

# Cosa è l'energia? La civiltà moderna dalla macchina a vapore all'energia solare

F. Sacchetti

Dipartimento di Fisica e Geologia

Università degli Studi di Perugia

L'energia ha una valenza economica di dimensioni planetarie ed ogni discussione non può prescindere da questo fatto

# Lezione zero

Un paese che distrugge la sua scuola non lo fa mai solo per soldi,  
perché le risorse mancano o i costi sono eccessivi.

Un paese che demolisce l'istruzione è già governato da quelli che  
dalla diffusione del sapere hanno solo da perdere.

Italo Calvino (da La Repubblica del 15 marzo 1980)

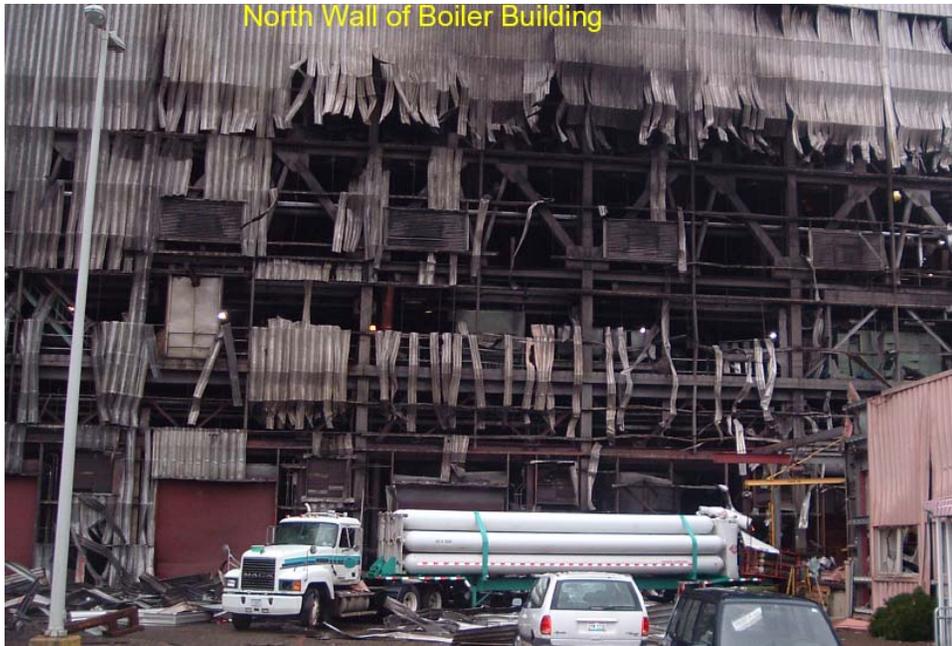
Non è bene cercare di fermare il progresso della conoscenza.  
L'ignoranza non è mai meglio della conoscenza.

Enrico Fermi

# Fukushima, i reattori nucleari dopo il terremoto e tsunami



Un reattore nucleare NON può tecnicamente esplodere come una bomba ma ogni commento alla fotografia è inutile.



## Esplosione di idrogeno alla AEP in Ohio

NESSUNA  
tecnologia può  
essere a prova  
di rischio



Le informazioni vengono spesso adattate ad una specifica tesi. Il pubblico deve essere sufficientemente istruito per poter distinguere e selezionare le informazioni

L'istruzione è un elemento essenziale per poter valutare le informazioni che il mondo moderno mette a disposizione tramite una miriade di mezzi

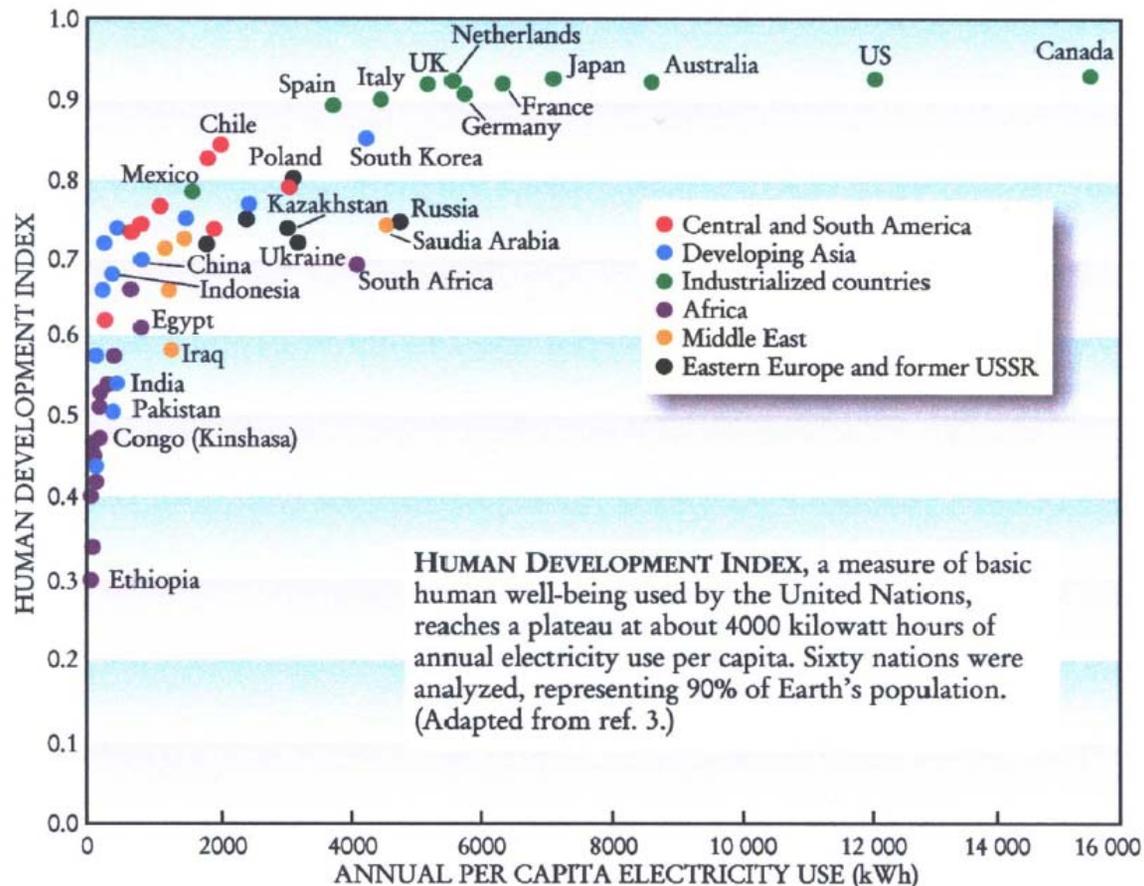
L'energia è uno dei settori più importanti e più complessi della società moderna e l'esame del suo impatto è tra i più complessi

Se un sistema funziona, anche parzialmente, ci sono molti modi per peggiorarlo e pochissimi per migliorarlo

# The Energy Challenge (la sfida dell'energia)

*Physics Today, Aprile 2002*

Nella società moderna l'energia è uno dei parametri essenziali per garantire un buon livello di vita della popolazione



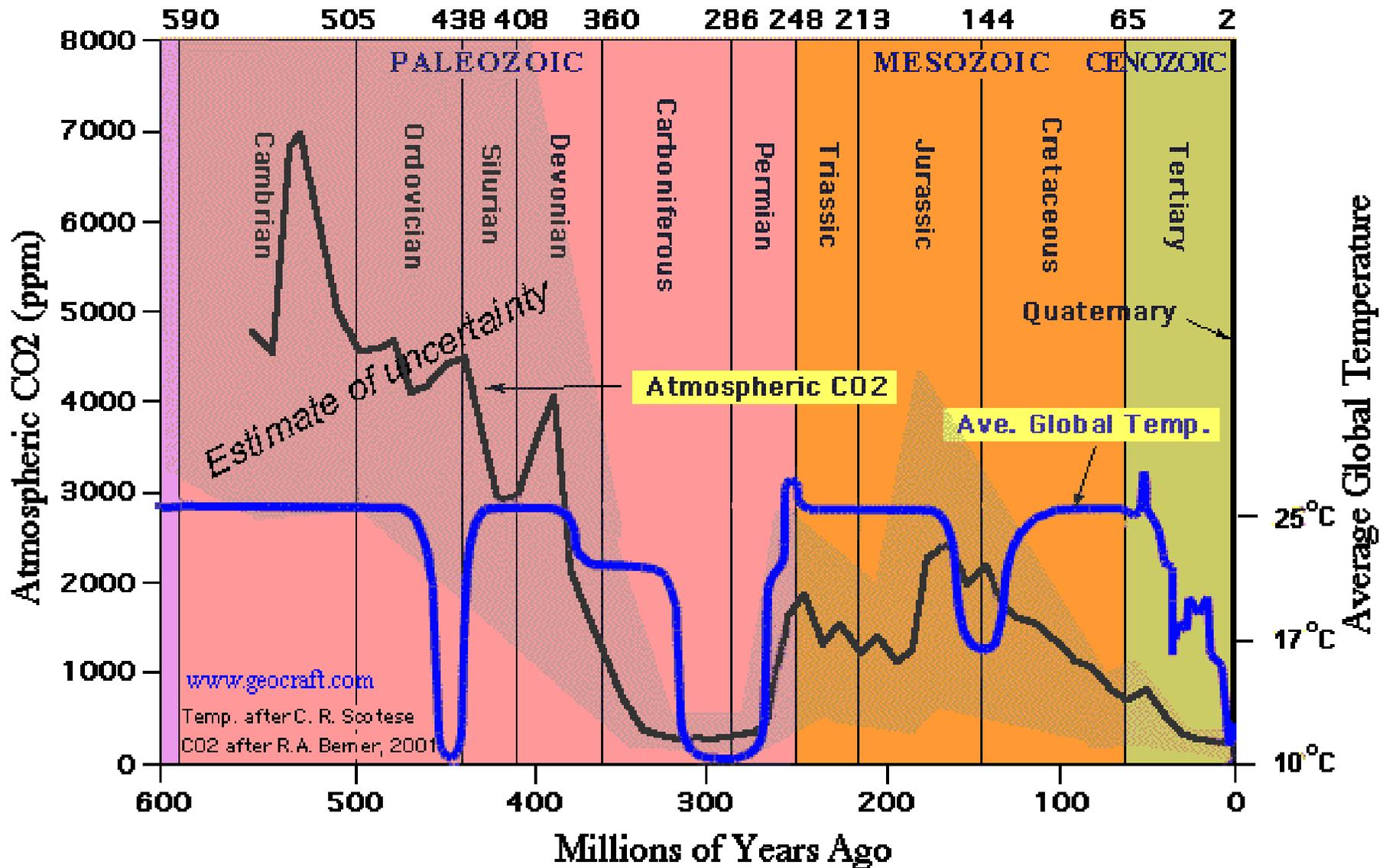
L'energia è una grandezza fisica NON un oggetto materiale

Quando si parla di energia si deve farlo con conoscenza dei fatti e non con il "senso comune".

Esempio 1: i mezzi di (dis)informazione hanno recentemente informato il pubblico che il contenuto di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera è il più ALTO degli ultimi 800.000 anni. Questa è chiara disinformazione e ignoranza.

Si sottintende che le attività umane hanno fatto aumentare il livello di CO<sub>2</sub> ma 800.000 anni fa gli uomini praticamente non esistevano e il livello di CO<sub>2</sub> era più alto o almeno è il significato della frase. Questa è ignoranza perché non si considerano molte altre sorgenti di CO<sub>2</sub>.

American Journal of Science, Vol. 301, February, 2001, P. 182–204, ROBERT A. BERNER and ZAVARETH KOTHAVALA



L'atmosfera terrestre oggi contiene circa 380 ppm di CO<sub>2</sub> (0.038%).

In confronto con le ere geologiche precedenti (fino a 600 milioni di anni) l'atmosfera presente è impoverita di CO<sub>2</sub> come il tardo Carbonifero.

Nella storia degli ultimi 600 milioni di anni solo il periodo Carbonifero e il Quaternario hanno un livello di CO<sub>2</sub> minore di 400 ppm.

Il ruolo della CO<sub>2</sub> nel clima ed effetti connessi è molto complesso e ancora largamente da conoscere.

What will our climate be like in the future? That is the question scientists are asking and seeking answers to currently. The causes of "global warming" and climate change are today being popularly described in terms of human activities. However, climate change is something that happens constantly on its own. If humans are in fact altering Earth's climate with our cars, electrical powerplants, and factories these changes must be larger than the natural climate variability in order to be measurable. So far the signal of a discernible human contribution to global climate change has not emerged from this natural variability or *background noise*.

L'impatto delle attività umane (contributo antropico) sull'*equilibrio* del sistema terrestre al momento è sostanzialmente ignoto.

Esempio: qual è il contributo della respirazione umana alla produzione di CO<sub>2</sub>? Sapendo che ci sono 7 miliardi di persone che respirano 24 ore su 24 e che ognuno consuma circa 2000 Kcal/giorno si può facilmente stimare che gli esseri umani producono circa 2 miliardi di tonnellate di CO<sub>2</sub>/anno.

Tutti gli essere viventi a CO<sub>2</sub>, 200 miliardi!

Le attività umane artificiali circa 8 miliardi

Dati da Physics Today, aprile 2002

## L'energia è una grandezza fisica non un oggetto materiale

Esempio 2: qualche tempo fa si è (dis)informato il pubblico che era stata realizzata un'auto ad aria compressa NON inquinante. Anche questa è chiara disinformazione e ignoranza. Primo, dispositivi di questo tipo sono in uso da decenni in ambienti dove altri motori sono pericolosi. Inoltre, L'aria compressa va prodotta e il processo non è gratuito: l'energia recuperata dall'aria compressa è minore di quella necessaria a comprimerla. Il motore ad aria compressa non è efficiente e quindi ci sono altre perdite. L'aria compressa è contenuta in pesanti contenitori che vanno trasportati con conseguente ulteriore costo energetico.

## L'energia è una grandezza fisica non un oggetto materiale

Esempio 3: i mezzi di (dis)informazione hanno recentemente informato il pubblico che in California si stanno introducendo distributori di idrogeno e quindi nel futuro ci saranno molte auto a EMISSIONI ZERO. Di nuovo chiara disinformazione e ignoranza. In questo modo si SOTTOINTENDE che così si riduce l'impatto ambientale delle auto. Ogni processo ha un impatto ambientale che va visto in modo globale, quello che si salva in un campo potrebbe essere molto più importante in un altro. L'idrogeno va prodotto con un alto costo energetico e va contenuto in pesanti contenitori. L'idrogeno è un gas pericoloso perché esplosivo.

L'energia è una grandezza fisica non un oggetto materiale

Formalmente l'energia è una **COMBINAZIONE** di grandezze che ha la caratteristica di **CONSERVARSI** globalmente nelle trasformazioni naturali.

Questo concetto, di grande importanza scientifica, discende da due teoremi legati all'uso moderno della *matematica* in fisica (i due sono solo *quasi* equivalenti):

*Il teorema degli integrali primi delle equazioni differenziali*

*Il teorema di Noether*

Teorema degli integrali primi:

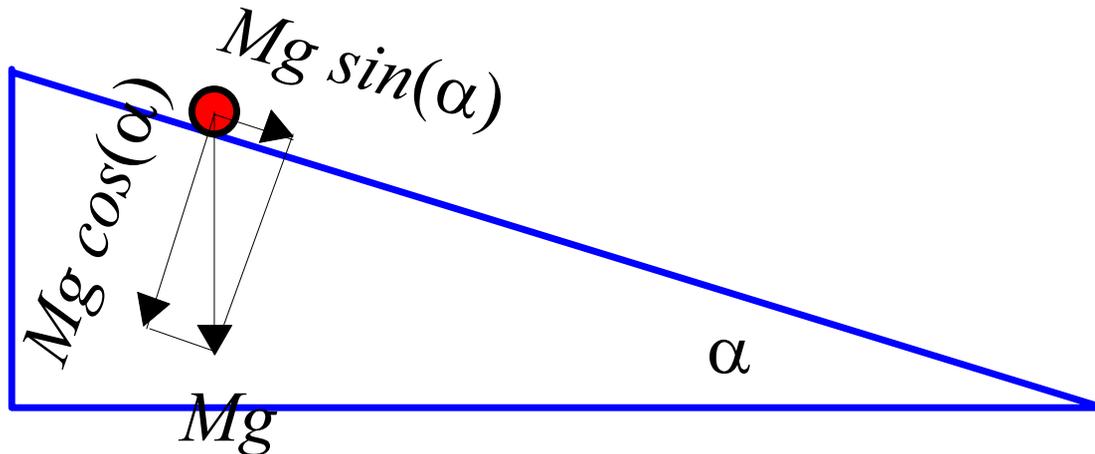
A un'equazione differenziale si può associare un'altra equazione (differenziale) di ordine più basso la cui soluzione è una funzione che si "CONSERVA" (costante) in corrispondenza della soluzione dell'equazione iniziale.

Teorema di Noether:

Se l'equazione che governa un processo fisico ha una simmetria (assenza di cambiamento per cambiamento di qualche variabile), allora a questa corrisponde una grandezza (fisica) che si CONSERVA

L'energia e le regole di conservazione non hanno aspetti misteriosi. La conservazione è evidente nella caduta dei gravi. L'eventuale presenza dell'attrito introduce le trasformazioni irreversibili che poi si incontrano quando si incontrano altre forme di energia, quella termica in particolare.

In assenza di attrito il moto sul piano inclinato è utile a introdurre l'energia *meccanica*.



La forza gravitazionale è conservativa (conserva l'energia), infatti esiste una funzione  $V(x)$  tale che:

$$F = -\frac{dV}{dx} \qquad V = -Mg \sin(\alpha)x$$

$$F_x = Mg \sin(\alpha)$$

$$v = g \sin(\alpha) t \qquad x = \frac{1}{2} Mg \sin(\alpha) t^2$$

$$T = \frac{1}{2} Mv^2 \qquad T = -V$$

In questo fenomeno la conservazione dell'energia appare come un fatto automatico e matematico (teorema degli integrali primi): l'introduzione dell'energia potenziale è utile nella descrizione delle forze (conservative) e appare nella conservazione.

È opportuno notare che la conservazione dell'energia si scrive anche come:

$$\Delta T = -\Delta V$$

Dove  $\Delta T$  è la variazione di energia cinetica e  $\Delta V$  è la variazione di energia potenziale su un certo percorso.

Conviene introdurre  $-\Delta V$  come lavoro  $L$  effettuato lungo il percorso.

$$L = \int_S (F_x dx + F_y dy + F_z dz)$$

Si ha quindi la conseguenza:

Per far variare l'energia cinetica di un corpo la **forza deve compiere un lavoro**

Quando sono presenti processi dissipativi (sempre presenti), parte del lavoro non si trasforma in energia cinetica ma si "perde".

A quanto detto si aggiungono il primo (conservazione dell'energia generalizzata) E IL secondo principio della termodinamica (in realtà un teorema per i sistemi macroscopici):

Non è possibile - *nemmeno in linea di principio* - realizzare una macchina (termica) il cui rendimento sia pari al 100%.

Sottoprodotto: esiste la *freccia del tempo*, l'entropia (in un sistema isolato) non decresce.

Infine

Non è possibile - *nemmeno in linea di principio* - realizzare una macchina di qualunque natura che **NON** abbia sottoprodotti.

$$dU = dQ - PdV = TdS - PdV$$

$$\eta < \frac{T_2 - T_1}{T_2}$$

La prima equazione (dimostrabile nella formulazione matematica della fisica e non empirica) descrive la conservazione dell'energia in generale, la seconda ci dice che in ogni processo di trasformazione ci sono due temperature (o equivalente) ed il rendimento energetico è minore SEMPRE di un rapporto definitivamente minore dell'unità

Nel mondo moderno l'energia è un elemento essenziale per un enorme numero di funzioni essenziali:

Energia elettrica nelle abitazioni

Energia per il condizionamento degli edifici

Energia trasportabile per i trasporti (automezzi, navi, aerei, anche biciclette, anche esseri viventi)

Energia per le macchine da costruzione

Energia elettrica per le comunicazioni

Energia elettrica per l'illuminazione

Ognuna di queste si utilizza con molte perdite intrinseche



L'acqua è stata usata nel passato come forma di energia anche quando questo concetto non era stato definito



La rivoluzione industriale del XIX secolo ha cambiato il modo di vivere degli uomini.

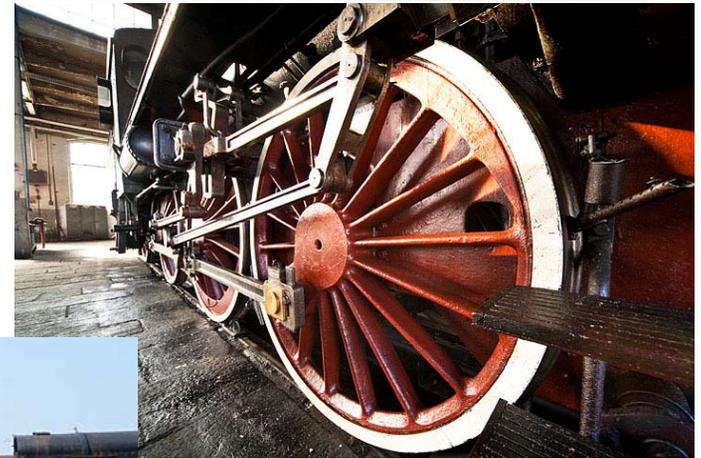
La prima fonte di energia usata dall'uomo diversa dalla forza fisica e da semplici applicazioni dell'**acqua** è il **vapore**.

Il vapore viene prima usato per i mezzi di trasporto e per alcune macchine. Il carbone viene anche usato per il gas illuminante





La macchina a vapore si è evoluta moltissimo per oltre un secolo. È stata poi sostituita da mezzi a trazione elettrica molto più flessibile. Prima metà del XX secolo.





L'evoluzione del treno è stata lunga e complessa. Il treno ha un impianto fisso di minore impatto delle strade per persone e automezzi

L'evoluzione finale sembra andare verso velocità sempre più alte ma il costo energetico è alto. La locomotiva GR691 aveva 1357 kW e 130 km/h, l'elettrotreno ETR500 ha 2x4400 kW e 300 km/h



Per migliorare le prestazioni in curva si usa l'assetto variabile



I trasporti si effettuano su strada, via mare e via aria. Il trasporto su strada ha un grande impatto con le strade, i motori sono inefficienti ma offre una grande semplicità. Il trasporto via mare è il più efficiente ed usa grandi concentrazioni di energia. L'impatto è basso ma il trasporto è lento e adatto solo per merci non deteriorabili. Il trasporto via aria ha un impatto elevato ed un grande costo energetico, il suo "vantaggio" è la velocità alta.

Per le varie applicazioni è necessario utilizzare anche motori di grandi dimensioni.



Le turbine sono i motori a combustibili fossili più efficienti mai costruiti. Sono utili per la produzione di energia elettrica.





I motori aeronautici devono essere costruiti di materiali leggeri e devono avere un'alta affidabilità





L'energia nucleare è molto efficiente in alcune applicazioni per la propulsione navale

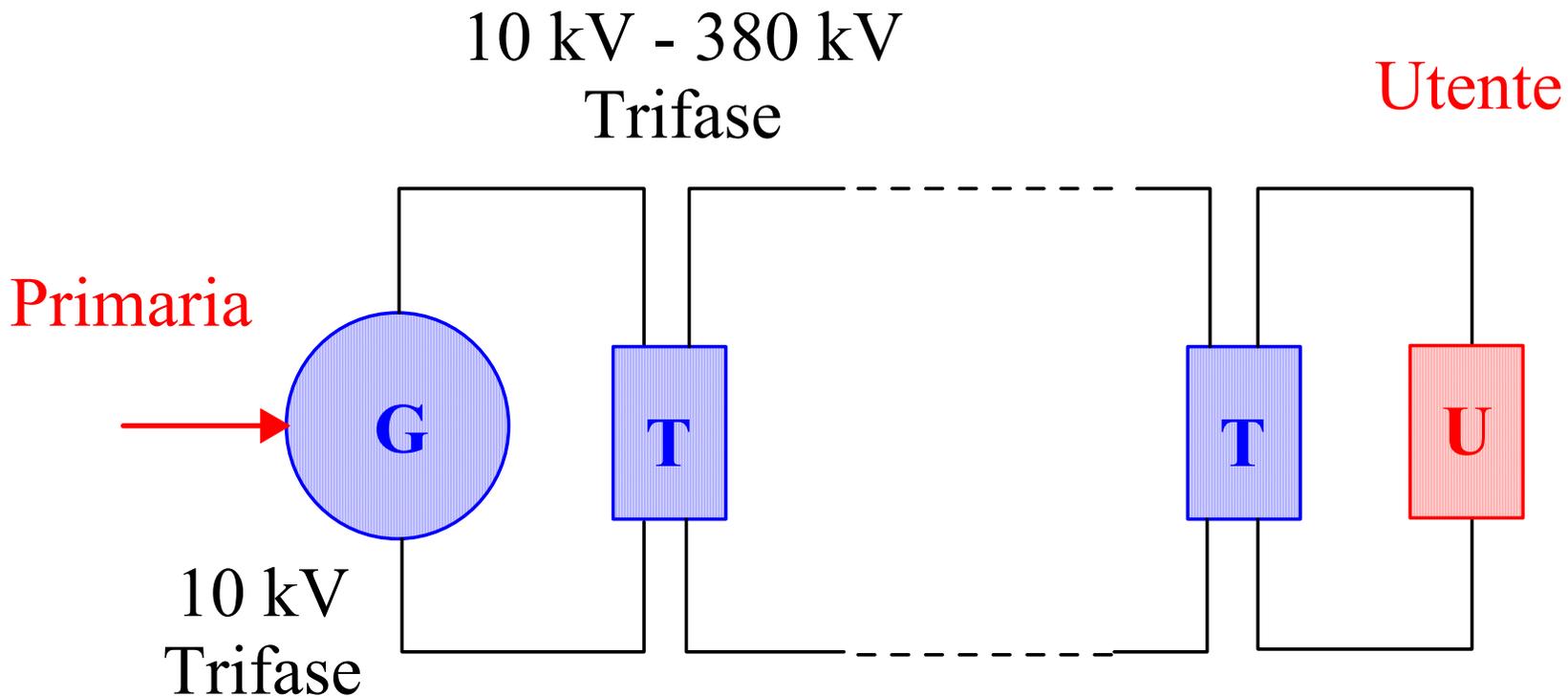


Dopo il carbone è apparsa l'energia elettrica (fine XIX secolo) che ha infinite applicazioni.

L'energia elettrica viene prima prodotta con semplici macchine a vapore o con l'energia dell'acqua.

Nel XX secolo appare il petrolio, cioè l'olio che sgorga **spontaneamente** (come l'acqua) dalla pietra.

Il petrolio apre nuove e inaspettate prospettive. La gran parte delle attività umane dipende direttamente o indirettamente dalla disponibilità di questa semplice fonte di energia.



Il sistema di trasmissione dell'energia elettrica.  
 Descrizione semplificata

380 kV - 20 kV  
 Trifase  
 20 kV - 380 V  
 Trifase  
 380 V - 220 V  
 Trifase - Monofase



È sempre necessaria una fonte *primaria*. Dalla fonte primaria (*carbone, gas, idrocarburi, idrica*) si può produrre energia elettrica a media tensione (esempio 10 kV trifase) con rendimento variabile, non superiore al 60-70%, poi si alza la tensione (esempio 380 kV trifase) e il trasporto si effettua con rendimento fino al 90-95%, poi si abbassa ai valori dell'utente finale (numero di fasi dipendente dall'uso). L'elettricità usata nella distribuzione è praticamente sempre *alternata*.

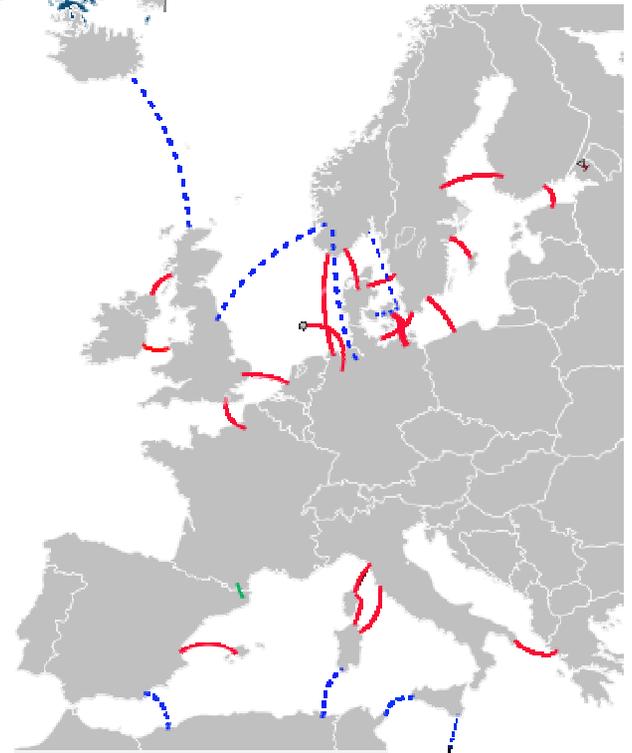
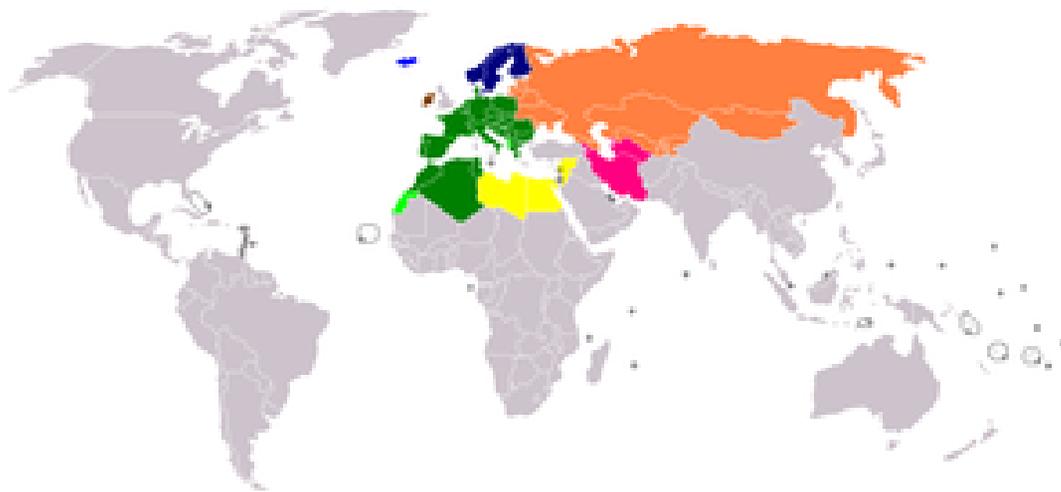
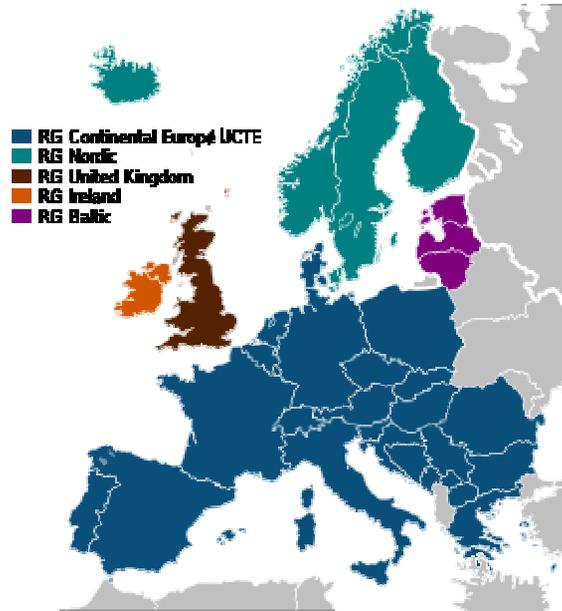
Se l'energia primaria è a bassa densità come l'energia solare o l'energia del vento la produzione avviene a tensione variabile, in quantità variabile e in corrente continua nel caso del solare o a frequenza variabile nel caso del vento. È quindi necessario installare dei circuiti elettronici (*inverter*) che provvedono alla trasformazione in forma utilizzabile. Queste energie a bassa densità si possono immettere nelle reti fino a che il loro contributo è trascurabile.

In ogni caso è quasi sempre essenziale avere dei sistemi di *stoccaggio* (batterie) e la relativa elettronica di controllo.

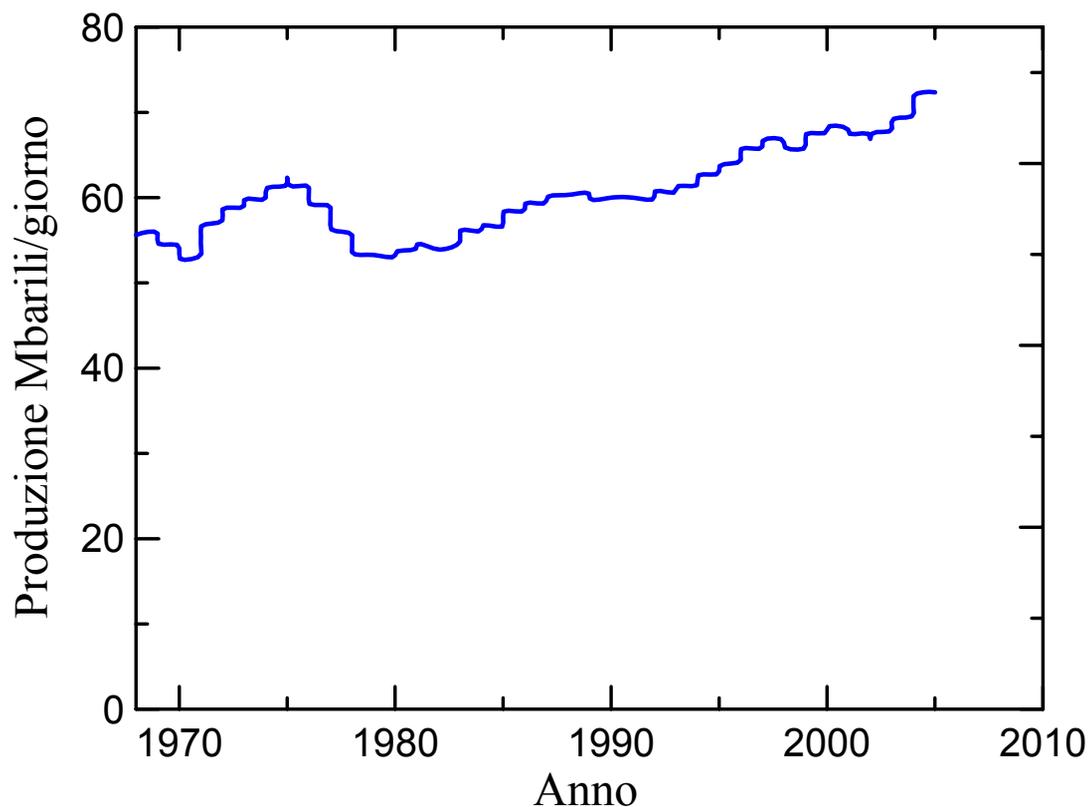
È importante ricordare che la rete elettrica è un sistema complesso in quanto occorre *molto tempo* (*ore*) sia per l'avvio che per la sospensione dell'erogazione dell'energia da parte dei sistemi di generazione quindi è necessario avere degli appropriati sistemi di distribuzione in grado di fronteggiare sia gli aumenti che le diminuzioni dell'utenza.

Il sistema è estremamente *FRAGILE* e quindi può essere soggetto a fenomeni *CATASTROFICI*, cioè un piccolo incidente può risolversi in una vasta interruzione.

I sistemi di distribuzione devono essere integrati a livello *continentale* per quanto possibile.



La futura durata del petrolio non è nota e poco si può speculare in merito. Le riserve non facilmente sfruttabili sono molto estese, quelle note e facilmente sfruttabili danno alcuni decenni di autonomia ma sono poco sfruttate con i mezzi attualmente impiegati. Il problema è complesso ma **non** può essere ignorato.



Produzione di petrolio,  
dati DoE

I combustibili fossili, petrolio, carbone, gas naturale (mistura di vari gas, prevalentemente metano e idrogeno), hanno svariati problemi anche se il loro contenuto energetico è alto.

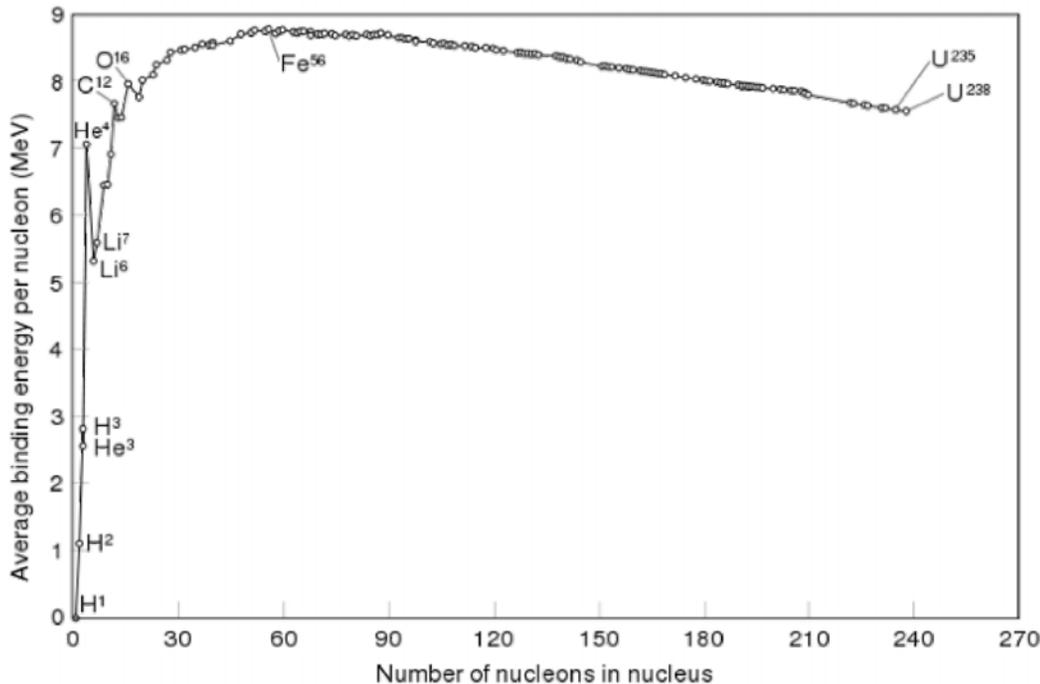
La loro combustione produce anidride carbonica, acqua e altro, che vengono immessi nell'atmosfera.

Gli effetti dannosi non sono immediatamente evidenti ma i mezzi di informazione hanno la certezza che il problema principale sia l'effetto serra (nome ad effetto ma una serra funziona in modo diverso dall'atmosfera del pianeta).

L'atmosfera è un sistema complesso: le attività umane producono circa 8 miliardi di tonnellate l'anno di  $\text{CO}_2$  (ma anche molto altro), gli Uomini 2 miliardi con il loro respiro, l'insieme degli esseri viventi 200 miliardi...

## L'energia nucleare (non rinnovabile).

Questa può essere prodotta da due fonti, fissione e fusione (esaminare le due reazioni (fusione e fissione) partendo dall'andamento dell'energia di legame dei nuclei con il numero di massa).



L'energia nucleare ha molti problemi legati alla disponibilità del combustibile e lo smaltimento dei prodotti di scarto.



Vasca del combustibile dopo l'uso. È necessario un continuo raffreddamento, conservando il combustibile in condizioni che non consentano la fissione in modo apprezzabile.



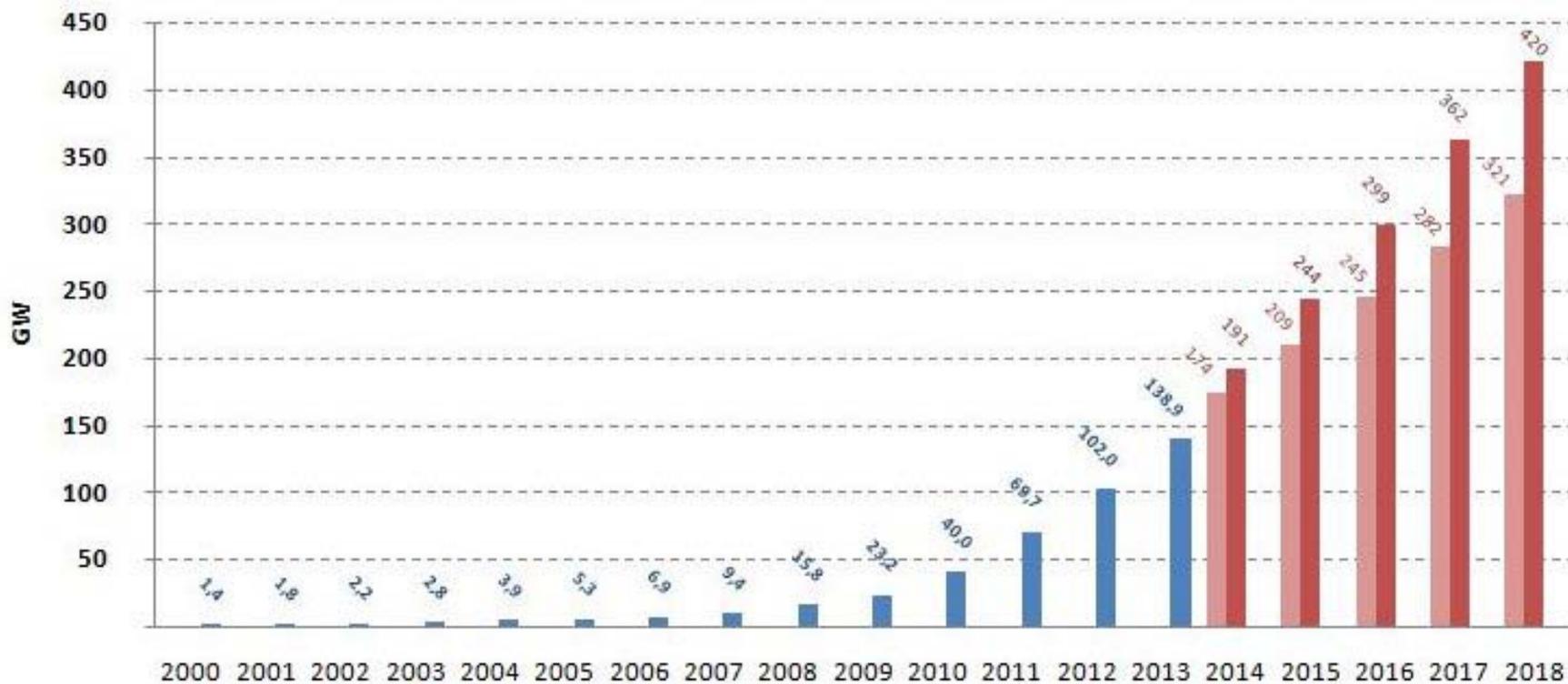
Combustibile esausto in attesa di rimozione.

## Quali alternative?

Le alternative sono di due tipi: quelle sensate e quelle insensate, le ultime prevalgono. Su tutto prevale l'interesse economico.

L'idrogeno: non è un combustibile disponibile, per produrlo è necessario usare una quantità di energia superiore a quella che poi può essere sfruttata. Può essere sfruttato direttamente nei motori a combustione interna ma a temperatura più alta (maggiore del ciclo diesel già alta). Sottoprodotti? Trasporto? È estremamente pericoloso. Può essere usato nelle "celle a combustibile". Sono poco affidabili, composte di materiali dannosi, grandi problemi di smaltimento.

L'impatto complessivo potrebbe essere molto superiore all'uso diretto dei combustibili fossili.

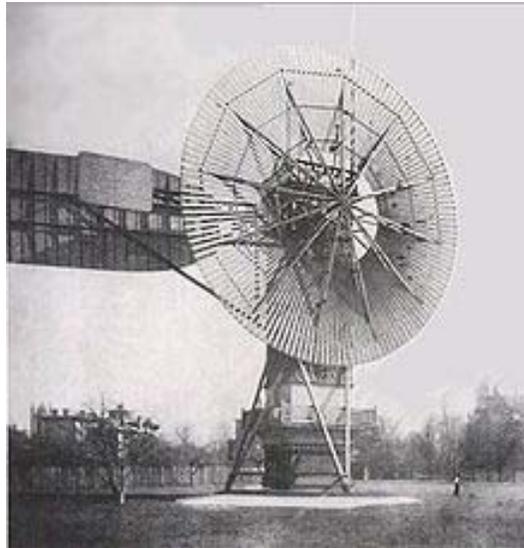


Produzione mondiale di energia dal fotovoltaico. Il fabbisogno italiano di energia elettrica è attualmente di oltre 70 GW anche se il fabbisogno medio è circa la metà

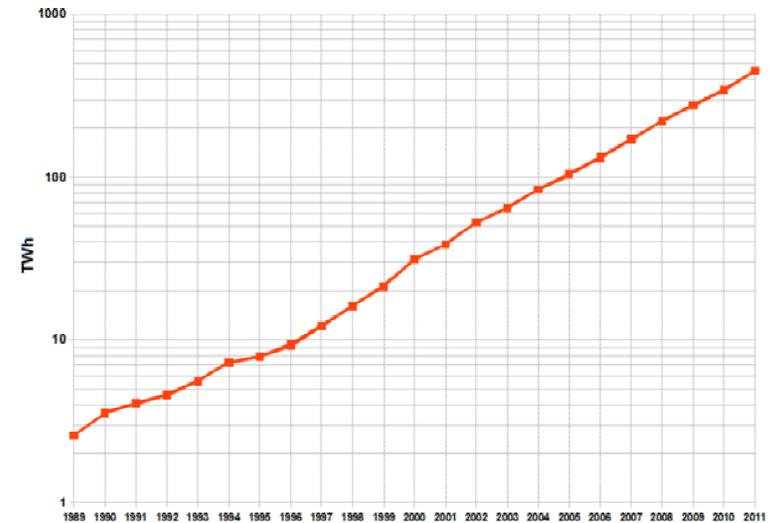
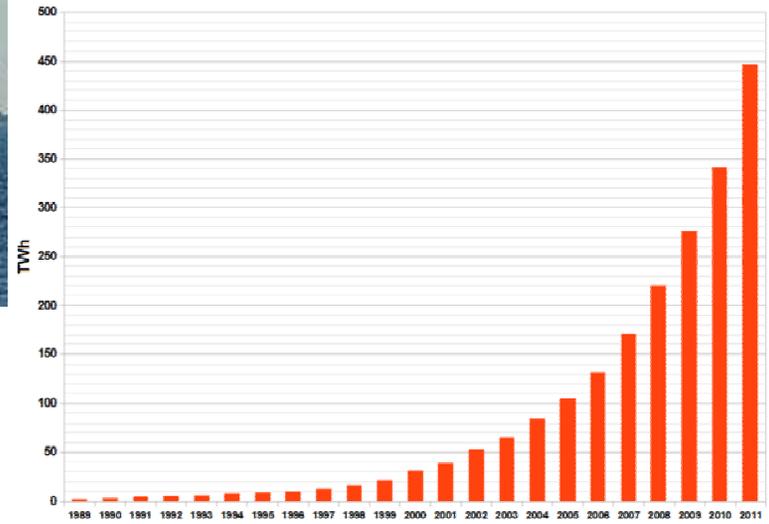


L'energia del vento può essere efficiente in alcuni luoghi

Il vento viene impiegato da lungo tempo. Un mulino a vento nel 1888



Worldwide Electricity Generation from Wind





Il problema principale di ogni forma di energia è la difficoltà di "immagazzinarla". Un sistema sono le stazioni di pompaggio. L'acqua è un esempio come quello alle cascate del Niagara

L'energia solare è l'unica energia disponibile in aggiunta a quelle già disponibile sulla Terra.

Non è facilmente convertibile in altre ad alta densità. Le piante la trasformano in glucosio ma il processo non è facilmente utilizzabile per usi intensivi.

I sistemi fotovoltaici trasformano l'energia della radiazione in energia elettrica ma a *rendimento* molto basso. Vi sono molti problemi legati alla produzione delle celle fotovoltaiche, al loro smaltimento a fine vita, ai sistemi di conversione in forma utilizzabile (da cc variabile a ca o cc in forma costante), all'immagazzinamento e alla bassa densità di energia disponibile.