

IL NUOVO SAGGIATORE

BOLLETTINO DELLA SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

Nuova Serie Anno 3
N. 2 marzo-aprile 1987

ENERGIA E AMBIENTE - ANALISI SUL LUNGO TERMINE(*)

Cesare Marchetti
I.I.A.S.A., Vienna

Sin da quando l'uomo, con il fuoco, cominciò ad usare l'energia in modo controllato, sempre ha interferito con l'ambiente. Già l'uomo primitivo usava il fuoco per distruggere boschi e creare le praterie adatte agli animali che cacciava.

In epoca storica, ed in particolare nell'area del Mediterraneo, boschi naturali venivano distrutti per farne legname per ardere o per la costruzione di navi. Le conseguenze ecologiche erano abbastanza macroscopiche per finire dentro i libri degli storici. Come dice anche Platone.

Quando, con la crescita delle popolazioni umane, conseguenti allo sviluppo delle tecniche agricole, e con la concentrazione di attività artigianali ed industriali, l'estrazione del carbo-

ne fossile divenne economicamente interessante, un'altra forma d'inquinamento si aggiunse, quella da zolfo e catrami che nella combustione vengono liberati sotto forma di volatili vari, fumi e anidride solforosa. La reazione sociale a questi inquinamenti fu abbastanza violenta, anche se piuttosto inefficace. Da un lato si leggono editti emessi a Londra nel 1700 che proibiscono l'uso industriale del carbone, pena la morte, dall'altro si vede che il consumo di carbone cresce esponenzialmente, progressivamente sostituendo la legna.

A questo punto vorrei fare un'osservazione. La società è un grande sistema che funziona per azioni e reazioni complesse e, quando qualcosa non va, cerca di compensare stabilendo dei circuiti di controllo. Nell'animismo incorporato nelle antiche religioni c'era un freno potente alle azioni distruttive che i mezzi tecnici dell'uomo anche allora permettevano. Tagliare un albero non era solo una questione di asce e di proprietà, bisognava anche mettersi d'accordo con gli esseri di vario tipo che in questi alberi vivevano.

Nel nuovo spirito portato dal Cristianesimo ed esplicitato nel Rinascimento, le cure ai mali vengono ricercate attraverso circuiti di controllo terreni, cioè attraverso le leggi e la tecnologia.

Quel che si vede leggendo le cronache inglesi è che l'aumento del consumo di carbone non peggiorò la situazione più di tanto, perché una migliore tecnica di combustione, la scelta dei carboni e gli alti camini mantenevano l'inquinamento a livelli tollerabili.

Un esempio divertente della soluzione di un problema ambientale con un *fix* tecnologico è legato all'introduzione dell'automobile come mezzo di trasporto personale negli Stati Uniti.

Prima dell'automobile ci si muoveva con i cavalli, e nel 1920, anno del massimo splendore, ce n'erano negli USA circa 25 milioni. Analizzando l'auto dal punto di vista velocità e costo si vede che nell'epoca era praticamente equivalente al cavallo. I veri problemi erano il parcheggio notturno e le *emissioni*. Una ventina di chili al giorno per cavallo. Anche se ai contadini della mia giovinezza ed ai Verdi di oggi vengono le lacrime al pensiero, la società nel suo insieme scelse il mezzo meno inquinante, *l'automobile!*

Se si esamina criticamente l'evoluzione del consumo energetico negli ultimi cento anni (fig. 1), si possono estrarre alcune informazioni utili per il futuro. Intanto la crescita *media* è piuttosto contenuta, il 2.3% per anno (anche

(*) Relazione presentata alla Conferenza Nazionale sull'Energia.

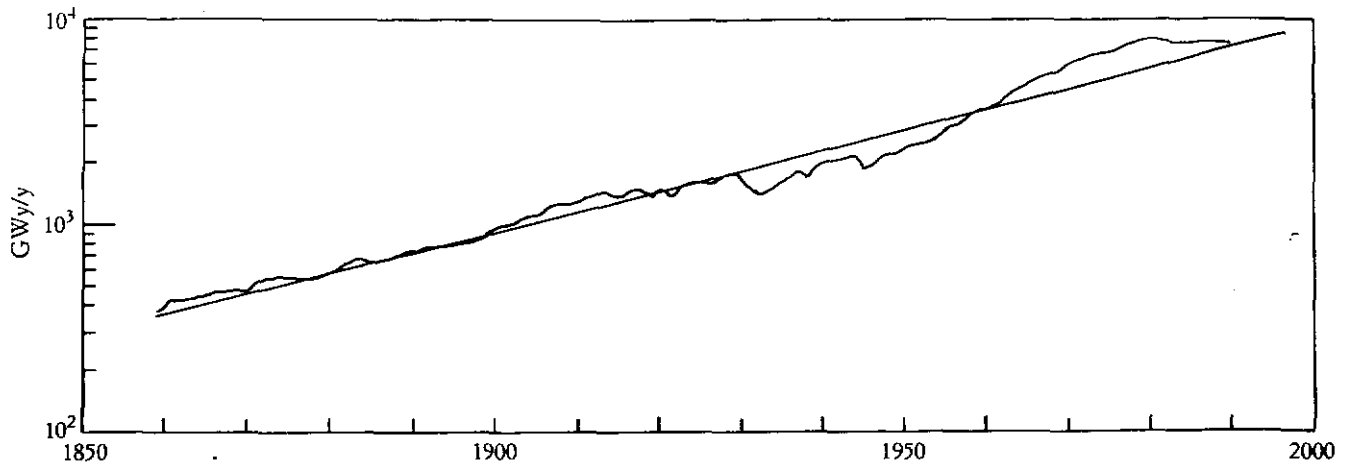


Fig. 1. - Se includiamo le energie rinnovabili, come legno, fieno, vento, acqua, molto importanti fino alla fine del secolo scorso, si ottiene una curva molto regolare per la crescita dei consumi energetici a livello mondiale, con un tasso medio del 2.3%. Le oscillazioni si possono ricondurre ai cicli economici lunghi. Le unità (GW/y) sono equivalenti a milioni di tonnellate di carbone equivalente (TCE) per anno (N. Nakicenovic, 1984).

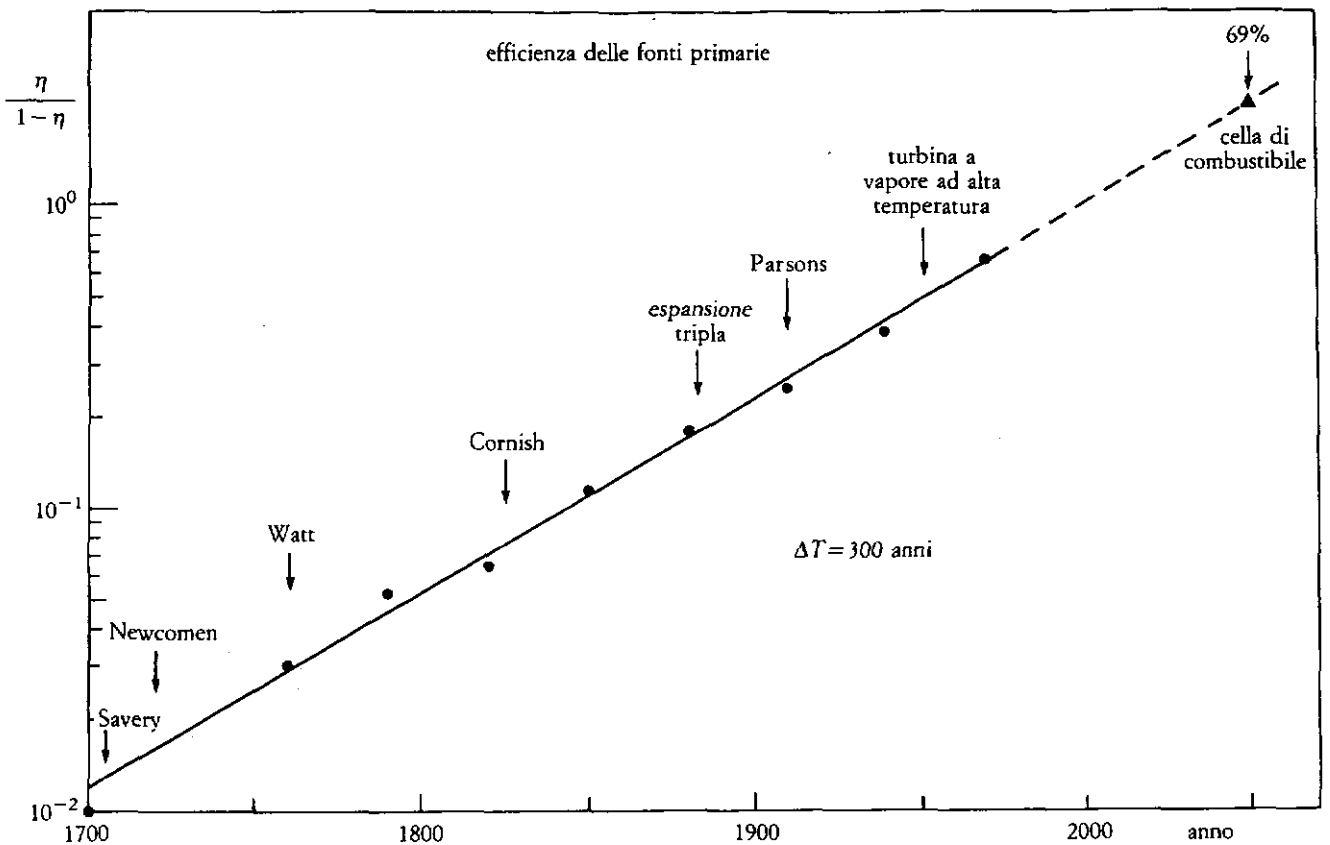


Fig. 2. - L'efficienza nell'uso dell'energia è legata a molti fattori, ed in particolare all'efficienza delle tecniche di base. Per il caso delle macchine a vapore, e per quello della produzione dell'ammoniaca, il gioco economico ed informatico gestito dalle nostre società porta a dei ritmi di sviluppo delle efficienze altamente «regolati». La concorrenza in termini darwiniani è tra l'efficienza termodinamica acquisita (η), e la *terra nullius*, quella non ancora acquisita ($1 - \eta$).

12

negli USA), con oscillazioni cinquantennali legate ai cicli economici. Poiché la popolazione mondiale è aumentata nello stesso periodo nel mondo (e negli USA) di circa l'1.8% per anno, si vede che l'aumento *pro capite* è solo dello 0.5%. Questo è dovuto al fatto che l'efficienza nell'uso dell'energia primaria è cresciuta continuamente e, sia detto per inciso, seguendo leggi precise (fig. 2). Attualmente l'efficienza termodinamica media nei paesi occidentali è di

circa il 5%. C'è ancora molto da espandersi in questa direzione, all'ingrosso di un fattore dieci, ma non sembra che si guadagni in velocità spingendo più di tanto.

La seconda è che le quote di mercato delle varie fonti primarie seguono una dinamica temporale riconducibile ad una competizione di tipo darwiniano, quantificabile con le equazioni di Volterra (fig. 3). Questo è molto importante perché ciascuna fonte energetica in-

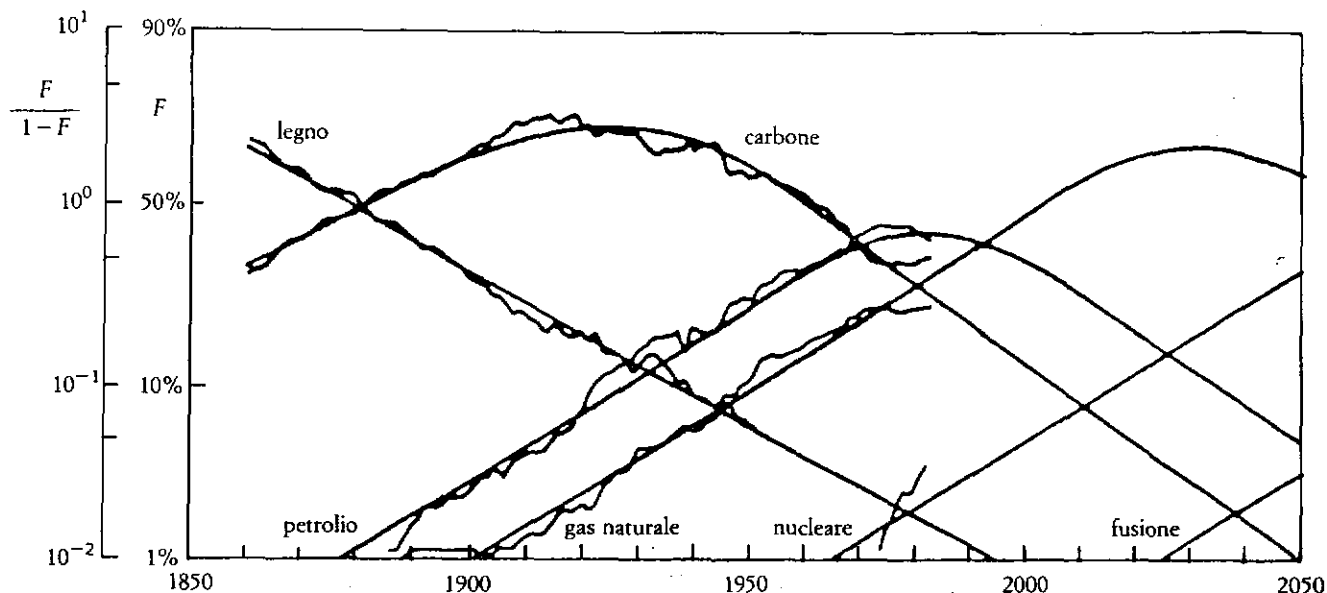


Fig. 3. - La quantità totale della fig. 1 è qui ripartita tra le varie fonti primarie. F indica la frazione di mercato presa da una fonte, il mercato totale è preso come unità. $F/(1-F)$, rappresenta dunque il rapporto tra la frazione di mercato coperta da una fonte e quella coperta dalle altre fonti prese insieme. I dati statistici sono rappresentati dalle linee incerte. Le linee lisce rappresentano un sistema di funzioni che fittano i dati, nell'ipotesi che le energie primarie siano «specie» in competizione darwiniana. Queste equazioni permettono, nel caso descritto, delle buone previsioni fino a 50 anni. Come il passato prova, guerre e crisi non modificano certi andamenti secolari.

quina in misura diversa, e le equazioni permettono di prevedere il mix di combustibili primari, con buona precisione, per circa cinquant'anni. Usando l'ipotesi della crescita stabile al 2.3% per l'energia nel suo complesso, e i risultati previsionali sul mix di energie primarie, si possono, ad esempio, calcolare le emissioni totali di CO_2 a livello mondiale. Poiché, tra tutte le emissioni, la CO_2 è quella che per ora sfugge a qualsiasi controllo, si può così avere un panorama delle emissioni «fatali» (fig. 4).

Per quel che concerne l'introduzione di fonti energetiche nuove, è possibile con una logica legata ai processi d'innovazione prevederne la data approssimativa. Per questo nella fig. 3 appare una curva dedicata alla fusione nucleare, con inizio nel 2025. Un'altra caratteristica che emerge dalle analisi di sistemi competitivi fatte con le equazioni di Volterra (circa 1000 casi analizzati) è che un concorrente non torna più indietro quando ha penetrato circa il 5% del mercato. Questo significherebbe, nel nostro contesto, che l'energia nucleare è ormai abbarbicata e verrà eliminata solo sul lungo termine per effetto della concorrenza della fusione. Sia ben chiaro che tutti i tempi in questo sistema vanno in termini di secoli, la costante intrinseca della sostituzione essendo di circa cento anni.

Siamo ora armati di quantità e qualità per congetturare su quel che succederà e quel che si potrebbe fare. Intanto abbiamo già visto (fig. 4) che la quantità di anidride carbonica emessa sarà circa il 30% di quella già presente nell'at-

mosfera. Di questa una parte (fin'ora il 50%) verrà riassorbita nel mare. Di conseguenza il temuto raddoppio della CO_2 nell'atmosfera non ci sarà. Quale sia l'importanza di questo 30% è ancora da vedersi, ad ogni buon conto sono possibili misure correttive anche in questa direzione.

Le fig. 1 e 3 insieme ci permettono di calcolare le quantità totali consumate, fino ad oggi e per il futuro, per ciascuna fonte energetica. Queste quantità, e la loro distribuzione nel tempo, sono cruciali per avere un'idea dell'impatto ambientale legato all'uso di ciascuna fonte.

Per il carbone le quantità usate saranno in declino e i pressoché unici consumatori saranno le centrali elettriche e la siderurgia. Questo permette un controllo stretto delle emissioni a livello dell'utilizzatore finale. D'altra parte queste emissioni sono molto concentrate, il che le rende particolarmente virulente.

Un consorzio Germania-USA-Giappone-Taiwan sta studiando un sistema «emissioni zero» che permetterebbe di eliminare completamente il problema, effettuando la combustione con ossigeno ed iniettando i prodotti della combustione (incluso il CO_2) in strutture geologiche.

Rispetto al normale scrubbing dei fumi, il sistema non sembra porre problemi di costi e rendimenti, e permetterebbe un ciclo di combustibile chiuso, del tipo di quello nucleare, cioè senza interazioni con l'atmosfera. Restano i non trascurabili inquinamenti alla produzione,

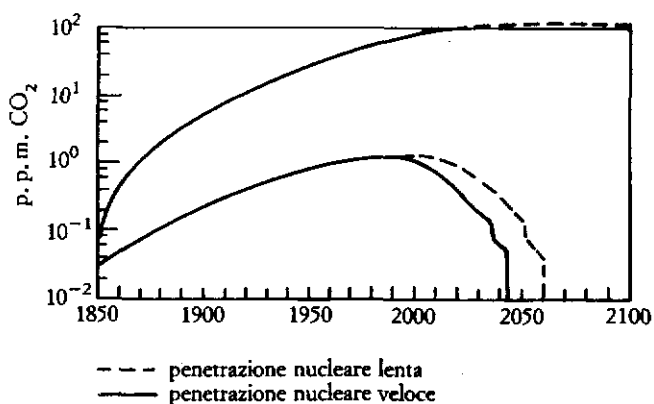


Fig. 4. - Assegnando appropriati valori per le emissioni specifiche di CO₂ da parte di legno, carbone, petrolio e metano, si può calcolare l'emissione totale di CO₂ per anno (curva inferiore) e quella integrata (curva superiore). Le unità sono le parti per milione nell'atmosfera, sono dunque già una misura dell'effetto finale. Una parte di questa CO₂ però non resta nell'atmosfera, viene disciolta nelle acque superficiali degli oceani, e poi tirata sul fondo da correnti verticali nel mare di Weddel e di fronte alla Norvegia (in parte minore dalla corrente in uscita a Gibilterra). I valori calcolati implicano naturalmente una penetrazione dell'energia nucleare come indicato in fig. 3.

nel trasporto e stoccaggio, nonché il notevole prezzo in vite umane che questa tecnologia ancora impone. Per i 100 miliardi di tonnellate di carbone che verranno estratte nel futuro secondo il nostro modello, si può stimare che centomila uomini moriranno direttamente, soprattutto in miniera, come conseguenza.

Per quel che riguarda il *petrolio* il modello dà consumi pressoché costanti, a livello mondiale per almeno venti anni, e decrescenti dopo. Si può supporre che questo petrolio andrà sempre più ad alimentare i trasporti. Alla crescita di questa domanda corrisponderà una diminuzione in altri settori (industria, riscaldamento, ecc. dove il petrolio viene sostituito dal metano). L'inquinamento da circolazione automobilistica è giustamente nel mirino degli ecologisti ed una pressoché completa desolfurazione delle benzine e dei diesel potrebbe già costituire un obiettivo forte per i prossimi dieci-venti anni. L'eliminazione del piombo, ed il conseguente uso di catalizzatori od altri accorgimenti per eliminare il CO e gli ossidi di azoto, potrebbe portare ad una situazione tollerabile negli inquinamenti da questa fonte.

Le quantità totali di petrolio che verranno consumate fino alla sua completa sostituzione si aggirano sui trecento miliardi di tonnellate, circa tre volte tanto quanto se ne è consumato fino ad ora. Il futuro è dunque ancora dalla parte degli sceicchi anche se i prezzi resteranno sostanzialmente stabili nei prossimi venti anni. Queste quantità permettono di calcolare il cari-

co di zolfo ed altri prodotti che verranno riversati nell'atmosfera (incluso CO₂) in relazione alle misure prese per controllarli.

Per quel che concerne il *metano* la facilità di purificarlo all'origine fa sì che arrivi molto puro al consumo. Lo stato gassoso inoltre permette combustioni complete e dunque finalmente senza inquinamenti. L'uso del metano nel riscaldamento domestico tiene pulito il cielo di Londra e di Mosca, e sta conquistando gli usi civili anche in Italia. Secondo il nostro modello il suo uso è in espansione e lo sarà per i prossimi cinquant'anni. La quantità che verrà estratta sarà di oltre mille miliardi di tonnellate ma dal punto di vista ambientale il carico principale sarà dovuto al CO₂. La politica migliore sembra dunque quella di «dargli una mano». Incidentalmente, sia a livello mondiale che a quello italiano, i consumi di metano sono al disotto di quanto il modello Volterra predice. Di solito questo comporta delle «ripresche» che in una diecina di anni ristabiliscono il corso.

Veniamo ora alla *vexata quaestio* del *nucleare*. Secondo le regole del gioco darwiniano, a livello mondiale, il nucleare non tornerà indietro. Vediamo quali ne sono le conseguenze. Intanto le manipolazioni del nucleo mettono in gioco delle quantità elevatissime di radioattività. A questo si pone rimedio con un sistema di gestione ed un ciclo di combustibile ad *emissione zero*. In pratica bisogna vedere quanto ci avviciniamo a questo zero. Guardando a trent'anni di energia nucleare, ed escludendo Chernobyl, la situazione appare, *a posteriori*, molto buona.

Il livello della radioattività uscita dai sistemi di contenimento è una frazione infinitesimale di quella generata nel processo e si avvicina molto al concetto di emissione zero. È d'altra parte comparabile a quella che si trova già all'esterno per altre ragioni: radioattività primarie delle rocce terrestri e raggi cosmici. Questa radioattività ambientale è molto variabile da luogo a luogo. È doppia a Roma rispetto a Milano, ed in certe aree dell'India e del Brasile è addirittura maggiore di centinaia di volte.

Poiché *flora e fauna* in queste località non sembrano particolarmente strane, si può pensare da un lato che i meccanismi antiradiazione incorporati negli organismi viventi (ad esempio, per riparare il DNA) possano far fronte a questi livelli di radiazione. In altre parole la definizione di livelli accettabili richiederà ancora un lungo bucato culturale. Se l'energia nucleare da fissione si espanderà come il modello prevede, la quantità di prodotti di fissio-

ne prodotti e manipolati crescerà proporzionalmente, rendendo «scorrevole» il problema del contenimento, esattamente come nel caso di un aumento del consumo di combustibili fossili. Può essere, per questa ragione, necessario ad un certo punto un cambiamento radicale di tecnologie che permetta di fronteggiare i nuovi standard. Il messaggio lasciato da Chernobyl è estremamente importante, perché mostra il ruolo essenziale di una *sicurezza intrinseca* nella concezione di un reattore che tenga separati il mondo interno al reattore da quello esterno, qualsiasi cosa gli operatori facciano.

Una linea di sviluppo che incorpora questo concetto di sicurezza intrinseca è quella del HTR, il reattore ad alta temperatura sviluppato in Germania negli ultimi venti anni. La sicurezza deriva sia dal disegno nucleare, per cui un aumento di temperatura arresta il reattore, sia da quello fisico, per cui il combustibile, chiuso in minuscoli granuli, non libera radioattività anche se il reattore è «abbandonato». Incidentalmente questo tipo di reattore è particolarmente adatto alla produzione di *idrogeno* a partire dall'acqua, una caratteristica molto importante nel quadro dello sviluppo dell'energia nucleare.

Si vede infatti, analizzando nel medio termine (20 anni) la penetrazione dell'energia nucleare nell'area della produzione di elettricità, che la saturazione di questo mercato non è lontana. Poiché queste energie primarie mirano sempre alla conquista del mercato *in toto*, c'è da prevedere che l'energia nucleare verrà utilizzata anche per la produzione di combustibili sintetici, per coprire le aree che non possono venir servite dal vettore elettrico. Molte analisi sono state fatte negli ultimi venti anni per identificare il vettore energetico idoneo a fiancheggiare quello elettrico e la convergenza generale è sull'idrogeno per decomposizione dell'acqua.

Questa operazione è di grande importanza nel lungo termine, perché l'uso dell'idrogeno da un lato *riduce praticamente a zero l'inquinamento ambientale a livello dell'utilizzatore*, ad esempio le automobili, e dall'altro crea una nuova condizione strutturale che porta a poche e grandissime centrali o centri di generazione nucleare. Questo permette da un lato di moltiplicare le misure di sicurezza passiva ed attiva, e dall'altro di decentrare fortemente i siti. L'effetto è dovuto all'elevata trasportabilità dell'idrogeno con gasdotti, il che permette alla centrale di «vedere» un territorio molto grande (ordine di grandezza 1 milione di km²).

D'altra parte è relativamente facile stoccare idrogeno, ad esempio in strutture geologiche, e questo permette agli impianti di lavorare a tavoletta, situazione ottimale per una centrale nucleare, sia dal punto di vista tecnico e di sicurezza che da quello economico ovviamente. La tecnica dell'idrogeno, sia pur con le normali costanti di tempo caratteristiche dell'introduzione di queste nuove grandi tecnologie energetiche, permetterà di eliminare completamente l'impatto ambientale *chimico* legato all'uso dell'energia.

Questo significa in termine di strategie che conviene tamponare al meglio l'inquinamento da carbone e petrolio, ma senza strafare. Conviene d'altronde concentrare gli ingegneri sulle tecniche di separazione tra il «dentro» e il «fuori» nel ciclo di combustibile nucleare di uno o due ordini di grandezza.

Sempre restando nel campo dei *technological fix*, vorrei semplicemente citare una tecnica di stoccaggio dei prodotti di fissione esplorata ad Ispra molti anni fa, in cui si propone di deporli a grande profondità, al di sotto dei 5000 metri, dove la plasticità delle rocce elimina ogni porosità, garantendo così l'inaccessibilità all'acqua, che viene sempre considerata un veicolo di diffusione per gli stoccaggi sotterranei.

Il quadro che ho costruito, sulla base di modelli molto solidi, oblitera la fine del mondo in vista, ma impone delle attività intense, di carattere tecnico, legislativo e culturale, in poche ed importanti direzioni.