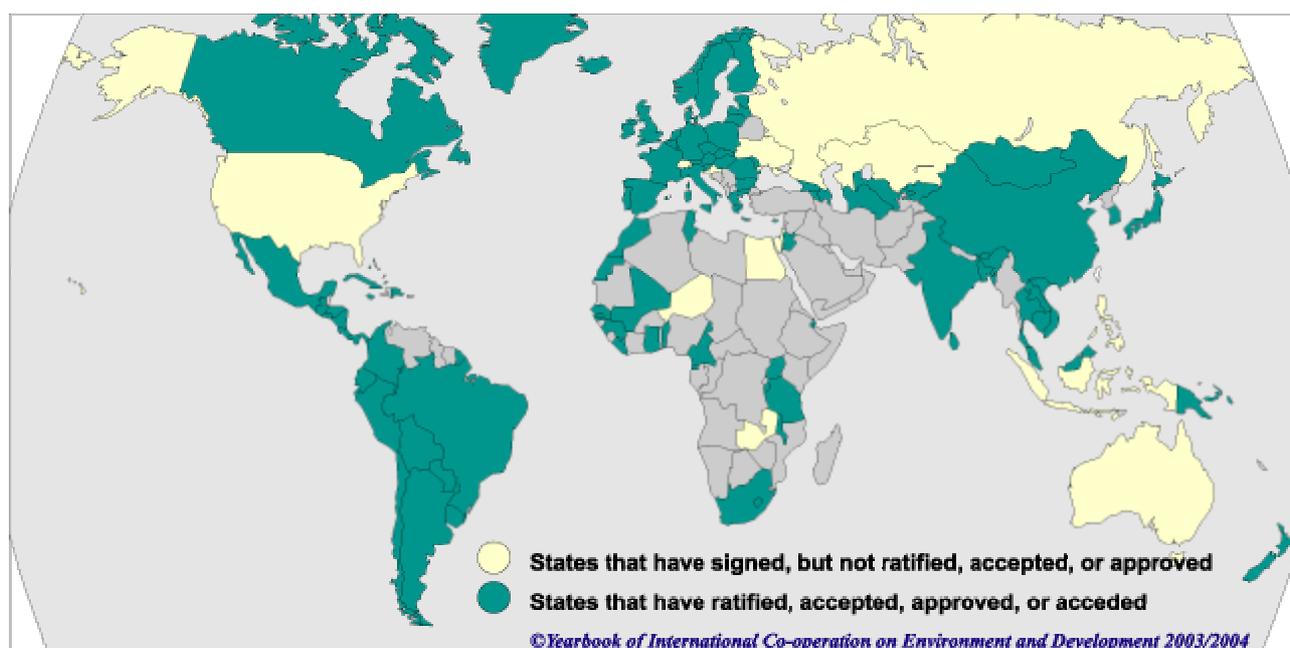


Figura 2.25 – Paesi che hanno ratificato il protocollo di Kyoto (in verde)

Molte sono state le divergenze, in particolare fra l'Unione Europea che ha inteso la riduzione come "riconversione" degli impianti inquinanti, e un gruppo di paesi detto *Umbrella Group* (Stati Uniti, Canada, Giappone, Australia e Nuova Zelanda) che al fine di ridurre l'impatto del protocollo di Kyoto sulle proprie economie ha cercato di far passare l'idea dei cosiddetti "meccanismi di flessibilità". Il principale di questi riguarda il commercio delle quote di emissione, contro le quali l'Unione Europea non si è opposta, ma ha sostenuto che tale commercio deve essere complementare e non sostitutivo degli sforzi fatti, fissando un tetto per le emissioni commerciabili. Gli USA hanno obiettato che con la chiusura degli impianti altamente inquinanti dell'ex Germania dell'Est l'Europa ha ottenuto "senza sforzi" la propria quota di emissioni.

Altra questione riguarda i "sink", ossia i pozzi in grado di assorbire l'anidride carbonica: il protocollo di Kyoto prevede che attraverso forestazione, riforestazione, uso e cambi d'uso del suolo, i paesi possano ricevere dei "crediti" da aggiungere alle proprie quote di emissione. Per alcuni paesi può essere più semplice far crescere nuove foreste, ad esempio in nazioni in via di sviluppo, che non ridurre le proprie emissioni. Il punto è che non è di facile quantificazione il quantitativo di anidride carbonica effettivamente assorbito dall'atmosfera da un dato albero o foresta: i paesi dell'Umbrella Group si sono battuti perché fosse possibile controbilanciare le emissioni piantando nuovi boschi e gestendo meglio il territorio, i paesi dell'UE hanno avvertito tale ipotesi sostenendo che fosse solo un modo per sottrarsi dagli obblighi di riduzione. Gli Stati Uniti si sono sempre opposti all'ipotesi di prevedere multe o sanzioni legali, preferendo far passare la posizione di un "autocontrollo" [2.15]. Il perché di certe posizioni può forse risultare più chiaro dopo l'analisi della fig. 2.26 dove sono rappresentate le percentuali di emissione dei vari paesi.

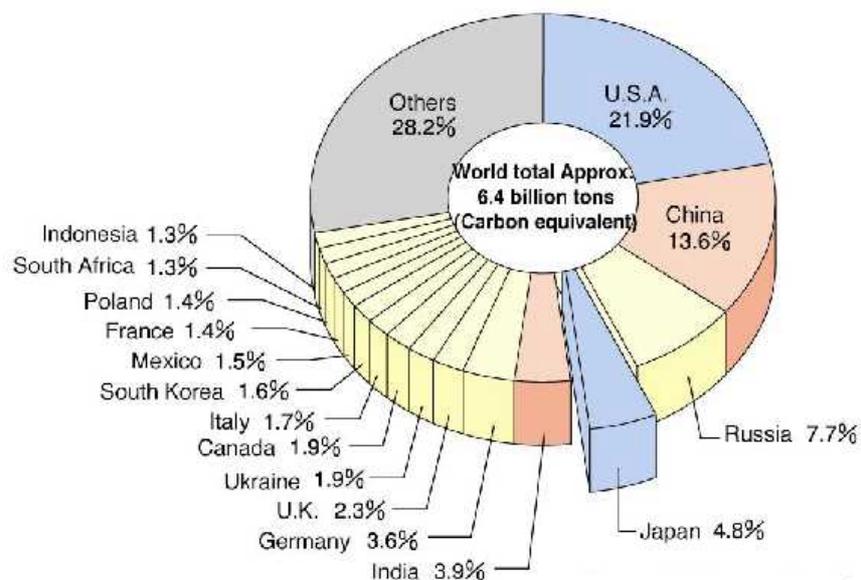


Figura 2.26 – Percentuali di emissione dei vari paesi

Per quanto riguarda le fonti energetiche che non presentano emissioni di gas serra vale la pena di osservare che:

- L'energia eolica è sicuramente una fonte rinnovabile priva di emissioni di gas serra. Il più grande impianto in Italia è quello di Casone Romano (FG) costituito da 10 generatori monopala da 350 KW (per una potenza totale di 3.5 MW, pari a circa 3000 utenze domestiche), costato 6.5 miliardi di lire (equivalenti a 3357000 euro). Fornirà energia al prezzo di 9 cent/KWh per i primi 8 anni, poi il prezzo scenderà a 4 cent/KWh. L'energia erogata in un anno è pari a 6.5 milioni di KWh, la vita utile a 20 anni. Nel 1995 la potenza eolica installata in Italia era pari a 22 MW. L'occupazione del territorio di questo tipo di impianti è di 1 Km² per 7÷10 MW. L'utilizzo di questo tipo di impianto comporta però una serie di svantaggi:
 - o l'impatto visivo;
 - o l'utilizzo esteso del territorio a parità di potenza installata;
 - o le emissioni acustiche (livelli accettabili solo a partire da distanze di 300÷400 metri dalle abitazioni);
 - o le interferenze elettromagnetiche (quest'ultimo comunque via via meno sentito con l'utilizzo di materiali non metallici per le parti rotanti).
- L'energia solare che colpisce il suolo terrestre è superiore di 2000 volte ai consumi umani. Tuttavia nel 1994 gli impianti solari nel mondo avevano una potenza totale di 61 MW_e. Questo è dovuto principalmente ad un problema di costi: una centrale di grande taglia occupa 10 m²/KW, ha un costo di impianto di 6000÷7000 euro per KW installato, e un costo dell'energia di 0.020÷0.022 cent/KWh! Con le tecnologie attuali non si prevede il costo possa scendere al di sotto dei 2÷3 \$/W_e [2.16].
- Una centrale nucleare di 1000 MW_e occupa una superficie di 1.5 Km², e fornisce energia elettrica al prezzo di 4 cent/KWh. Produce annualmente 100 metri cubi di scorie, di cui solo 3 ad alta attività. Da un recente studio franco-statunitense è emerso il costo ambientale per KWh [2.17] da varie fonti (in cent. \$/KWh): 16.48 per il petrolio, 16.34 per il carbone, 3.02 per il gas naturale, 1.63 per il nucleare. Si vedano anche le fig. 2.27, 2.28 e 2.29.

Sources of Emission-Free Electricity

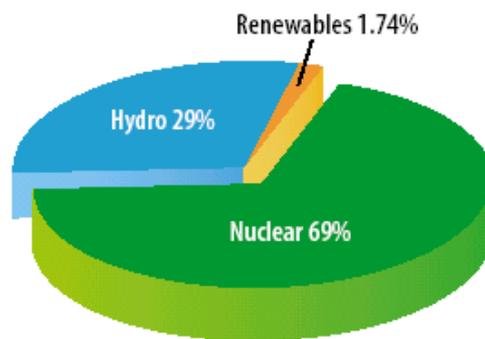


Figura 2.27 - Contributi relativi delle fonti prive di emissioni di gas serra alla produzione elettrica (USA) [2.18]

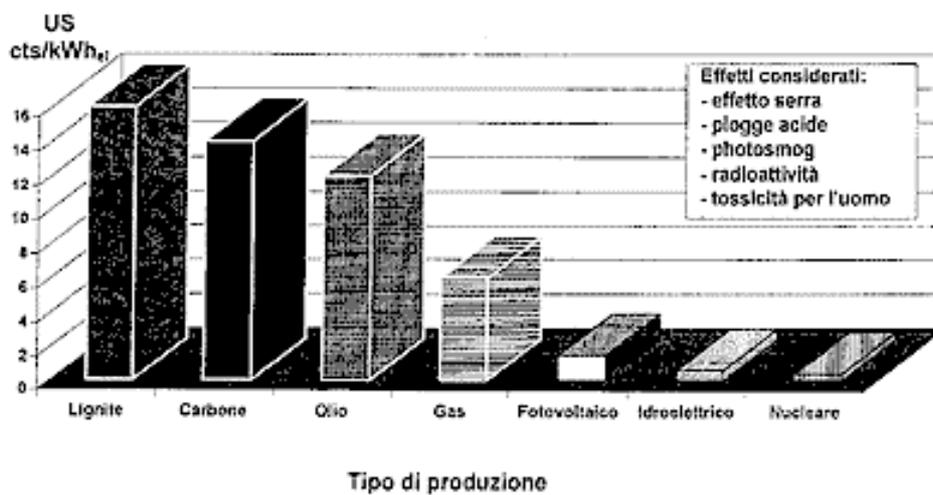


Figura 2.28 – Costi ambientali di diverse fonti energetiche [2.12]

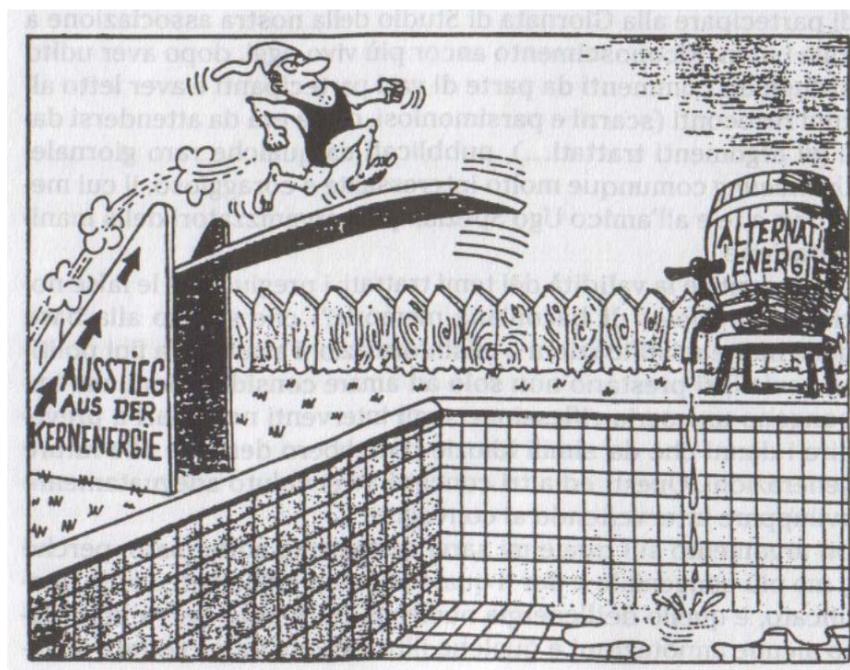


Figura 2.29 – Vignetta pubblicata dal Deutsches Atomforum E.V. La scritta sul trampolino indica: “Uscita dal nucleare”, quella sulla botte “Energie alternative” che sono limitate a una piccola quantità. In realtà la piscina è vuota.

Inoltre, *last but not least*, gli impianti nucleari occidentali attualmente in esercizio presentano caratteristiche di sicurezza assolutamente adeguate allo sfruttamento commerciale dell'energia nucleare (si veda ad esempio la fig. 2.30).

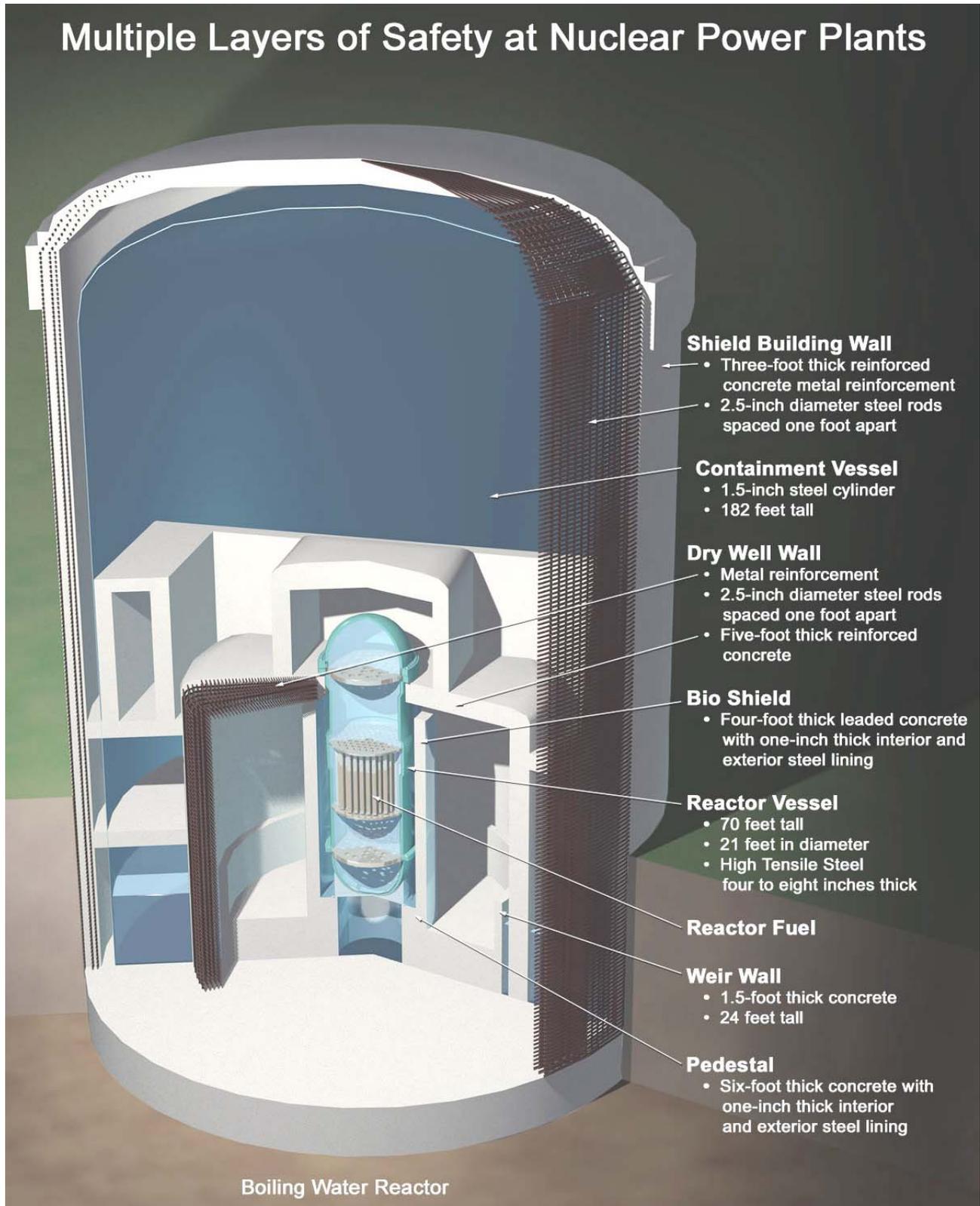


Figura 2.30 – Caratteristiche di sicurezza di un moderno impianto nucleare di tipo BWR [2.25]

2.4 – Il ruolo dell'idrogeno

2.4.1 – Caratteristiche generali

L'idrogeno (dal greco $\eta\psi\delta\omicron\rho$ e $\gamma\epsilon\nu\omicron$, “generatore di acqua”) è di gran lunga l'elemento più abbondante nell'universo, costituendo fino al 75% della massa di tutta la materia visibile che costituisce le stelle e le galassie. Appartiene al primo gruppo della tavola periodica, è un gas molto reattivo, insapore, inodore, incolore. In natura è presente quasi esclusivamente l'isotopo di numero di massa 1 mentre quello di massa 2, il *deuterio*, è presente in misura di circa 1 parte su 5900. Non si trova libero nell'atmosfera essendo 14.4 volte più leggero dell'aria (si disperde nello spazio siderale).

Fu scoperto nel 1766 dal chimico britannico Henry Cavendish; nominato inizialmente “aria infiammabile” da Joseph Priestley, fu in seguito chiamato “idrogeno” dal chimico francese Antoine-Laurent Lavoisier.

È il più semplice di tutti gli elementi. Si può visualizzare l'atomo di idrogeno come un denso nucleo centrale con un solo elettrone orbitante in una “nuvola di probabilità” (fig. 2.31).

Le molecole di idrogeno sono biatomiche; nel caso che entrambi i protoni abbiano spin dello stesso segno ci si riferisce a *ortoidrogeno*,

altrimenti, in caso di spin opposti, a *paraidrogeno*. Oltre il 75% dell'idrogeno a temperatura ambiente è costituito da ortoidrogeno. Questa particolarità acquista importanza alle basse temperature poiché l'ortoidrogeno diviene instabile e si trasforma in paraidrogeno liberando calore. Ciò può complicare alcuni processi, quali ad esempio la liquefazione (fu liquefatto per la prima volta da Dewar nel 1898).

L'idrogeno cambia stato a temperature criogeniche (cioè al di sotto di 73°C); in particolare liquefa a 20 K (-253°C) e solidifica a 14 K (-259°C). In generale il punto di ebollizione di una sostanza cresce con la pressione (ad esempio il propano che a pressione atmosferica liquefa a -42°C può essere reso liquido applicando una moderata pressione); sfortunatamente il punto di ebollizione dell'idrogeno può essere aumentato solo fino a -240°C con una pressione maggiore o uguale a 13 bar: può quindi essere conservato o come gas in pressione o come liquido criogenico.

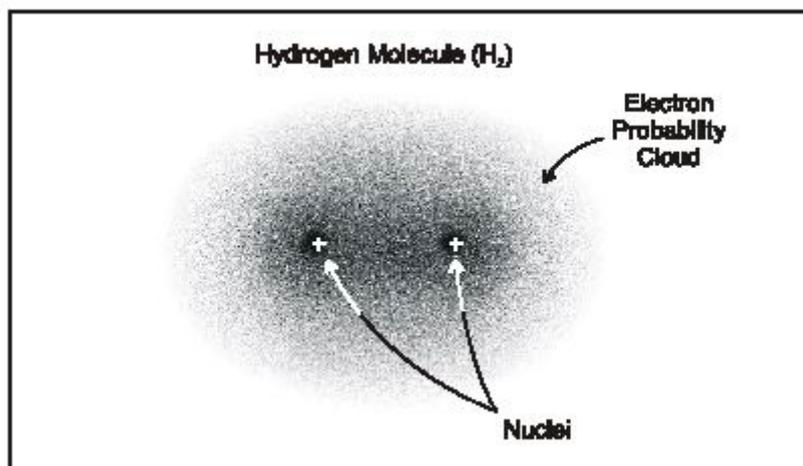


Figura 2.31 - Molecola di idrogeno

L'idrogeno non è di per se un gas nocivo ma può divenirlo per sottrazione dell'ossigeno.

L'idrogeno è un elemento poco denso sia come gas che come liquido (tab. 2.2).

Substance	Vapor Density (at 68 °F; 20 °C, 1 atm)	Liquid Density (at normal boiling point, 1 atm)
Hydrogen	0.005229 lb/ft ³ (0.08376 kg/m ³)	4.432 lb/ft ³ (70.8 kg/m ³)
Methane	0.0406 lb/ft ³ (0.65 kg/m ³)	26.4 lb/ft ³ (422.8 kg/m ³)
Gasoline	0.275 lb/ft ³ (4.4 kg/m ³)	43.7 lb/ft ³ (700 kg/m ³)

Tabella 2.2 – Densità dei combustibili liquidi e gassosi

La differenza di volume fra l'idrogeno gassoso e quello liquido può essere misurata con il *rapporto di espansione* fra il volume in cui viene conservato l'idrogeno e quello dello stesso a temperatura e pressione ambiente. Il rapporto di espansione per l'idrogeno liquido è pari a 1:848 (fig. 2.32).

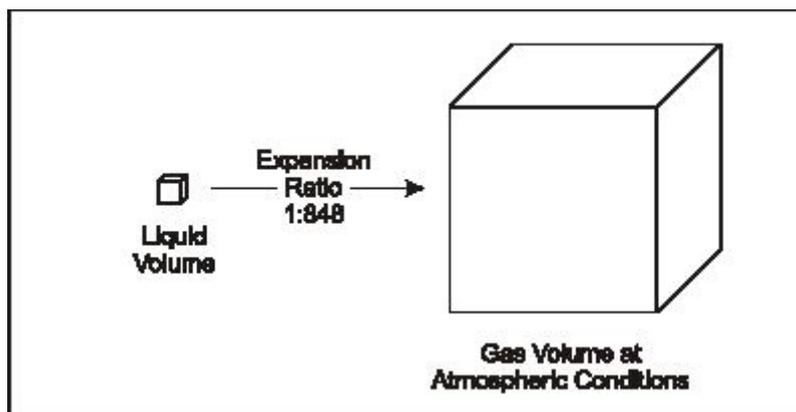


Figura 2.32 – Rapporto di espansione dell'idrogeno

Anche se liquido l'idrogeno non è molto denso: un metro cubo di acqua ne contiene 111 Kg, mentre un metro cubo di idrogeno liquido ne contiene solo 71 Kg. Perciò l'acqua ha un fattore di impaccettamento superiore, grazie alla sua particolare struttura molecolare. Questo è vero per molti dei liquidi che lo contengono: un metro cubo di metanolo ne contiene 100 Kg, un metro cubo di eptano 113 Kg.

L'idrogeno è un vettore energetico ideale in termini di riduzione dello smog. Non contiene carbonio, né zolfo, perciò non dà origine a CO, CO₂, SO₂. Consente una combustione più povera, riducendo quindi la temperatura e di conseguenza la produzione di NO_x. Inoltre, non essendo tossico, non crea problemi se scaricato incombusto.

Esistono storicamente diverse realizzazioni pratiche di mezzi alimentati ad idrogeno: nel 1957 negli USA fu costruito un bombardiere B-57, nel 1988 in URSS un Tupolev 154 entrambi utilizzando come combustibile idrogeno liquido. L'Ansaldo nel 1996 presentò per il progetto Euro Quebec un battello alimentato ad idrogeno (fuel cell) tuttora in servizio sul Lago Maggiore.

L'uso dell'idrogeno nel settore dei trasporti negli USA potrebbe ridurre le emissioni di CO del 70%, del 41% quelle di NO_x, del 38% quelle degli idrocarburi, e del 30% le emissioni antropiche di CO₂.

Comunque bisogna tener presente, come già detto, che l'idrogeno non è di per se un produttore di energia ma solo un vettore e che per essere prodotto ha bisogno a sua volta di energia. Pertanto, bisogna tener presente che la possibilità di produrlo con alto rendimento mediante un HTR, costituisce una possibile via alla soluzione del problema energetico, specialmente per i trasporti.

L'idrogeno ha il più alto rapporto energia immagazzinata/peso (tabella 2.3), e difatti è stato usato estensivamente nelle missioni spaziali, dove la problematica della minimizzazione del peso è cruciale. Per confronto l'energia immagazzinata da una batteria al piombo è pari a 0.108 KJ/g.

Fuel	Higher Heating Value (at 25 °C and 1 atm)	Lower Heating Value (at 25 °C and 1 atm)
Hydrogen	61,000 Btu/lb (141.86 kJ/g)	51,500 Btu/lb (119.93 kJ/g)
Methane	24,000 Btu/lb (55.53 kJ/g)	21,500 Btu/lb (50.02 kJ/g)
Propane	21,650 Btu/lb (50.36 kJ/g)	19,600 Btu/lb (45.6 kJ/g)
Gasoline	20,360 Btu/lb (47.5 kJ/g)	19,000 Btu/lb (44.5 kJ/g)
Diesel	19,240 Btu/lb (44.8 kJ/g)	18,250 Btu/lb (42.5 kJ/g)
Methanol	8,580 Btu/lb (19.96 kJ/g)	7,760 Btu/lb (18.05 kJ/g)

Tabella 2.3 - tabella comparativa dei calori di combustione dei vari combustibili

L'alto contenuto energetico dell'idrogeno fa sì che la sua potenza esplosiva sia pari a circa 2.5 volte



Figura 2.33 - Esplosione dell'idrogeno

quella di un generico idrocarburo: l'esplosione dell'idrogeno (fig. 2.33) è quindi assai più distruttiva, anche se la sua durata è inversamente proporzionale all'energia liberata [2.24]. In conseguenza di ciò le fiamme liberate si estinguono prima di quelle degli idrocarburi.

La densità di energia dell'idrogeno è scarsa (tab. 2.4). Ad esempio quella di una batteria al piombo è pari all'incirca a 324000 KJ/m³.

Fuel	Energy Density (LHV)
Hydrogen	270 Btu/ft ³ (10,050 kJ/m ³); gas at 1 atm and 60 °F (15 °C)
	48,900 Btu/ft ³ (1,825,000 kJ/m ³); gas at 3,000 psig (200 barg) and 60 °F (15 °C)
	121,000 Btu/ft ³ (4,500,000 kJ/m ³); gas at 10,000 psig (690 barg) and 60 °F (15 °C)
	227,850 Btu/ft ³ (8,491,000 kJ/m ³); liquid
Methane	875 Btu/ft ³ (32,560 kJ/m ³); gas at 1 atm and 60 °F (15 °C)
	184,100 Btu/ft ³ (6,860,300 kJ/m ³); gas at 3,000 psig (200 barg) and 60 °F (15 °C)
	561,500 Btu/ft ³ (20,920,400 kJ/m ³); liquid
Propane	2,325 Btu/ft ³ (86,670 kJ/m ³); gas at 1 atm and 60 °F (15 °C)
	630,400 Btu/ft ³ (23,488,800 kJ/m ³); liquid
Gasoline	836,000 Btu/ft ³ (31,150,000 kJ/m ³); liquid
Diesel	843,700 Btu/ft ³ (31,435,800 kJ/m ³) minimum; liquid
Methanol	424,100 Btu/ft ³ (15,800,100 kJ/m ³); liquid

Tabella 2.4 - Densità di energia di vari combustibili

L'idrogeno è un gas infiammabile a temperatura standard in un vasto intervallo di concentrazioni in aria (figura 2.34) ed è esplosivo per concentrazioni che vanno dal 15 al 59%. Pertanto piccole fughe di idrogeno possono costituire pericolo di incendi o esplosioni.

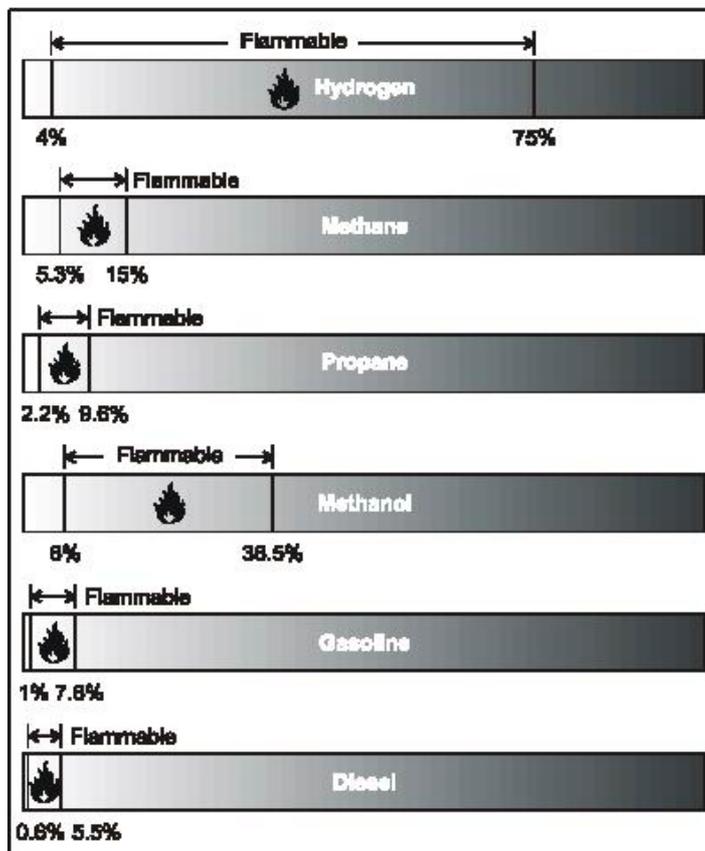


Figura 2.34 - Range di infiammabilità di vari combustibili

La temperatura di autoignizione dell'idrogeno (585 °C) è relativamente alta (quelle del metano e della benzina sono, rispettivamente, di 540 °C e 230÷480 °C).

L'energia minima di ignizione per miscela stechiometrica è pari a 0.02 mJ, contro 0.29 mJ per il metano e 0.26 mJ per il propano.

L'idrogeno ha un alto numero di ottano (130, contro 125 del metano e ~87 della benzina), pertanto resiste bene nei motori a combustione interna al fenomeno della detonazione.

La velocità di combustione dell'idrogeno è pari a 2.65÷3.25 m/s, all'incirca un ordine di grandezza più grande di quella del metano o della benzina.

Le fiamme dell'idrogeno sono di un colore blu pallido e sono quasi invisibili alla luce del giorno (fig. 2.35). La visibilità è migliorata dalla presenza di umidità o impurezze (quali lo zolfo).

In caso di perdite di idrogeno da un foro si dimostra che la concentrazione adatta alla sostentazione delle fiamme si ha solo nelle immediate vicinanze di



Figura 2.35 - Combustione dell'idrogeno

quest'ultimo. Perciò quando un getto di idrogeno viene infiammato la lunghezza della fiamma è inferiore a 500 diametri del foro (ad esempio un foro di 1 mm da luogo ad una fiamma di 0.5 m).

Per molti aspetti le fiamme dell'idrogeno sono meno pericolose di quelle della benzina: l'idrogeno data la sua leggerezza tende ad andare verso l'alto e disperdersi, perciò le sue fiamme sono verticali e molto concentrate (fig. 2.36); quando un serbatoio di idrogeno si danneggia e prende fuoco le fiamme bruciano lontane dal veicolo e il suo interno non diviene molto caldo. Ben diverso è il comportamento della benzina, che diffonde le fiamme più estesamente nell'arco di secondi facendo salire la temperatura dell'intero veicolo drammaticamente. L'idrogeno brucia con maggiore vigore (3÷6 cm/min contro 0.2÷0.9 cm/min), quindi per meno tempo. Inoltre la benzina, a differenza dell'idrogeno, genera fumo tossico.

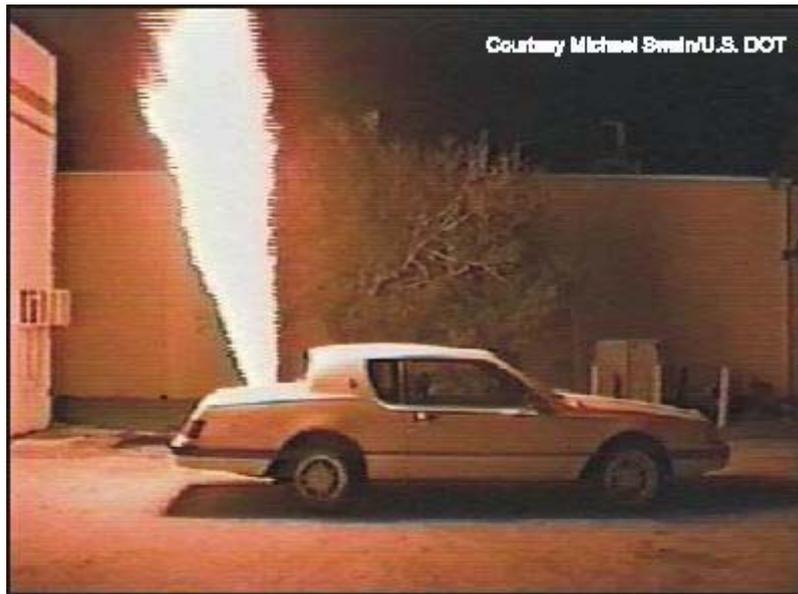


Figura 2.36 – Autoveicolo ad idrogeno in seguito a incendio

L'esposizione costante all'idrogeno genera un fenomeno conosciuto come *infragilimento da idrogeno* (fig. 2.37). Può portare a rotture catastrofiche in materiali metallici e non metallici.

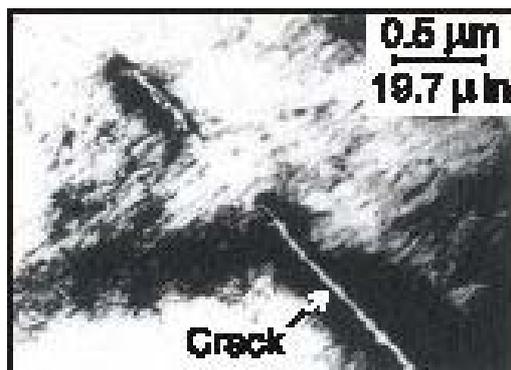


Figura 2.37 – Cricca da infragilimento da idrogeno

I fattori che influenzano il fenomeno (comunque piuttosto complesso e argomento di numerosi studi e ricerche [2.22]) sono la concentrazione dell'idrogeno, la sua pressione, la temperatura, la purezza, il livello di tensione della struttura, la composizione del metallo, le dimensioni del grano, ecc.

2.4.2 – Usi energetici dell'idrogeno

Le principali applicazioni energetiche dell'idrogeno, essendo questi come già evidenziato soltanto un vettore energetico, si possono avere nel settore dei trasporti (autotrazione, trasporto aereo).

Se ottenere un motore a combustione interna funzionante ad idrogeno è cosa piuttosto semplice, non altrettanto semplice è farlo funzionare bene. Il primo tentativo di sviluppare un'auto ad idrogeno risale al 1820 (Cecil), anno in cui fu sviluppato un meccanismo secondo cui un pistone veniva mosso dal vuoto lasciato dalla combustione di una miscela idrogeno-aria lasciata espandere e raffreddare. L'idrogeno è stato usato in molte missioni spaziali grazie al suo favorevole rapporto energia/peso (missioni Apollo, Skylab, Viking su Marte e Voyager su Saturno). Negli anni recenti il desiderio di affrancarsi dall'utilizzo dei combustibili fossili assieme alle crescenti preoccupazioni ambientali legate all'utilizzo di quest'ultimi hanno suscitato interesse nell'utilizzo dell'idrogeno quale combustibile veicolare (fig. 2.38).



Figura 2.38 – Pickup alimentato a idrogeno

Le principali caratteristiche di interesse in questo campo sono:

- il suo vasto intervallo di infiammabilità consente l'adozione di miscele povere, con conseguente riduzione della temperatura (e quindi minore emissione di NO_x);
- la sua bassa energia di ignizione (un ordine di grandezza inferiore a quella della benzina) consente l'adozione di miscele povere e la loro pronta ignizione. Ci possono essere problemi di autoaccensione e detonazione premature legate agli *hot spot*;
- piccola distanza di *quenching*: questo consente alle fiamme dell'idrogeno di avvicinarsi maggiormente, rispetto alla benzina, alle pareti del cilindro, ma può dar luogo più facilmente a ritorni di fiamma;
- alta temperatura di autoignizione: ciò consente di avere maggiori rapporti di compressione e quindi maggiori rendimenti;

- alla concentrazione stechiometrica le fiamme dell'idrogeno sono molto rapide (circa un ordine di grandezza più di quelle della benzina): questo consente di avvicinarsi maggiormente alle condizioni del ciclo termodinamico ideale (per miscele povere tale velocità però decresce significativamente);
- alta diffusività: questo consente una più facile formazione della miscela omogenea rispetto alla benzina;
- bassa densità: questo porta a due tipi di problemi: il trasporto dell'idrogeno necessario e la densità di energia della miscela idrogeno-aria, che essendo minore, ha una minore potenza specifica.

Dal momento che come comburente si usa aria i calcoli indicano un rapporto combustibile/aria per l'idrogeno pari a 34.33:1 in massa (2.4:1 in volume): tale rapporto è assai superiore a quello della benzina (circa 14.7:1). La potenza prodotta può variare quindi dall'85 al 120% di quella di un motore a benzina (a seconda dei metodi di ammissione nel cilindro). Il motore ad idrogeno produce principalmente acqua, ma nello scarico possono essere presenti ossidi di azoto (in seguito alle ben note reazioni ad alta temperatura fra l'ossigeno e l'azoto presenti nell'aria), la cui formazione è funzione di:

- rapporto aria/carburante;
- rapporto di compressione;
- numero di giri del motore;
- tempo di ignizione.

Possono inoltre essere presenti tracce di ossido e monossido di carbonio derivanti dalla combustione dell'olio lubrificante (comunque presente all'interno dei cilindri per la lubrificazione dei pistoni). Virtualmente, con una scelta opportuna dei parametri è possibile emettere quantitativi limitatissimi di inquinanti (dell'ordine delle ppm). Per confronto si riportano (fig. 2.39) i diagrammi del motore a idrogeno e quello a benzina in funzione del parametro phi (rapporto fra il quoziente combustibile/aria stechiometrico e quello effettivo).

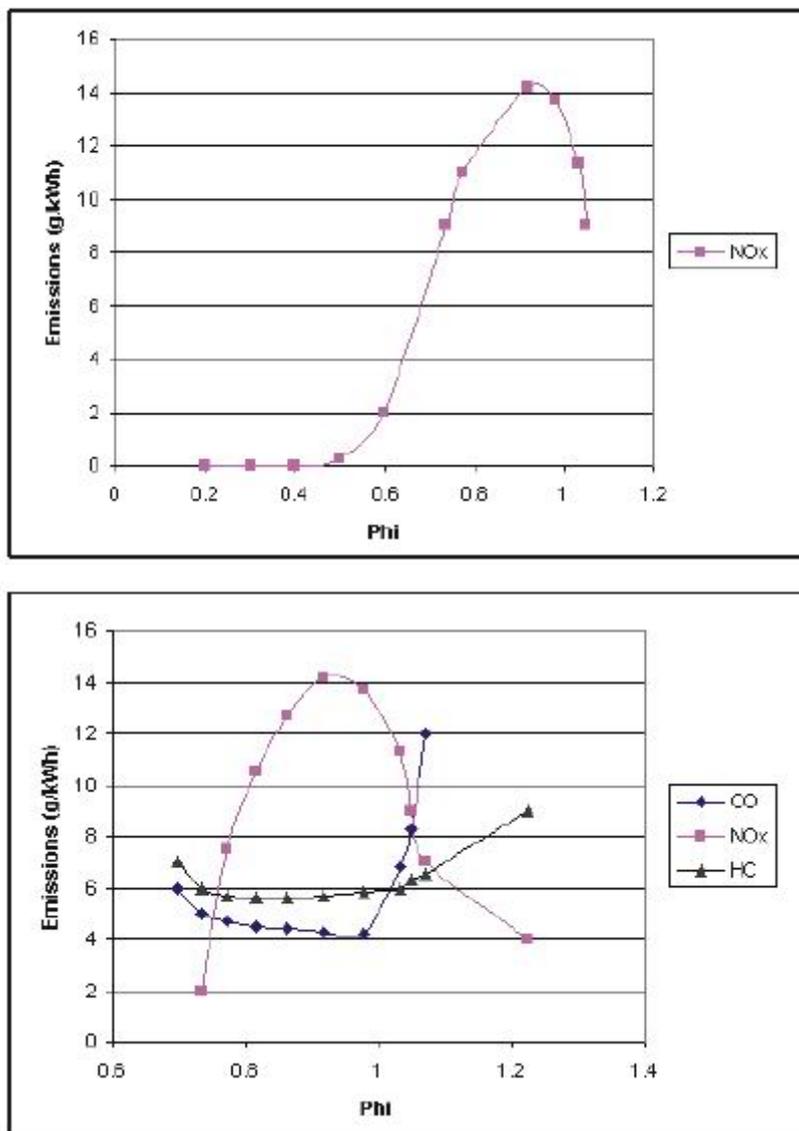


Figura 2.39 – Emissioni del motore a idrogeno e a benzina in funzione del parametro phi

Le auto ad idrogeno tipicamente vengono progettate per funzionare con cicli che utilizzano il doppio dell'aria richiesta per la combustione stechiometrica in modo da ridurre la temperatura di fiamma e quindi le emissioni di ossidi di azoto quasi a zero. Sfortunatamente questo riduce la potenza dei motori a circa la metà di quelli a benzina, pertanto questi sono più grandi e dotati di turbocompressori.

Un altro modo per sfruttare l'idrogeno nel settore dei trasporti concerne l'uso delle **celle a combustibile**. Esse presentano, comparate ai motori a combustione interna, dei vantaggi e degli svantaggi. I vantaggi sono:

- Nessuna emissione inquinante, producendo nel loro funzionamento solo acqua e calore. I motori a combustione interna invece possono emettere quantitativi, seppur molto minuti, di prodotti della combustione dell'olio lubrificante

- Maggiori rendimenti termodinamici (non legati in questo caso alle temperature massime ammissibili del sistema), come illustrato in fig. 2.40
- Non presentano cali di rendimento ai carichi parziali
- Presentano ottime caratteristiche di inseguimento del carico, basandosi, come le batterie, su reazioni chimiche che si adeguano quasi istantaneamente alle nuove condizioni di esercizio
- Nelle applicazioni alla trazione terrestre presentano ridotte temperature di funzionamento (inferiori a 100°C)
- Potenziali applicazioni alla cogenerazione (acqua calda e calore di qualità media, associabili ad applicazioni domestiche o industriali)
- Non richiedono regolazione
- Non richiedono ricarica. Devono essere ricarburate, ma questa operazione è assai più rapida della ricarica di una batteria

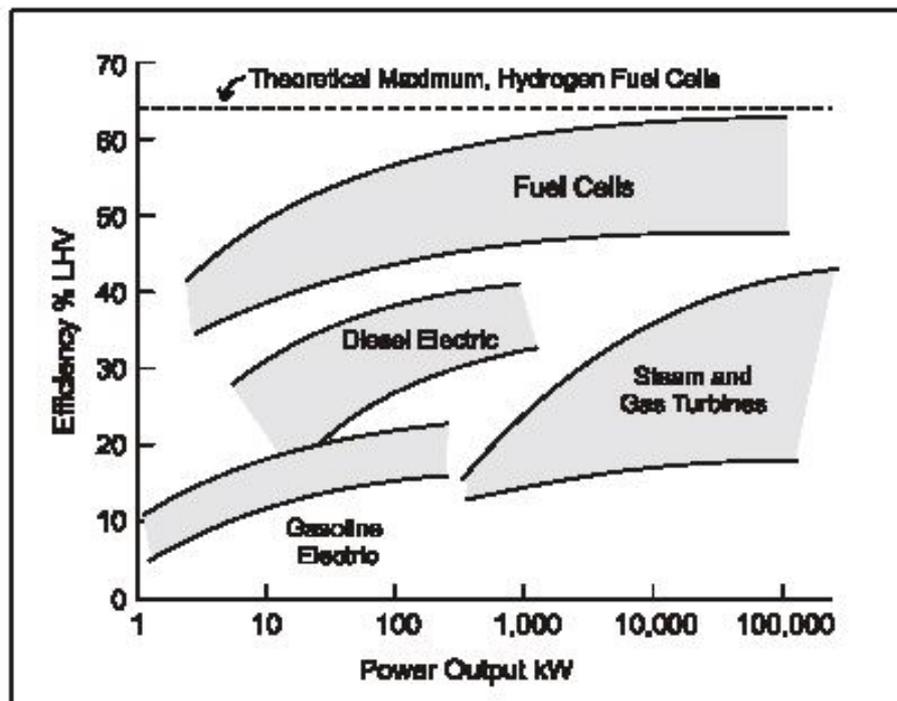


Figura 2.40 – Confronto fra i rendimenti di varie macchine

Le celle a combustibile presentano i seguenti svantaggi:

- Richiedono un combustibile molto puro, privo di contaminazioni. Tale problema non si pone nella tecnologia dei motori a combustione interna
- Non devono congelare con l'acqua al loro interno. Durante il funzionamento le celle a combustibile generano sufficiente calore per mantenere l'acqua liquida, ma se vengono spente in climi freddi devono essere tenute al caldo
- Richiedono complessi sistemi di supporto e controllo

- Sono pesanti
- Rappresentano ancora una tecnologia prototipica

Possono essere applicate in piccoli impianti elettrici (ad esempio 250KW, per alimentare comunità isolate, fig. 2.41), nei sottomarini (dato il basso rumore ed emissioni infrarosse, fig. 2.42), nell'alimentazione di autobus (che hanno spazio per tutti i componenti, possono essere riforniti ad una opportuna stazione, possono disporre di personale qualificato per la manutenzione, fig. 2.43), automobili (prototipi di diverse case automobilistiche, quali Daimler-Chrysler, Ford, General Motors, Nissan, Mazda, Subaru, Toyota, Honda, Hyundai, fig. 2.44).



Figura 2.41 – Generatore elettrico *Ballard* da 250 kW alimentato a gas naturale



Figura 2.42 – Impianto a celle a combustibile da 80 kW alimentate con idrogeno e ossigeno, costruito dalla *Ballard Power Systems* per il costruttore tedesco di sottomarini *Howaldtswerke-Deutsche Werft AD*



Figura 2.43 – Prototipi di 4° generazione (2000) di bus a celle a combustibile della XCELLSiS



Figura 2.44 – Prototipo delle Nekar* (Daimler-Chrysler)

Si riporta di seguito una figura in cui vengono comparate le caratteristiche delle celle a combustibile, delle batterie e dei motori a combustione interna (fig. 2.45).

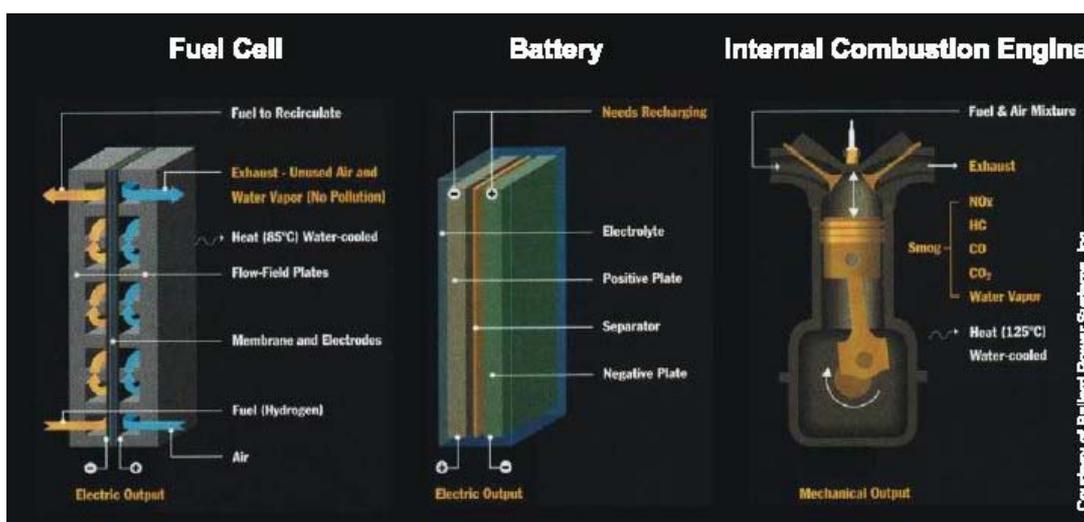


Figura 2.45 – Confronto fra le celle a combustibile, le batterie ed i motori a combustione interna

* la versione 5, alimentata a metanolo, presenta sistemi estremamente compatti, tanto da lasciare il posto a 5 passeggeri e poter raggiungere la velocità di 150 Km/ora con emissioni quasi nulle

2.5 – La produzione di idrogeno per via convenzionale

La questione fondamentale riguardo all'applicazione delle tecnologie legate all'uso dell'idrogeno riguarda la sua produzione. Pur essendo infatti molto abbondante esso è molto reattivo, e non trovandosi libero in natura deve essere estratto da altre molecole. Si può osservare che l'energia richiesta è semplice ottenerla da molecole a più alto contenuto energetico, quali i combustibili fossili (*reforming*); maggiori quantitativi di energia sono richiesti per estrarlo da composti a minore contenuto energetico, come l'acqua.

Oggi il metodo più economico di estrazione dell'idrogeno è il reforming, ma purtroppo tale processo emette gas inquinanti e consuma combustibili non rinnovabili (fossili). L'idrogeno può essere estratto dall'acqua con il processo di elettrolisi, rinnovabile e non inquinante di per se, ma richiede grossi quantitativi di energia elettrica: la convenienza o meno del processo dipende quindi dalla natura della sorgente di energia. Un modo per comparare l'effetto ambientale dei vari processi è quello di considerare la quantità di anidride carbonica emessa per 1000 Km percorsi. I risultati dello studio (basati sull'uso di una Mercedes Benz classe A) dimostrano che l'impatto ambientale delle auto ad idrogeno dipende sensibilmente dal processo con cui questo è stato prodotto (fig. 2.46).

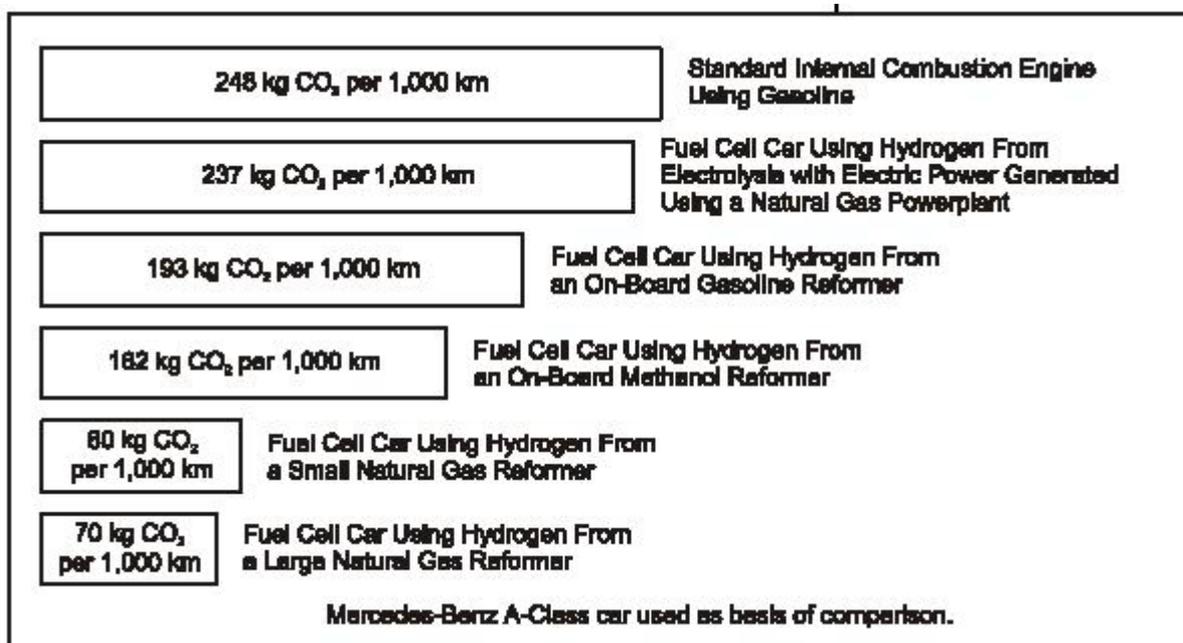


Figura 2.46 – Emissioni totali di biossido di carbonio per diversi metodi di produzione dell'idrogeno

Metodi alternativi di produzione dell'idrogeno contemplano la decomposizione termochimica dell'acqua, la fotoconversione, i processi fotobiologici, la produzione dalle biomasse e alcuni

processi industriali. Nonostante molti di questi si rivelino promettenti, sono ancora in uno stadio di sviluppo e possono fornire solo limitati quantitativi di idrogeno. Attualmente la produzione di idrogeno (a parità di energia) costa da 3 a 15 volte più di quella del gas naturale, e da 1.5 a 9 volte più di quella della benzina, a seconda del metodo di produzione prescelto.

L'**elettrolisi** è un processo interessante poiché non consuma direttamente combustibili fossili, produce idrogeno molto puro, beneficia di fattori di produzione di scala. Inoltre si può trarre vantaggio nella produzione elettrolitica dall'elettricità prodotta in abbondanza e a basso prezzo durante le ore notturne (sarebbe uno dei metodi più logici per evitare gli sprechi). Elemento chiave del processo è l'elettrolizzatore, costituito da una serie di celle elettrolitiche immerse in acqua resa conduttiva con l'aggiunta, ad esempio, di idrossido di potassio (fig. 2.47).

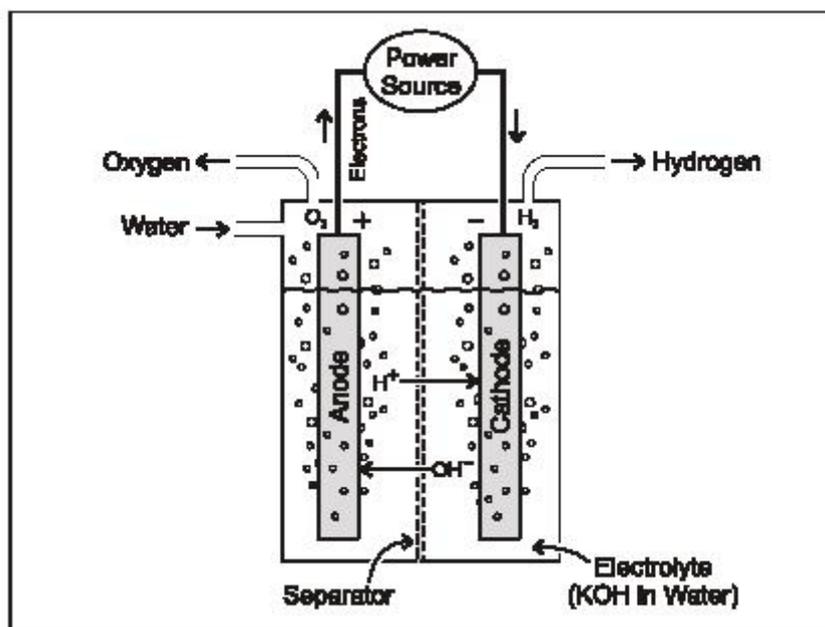


Figura 2.47 – Tipica cella elettrolitica

Il tasso di produzione di idrogeno è legato alla densità di corrente (corrente elettrica diviso l'area di passaggio). In generale però maggiore è la densità di corrente, maggiore è il voltaggio richiesto e quindi il consumo di potenza a parità di idrogeno prodotto; tuttavia voltaggi maggiori consentono l'utilizzo di impianti di minori dimensioni, con conseguente riduzione dei costi capitali. Allo stato dell'arte gli elettrolizzatori operano con un'efficienza del 65÷80% e densità di corrente di 2000 A/m².

Il voltaggio minimo perché si abbia il fenomeno di elettrolisi è pari a 1.23 Volt (25°C), ma con tale voltaggio è richiesto apporto esterno di calore perché la reazione proceda. Con 1.47 Volt non è richiesta alcuna fonte esterna di calore. Operare con elettrolizzatori a bassi voltaggi è conveniente economicamente, poiché l'aggiunta esterna di calore costa meno dell'elettricità.

Un altro metodo di produzione potrebbe essere costituito dalla *termoelettrolisi*: a 1000°C per ottenere 1 m³ di idrogeno sono necessari 2.4 Kwh, contro 3.7 Kwh/m³ (32.9 KWh/Kg di H₂ a 1.23 V[#]) [2.20] con gli elettrolizzatori a temperatura ambiente (il guadagno in termini di rendimento è legato al fatto che l'energia termica, non essendo stata sottoposta alla conversione termodinamica, subisce, nel complesso, un minor numero di trasformazioni dell'energia elettrica).

Il *reforming* è un processo chimico secondo cui combustibili idrogenati reagiscono con vapore e ossigeno. Quando applicato a combustibili solidi prende il nome di *gassificazione*. La composizione chimica dell'idrogeno risultante dipende dalla natura del combustibile utilizzato e dal processo utilizzato, ma comunque contiene impurezze quali azoto, biossido di carbonio, monossido di carbonio, e combustibile che non ha preso parte alla reazione. L'efficienza del processo si aggira fra il 65 ed il 75%. Il reforming produce tre tipi di inquinanti:

- il biossido di carbonio
- monossido di carbonio e combustibile che non ha reagito
- prodotti della combustione, quali gli ossidi di azoto

In compenso la sua tecnologia di produzione è ampiamente provata, economica e non richiede grandi quantitativi di energia (fig. 2.48).



Figura 2.48 – Reformer di medie dimensioni alimentato da gas naturale

I potenziali combustibili utilizzabili nel processo sono:

- il metano;
- il metanolo;
- la benzina o il gasolio;

[#] industrialmente si lavora con rendimenti del 70% a 1.75 V consumando 46.8 KWh/Kg di H₂

- il carbone (attualmente l'opzione più cara).

Con questo processo attualmente viene prodotto il 48% del fabbisogno mondiale di idrogeno (240 miliardi di metri cubi all'anno) [2.20].

La **decomposizione termochimica** è in linea di principio simile a all'elettrolisi, a differenza della quale l'energia viene fornita esclusivamente sotto forma di calore. Il massimo rendimento ottenibile è pari al 50%. La decomposizione diretta richiede temperature troppo alte per essere di pratico interesse (2500 °C); si usano piuttosto dei reagenti chimici per la decomposizione in più passi secondo lo schema:

1. Produzione di ossigeno
2. Produzione di idrogeno
3. Rigenerazione dei materiali

Tali processi hanno luogo a temperature dell'ordine di 700°C.

La **fotoconversione** (fig. 2.49) è un processo con cui l'energia elettrica necessaria a decomporre l'acqua viene direttamente fornita dal sole. L'acqua non può assorbire direttamente le radiazioni solari, essendo trasparente alle lunghezze d'onda richieste, quindi il processo più diffuso utilizza celle solari costituite da fotoelettrodi immersi in acqua e separati da una membrana che consenta la diffusione degli ioni ma impedisca il rimescolamento dei gas. Il catodo è costituito da materiale semiconduttore di tipo "p", l'anodo da quello di tipo "n". Come tutti i processi solari la fotoconversione è conveniente solo laddove l'esposizione solare sia prolungata ed abbondante. L'efficienza massima del sistema è comunque bassa e si aggira fra l'8 ed il 12%.

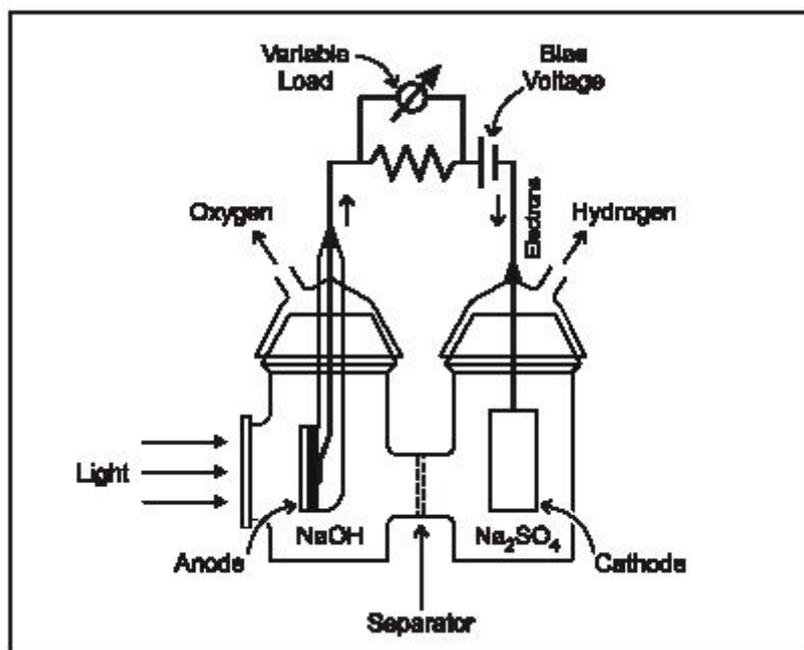


Figura 2.49 – Cella di fotoconversione

I **processi fotobiologici** possono avvalersi anch'essi dell'energia solare per la produzione di idrogeno, attraverso l'uso di particolari alghe contenenti enzimi idrogeno-metabolizzanti. Sfortunatamente l'efficienza di questi processi è molto bassa, dell'ordine dell'1%.

L'idrogeno potrebbe essere prodotto anche dalla decomposizione delle **biomasse**: queste sono costituite da tutte quelle parti di piante o animali che possono essere convertite in energia. Trattasi di sostanze organiche tratte da una serie di fonti: residui, rifiuti e avanzi di colture. Questa tecnologia non è ancora ben sviluppata, e pertanto risulta attualmente la forma di produzione dell'idrogeno più cara.

Anche alcuni **processi industriali** convenzionali producono idrogeno (come sottoprodotto).

L'idrogeno è infatti un sottoprodotto:

- dell'industria del cloro e dei polivinilcloruri
- dell'industria dell'idrossido di sodio
- della raffinazione del petrolio
- degli altiforni
- dei processi di deidrogenazione chimica

Generalmente tali processi presentano capacità di produzione insufficienti ed eccessivamente costose per fornire grandi quantitativi di idrogeno.