

Beni comuni

*Si definisce bene comune un bene **non escludibile**: nessun individuo può essere escluso dall'utilizzo del bene*

*Il problema è la **sottraibilità**: l'utilizzo del bene da parte di un individuo diminuisce le possibilità di utilizzo da parte di altri individui*

I combustibili fossili sono beni comuni

Tragedia dei commons

L'utilizzo di beni comuni da parte di una comunità impone forme di gestione per evitare la "Tragedia dei commons"



Garrett Hardin, 1968. *The Tragedy of the Commons*, Science 162, 1243-1248.

Garrett Hardin, 1998. *Extensions of "The Tragedy of the Commons"*, Science 280, 682-683.

Beni pubblici

non escludibili: nessun individuo può essere escluso dall'utilizzo del bene
non sottraibili: l'utilizzo del bene da parte di un individuo non diminuisce le possibilità di utilizzo da parte di altri individui

= beni comuni non sottraibili

*Utilizzo di fonti rinnovabili di energia:
passaggio dall'utilizzo di un BENE COMUNE (Combustibile fossile)
all'utilizzo di un BENE PUBBLICO (es. vento)*

Etimologia

Capacità di compiere lavoro

*Dal greco: en (dentro)
 érgon (lavoro)*

Come si accumula la capacità di compiere lavoro?

Solo se esiste una forza conservativa e viene fatto del lavoro contro questa forza viene accumulata energia:

$$E_{\text{potenziale}} = \int_C \overline{F} \cdot \overline{dr}$$

Un corpo che possiede energia potenziale e viene lasciato libero di muoversi trasformerà l'energia potenziale in movimento (energia cinetica).

Analogamente, un corpo che possiede energia cinetica può trasformarla in energia potenziale se entra in un campo di forze conservative.

Unità di misura

Joule (J)

1 J corrisponde all'incirca all'energia che serve a sollevare di 10 cm una bottiglia d'acqua da un litro.

Unità di misura

Energia:

unità S.I.:

J (Joule)

caloria:

cal (caloria) = 4.186 J

energia elettrica: Wh (Wattora) = 3600 J

kWh (kiloWattora) = 1000 Wh

(consumo domestico giornaliero: 10÷15 kWh)

TWh (TeraWattora) = 10^{12} Wh

(produzione annua centrale: 5÷8 TWh)

consumi totali: tep (tonnellata equivalente di petrolio) = 10^7 kcal

= 4.2×10^{10} J

= 1.16×10^{-2} GWh

in inglese: toe
(tonne of oil equivalent)

Mtep (Milione tep) = 10^6 tep

(consumi totali Italia: ≈ 188 Mtep/y)

consumo cibo:

$2000 \text{ kcal/d} = 7.3 \times 10^5 \text{ kcal/y} = 3 \times 10^9 \text{ J/y} = 0.07$

tep/y

Potenza:

unità S.I.:

W (Watt) = 1 J/s

GW (GigaWatt) = 10^9 W (= potenza centrale)

sole:

1.7×10^{17} W = 1.7×10^8 GW

geotermica:

4.5×10^{13} W = 4.5×10^4 GW

gravitazionale:

3×10^{12} W = 3×10^3 GW

Richiami di termodinamica

Primo principio della termodinamica

$$\Delta U = U_2 - U_1 = Q - W$$

U_1 = energia interna prima della trasformazione

U_2 = energia interna dopo la trasformazione

Q = calore: $Q > 0$ quando è assorbito dal sistema

W = lavoro meccanico: $W > 0$ quando è prodotto dal sistema

Secondo principio della termodinamica

In un sistema chiuso:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right)$$

S_1 = entropia prima della trasformazione

S_2 = entropia dopo la trasformazione

δQ = scambio di calore

T = temperatura

Richiami di termodinamica

Conseguenze del secondo principio della termodinamica

- in qualsiasi processo o attività c'è la tendenza alla perdita (o dissipazione) di energia utile o lavoro
- il calore fluisce naturalmente da sistemi più caldi a sistemi più freddi e non è possibile trasferire calore da un corpo freddo a un corpo caldo senza convertire un certo ammontare di energia in calore
- non è possibile per un sistema che compie un ciclo trasformare completamente calore in lavoro ma solo produrre lavoro trasferendo calore da una sorgente calda a una sorgente fredda

In pratica, questo significa che nessuna macchina può essere efficiente al 100%:

$$\eta = \frac{W}{Q_{in}} < 1$$

η = efficienza

W = lavoro prodotto

Q_{in} = calore assorbito

L'energia contenuta in un sistema può essere vista come la somma di un'energia "utile" e di un'energia "inutile".

Forze fondamentali della natura

- *Gravitazionale*
- *Elettromagnetica*
- *Nucleare debole*
- *Nucleare forte*

L'esistenza di queste forze determina i tipi di energia disponibili.

In altri termini, se non ci fossero forze non ci sarebbe energia potenziale e quindi neanche energia cinetica (ma, d'altra parte, non esisteremmo nemmeno noi a parlare di tutto questo).

Tipi di energia

- *Energia potenziale gravitazionale*
 - *energia di legame tra oggetti massivi*
- *Energia chimica (elettromagnetica)*
 - *energia di legame degli elettroni che ruotano attorno ai nuclei*
- *Energia nucleare*
 - *energia di legame dei costituenti del nucleo*

Inoltre gli oggetti materiali possono possedere:

- *Energia cinetica*
- *Energia termica*
 - *energia cinetica dei costituenti la materia*
- *Massa*

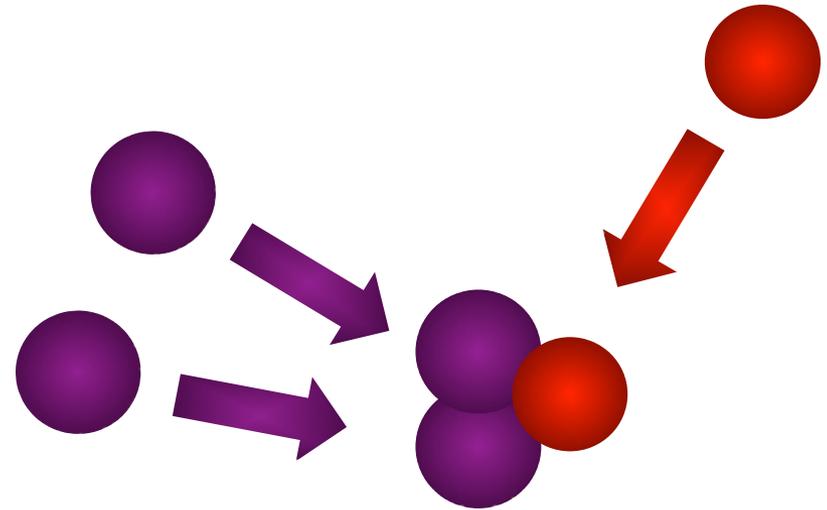
Energia potenziale gravitazionale

Rispetto alla superficie terrestre:

	Massa (kg)	Altezza (m)	$E_{\text{potenziale}}$ (J)
Palla	0,1	10	9,8
Aereo	400.000	10.000	$3,9 \times 10^{10}$
Space Shuttle	70.000	300.000	$2,1 \times 10^{11}$
Bacino idroelettrico (1 milione di m ³ di acqua)	1.000.000.000	200	$2,0 \times 10^{12}$

Energia chimica

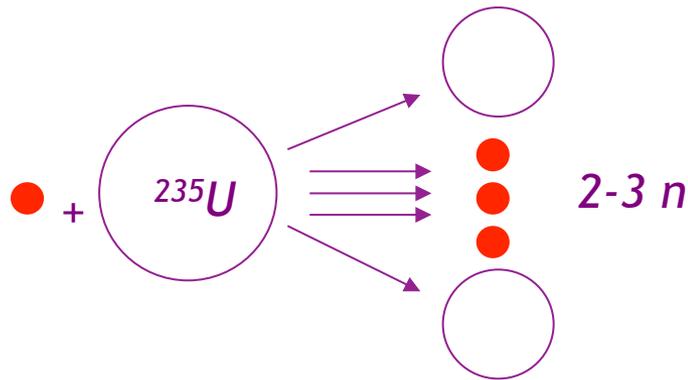
Quando un'elettrone dell'atomo passa da un certo livello di energia ad uno libero meno elevato (ad es. quando atomi formano molecole) viene emessa l'energia corrispondente alla differenza tra i livelli sotto forma di onde elettromagnetiche (visibili, se della lunghezza d'onda giusta).



Talvolta bisogna fornire energia al sistema per superare la **barriera di potenziale** che impedisce l'innesco del processo che produce energia (es.: accendere il gas).

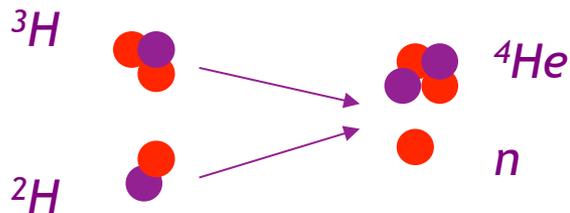
Energia nucleare

Fissione



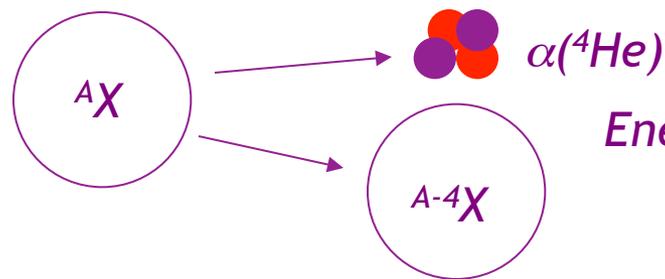
Energia cinetica dei prodotti di reazione: 195 MeV

Fusione



Energia cinetica dei prodotti di reazione: 17,6 MeV

Decadimenti radioattivi



Energia cinetica tipica della particella prodotta: 4 MeV

Energia cinetica

	Massa (kg)	Velocità (km/h)	E_{cinetica} (J)
<i>Uomo che cammina</i>	75	6	$1,0 \times 10^2$
<i>Uomo che corre</i>	75	45	$5,9 \times 10^3$
<i>Auto</i>	1.200	100	$4,6 \times 10^5$
<i>Camion</i>	10.000	100	$3,9 \times 10^6$
<i>Eurostar</i>	500.000	250	$1,2 \times 10^9$
<i>Aereo</i>	400.000	950	$1,4 \times 10^{10}$
<i>Space Shuttle</i>	70.000	28.000	$2,1 \times 10^{12}$

Energia termica

$$\left\langle \frac{1}{2} m v^2 \right\rangle = \frac{3}{2} k T$$

La temperatura di un oggetto è proporzionale all'energia cinetica media dei suoi costituenti

Massa

$$E = mc^2$$

Le trasformazioni di massa in energia ed energia in massa possono avvenire solo se nel processo vengono conservate le cariche

Energia da 1 kg di materia

<i>Tipo di energia</i>	<i>Tipo di materia</i>	<i>J/kg</i>
<i>Meccanica</i>	<i>1 kg di acqua che cade da un'altezza di 200 m</i>	$2,0 \times 10^3$
<i>Termica</i>	<i>1 kg di acqua a 100° che cede calore a un corpo a 20°</i>	$3,3 \times 10^5$
<i>Chimica</i>	<i>1 kg di metano</i>	$4,9 \times 10^7$
<i>Nucleare- radioattività</i>	<i>1kg di ^{238}U</i>	$1,6 \times 10^{12}$
<i>Nucleare- fissione</i>	<i>1kg di ^{235}U</i>	$8,0 \times 10^{13}$
<i>Nucleare - fusione</i>	<i>1kg di $^2\text{H}+^3\text{H}$</i>	$3,4 \times 10^{14}$
<i>Massa</i>	<i>Protone</i>	$9,0 \times 10^{16}$

Forme di energia

- *Materiali o fenomeni da cui si ricava energia* → *fonti energetiche*
- *Fonti energetiche:*
 - *Rinnovabili (sempre presenti)*
 - *Non rinnovabili (in quantità limitata)*

Energie rinnovabili

- *Meccanica (potenziale gravitazionale)*
 - *Bacini idroelettrici*
 - *Maree*
- *Nucleare da radioattività naturale*
 - *Geotermica*
- *Nucleare da fusione (solare)*
 - *(Bacini idroelettrici)*
 - *Luce diretta*
 - *Vento*
- *Nucleare da fusione*

Forme di energia

- *Primarie (se usate per il riscaldamento o i trasporti)*
 - *Combustibili fossili (petrolio, carbone, gas naturale)*
 - *Legna*
 - *Solare*
- *Secondarie (prodotte da altre forme di energia e poi utilizzate)*
 - *Energia elettrica*
 - *Idrogeno*

Solare

L'energia dal sole è quella rinnovabile per eccellenza:

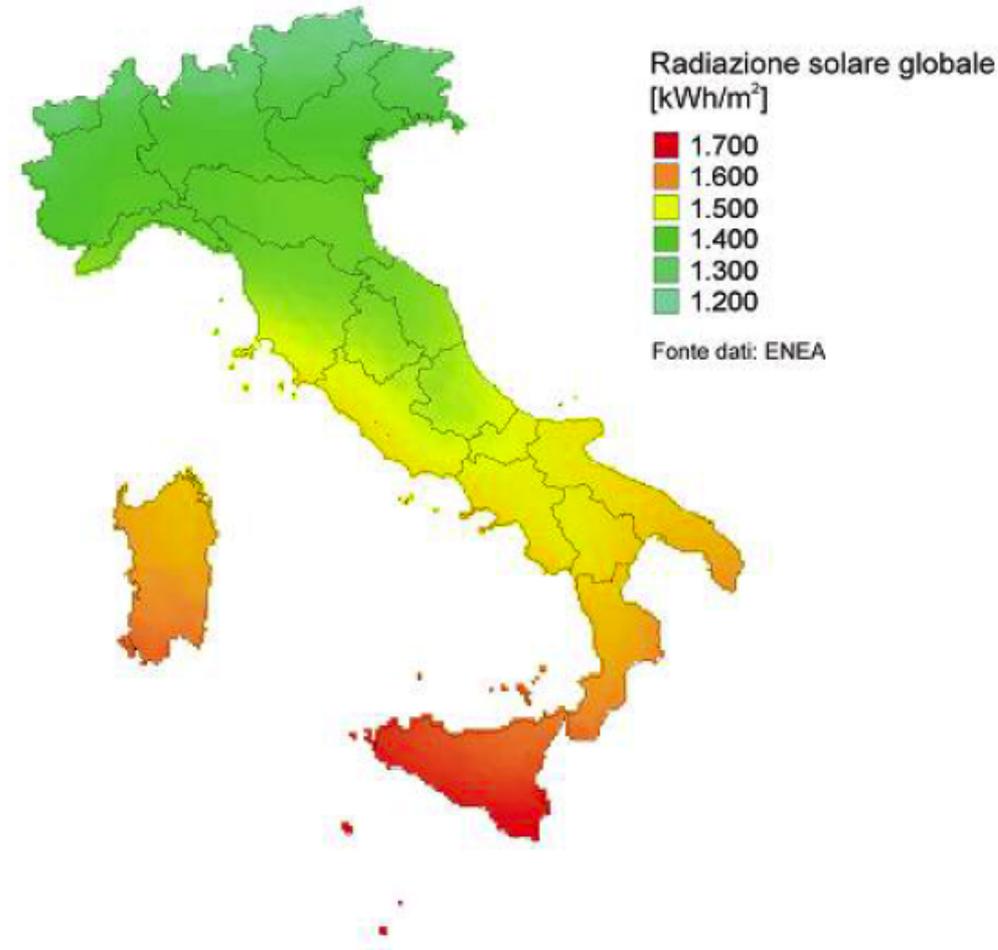
energia solare che arriva sulla terra

in 1 anno → 10^{24} J

energia consumata dall'umanità

in 1 anno → $2,7 \times 10^{20}$ J

Solare in Italia



Consumo energetico in Italia in un anno:

$1,8 \times 10^8$ tep (~3 tep/persona)

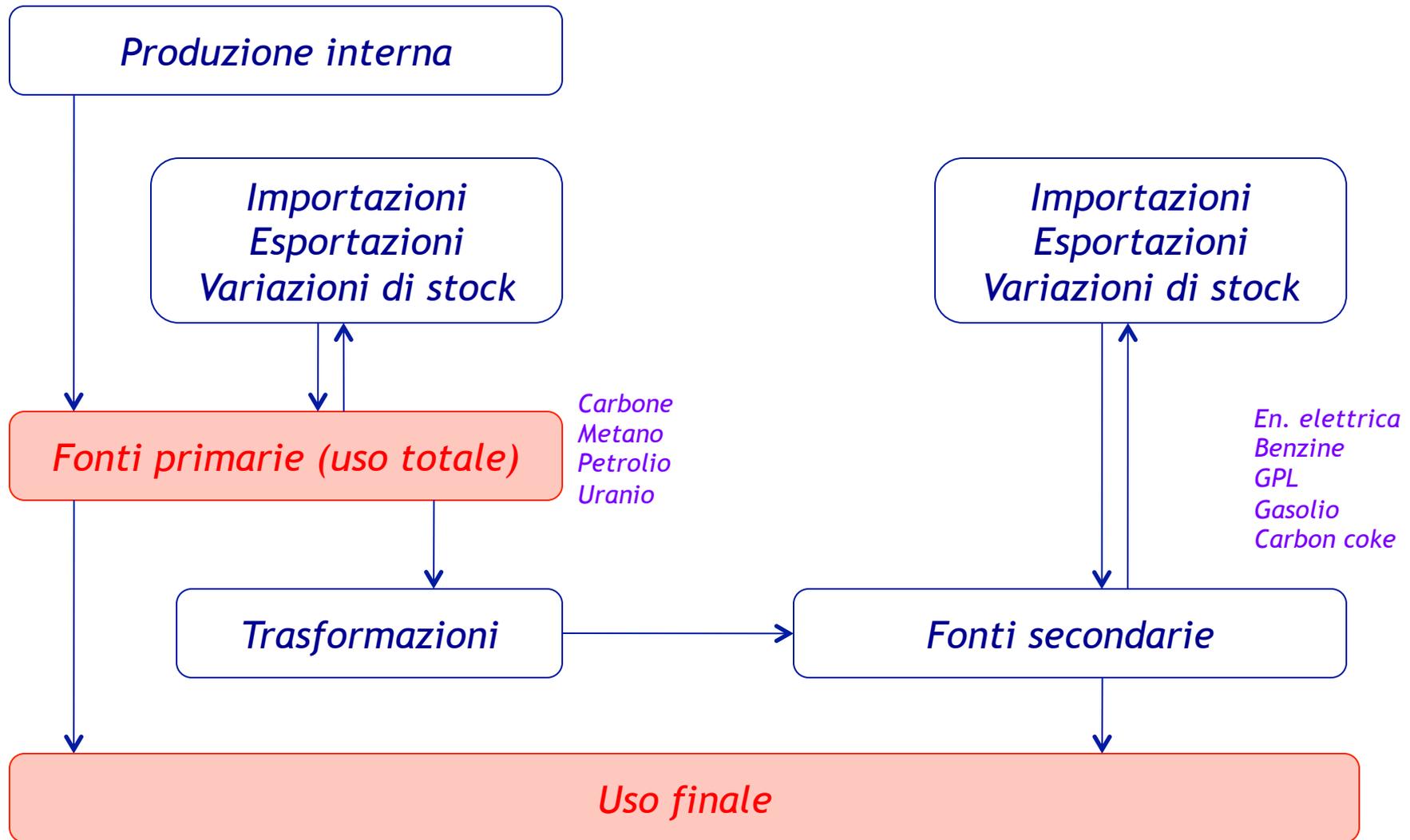
6×10^{18} J (1 tep= $4,3 \times 10^{10}$ J)

$2,2 \times 10^{11}$ kWh (1 tep= $1,2 \times 10^4$ kWh)

Con una media di 1,500 kWh/m² e un'efficienza di trasformazione tra energia luminosa ed energia elettrica del 7% questo corrisponde a:

$20,000$ km² (6% del territorio)

Terminologia



Problema: la misura dei flussi è possibile solo in presenza di un mercato (ad. es., parte dei biocombustibili è utilizzato per autoconsumo)

Come si produce l'energia

- *Le fonti primarie sono direttamente disponibili*
- *Le fonti secondarie sono prodotte dalle fonti primarie:*
 - *Es: energia elettrica da energia chimica (pile/combustibili) o energia nucleare*

Potere calorifico dei combustibili

Quantità di calore che si otterrebbe bruciandone completamente 1 kg oppure 1 m³.

Metano	34,5 MJ/m ³ 48.3 MJ/kg	8250 kcal/m ³ 11550 kcal/kg
Gasolio	42,7 MJ/kg	10200 kcal/kg
G.P.L.	46,0 MJ/kg	11000 kcal/kg
Legna	16,7 MJ/kg	4200 kcal/kg
Petrolio (kerosene)	43,1 MJ/kg	10300 kcal/kg
Carbone	31,4 MJ/kg	7500 kcal/kg

Nota: 1.4 m³ di metano a 0°C e 1 atm corrispondono ad 1 kg
-> (1000 g) / [(44.61 moli/m³) x (16 g/mole)].

Come si trasforma l'energia

- *Calore*
- *Movimento*
- *Energia elettrica*

N.B.: La trasformazione di energia in movimento nel mondo reale comporta un'inefficienza dovuta agli attriti, che rendono i processi irreversibili. In accordo con il secondo principio della termodinamica, vi è quindi un aumento di entropia dell'universo, sotto forma di calore non ritrasformabile in movimento.

Energia elettrica

Energia primaria



Calore

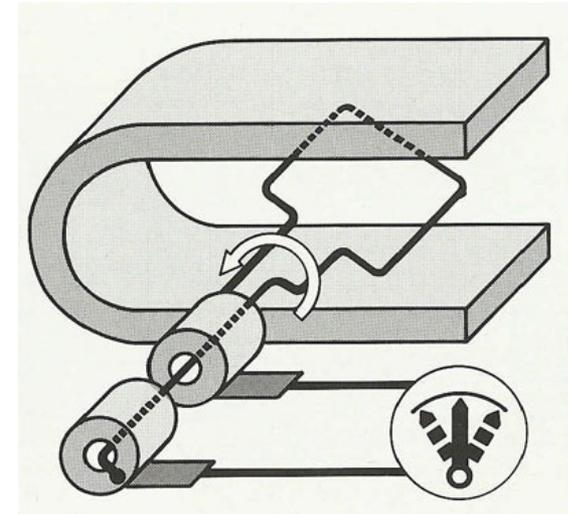


Movimento meccanico

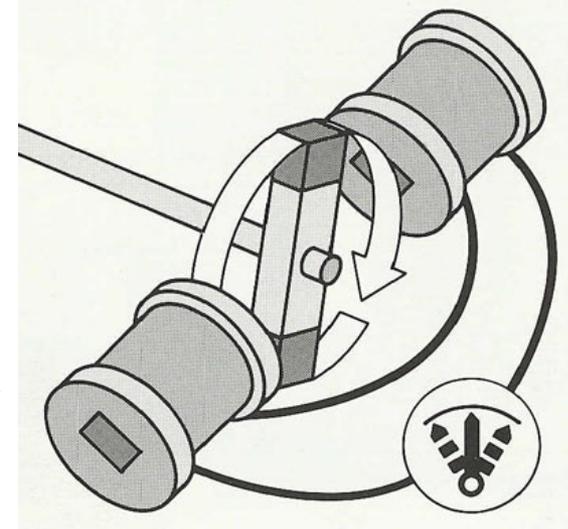


Energia elettrica

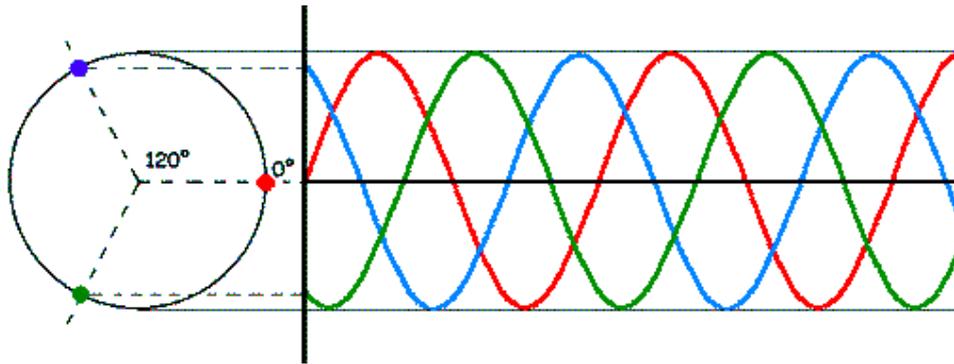
non sempre presenti



Generatori di corrente alternata



Generatori trifase

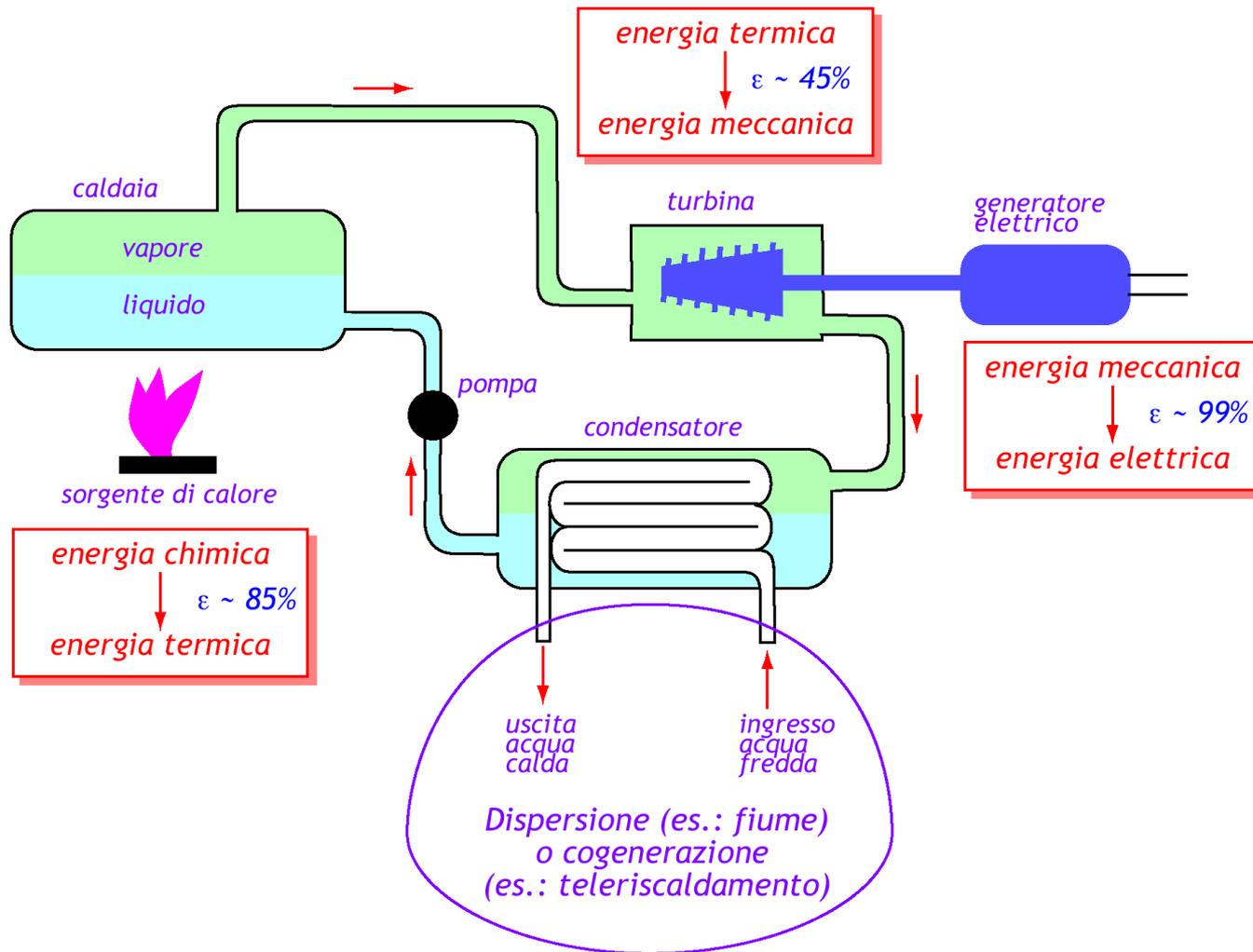


- non necessitano di filo di ritorno ($i_a+i_b+i_c=0$)
- la potenza trasmessa è costante ($P(t)=v_a(t)i_a(t)+v_b(t)i_b(t)+v_c(t)i_c(t)=3VI\cos 120^\circ$)

Quindi:

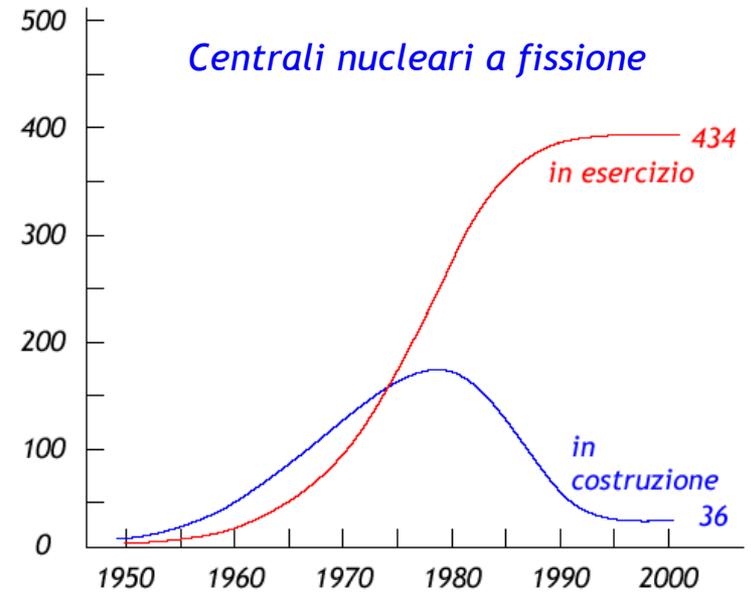
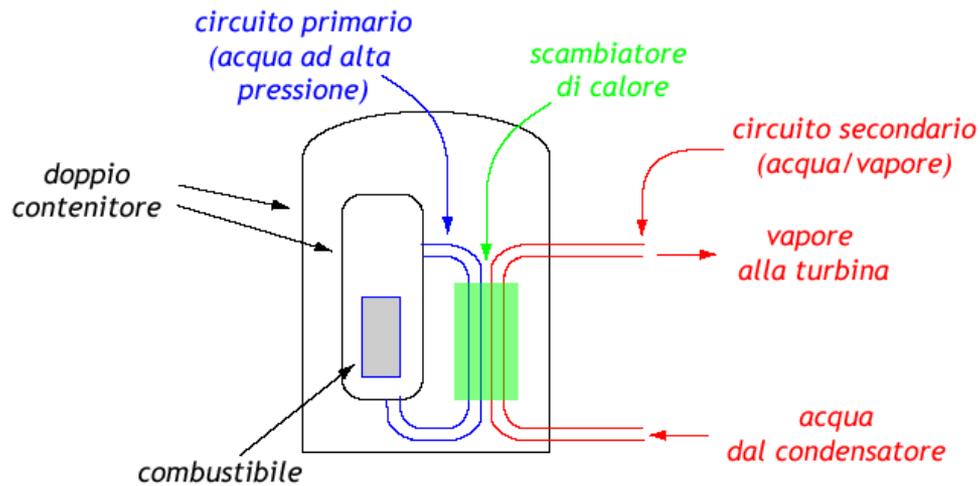
- peso e ingombro minore dei generatori e delle linee

Centrale termoelettrica



Centrali nucleari a fissione

PWD (Pressurized Water Reactor)



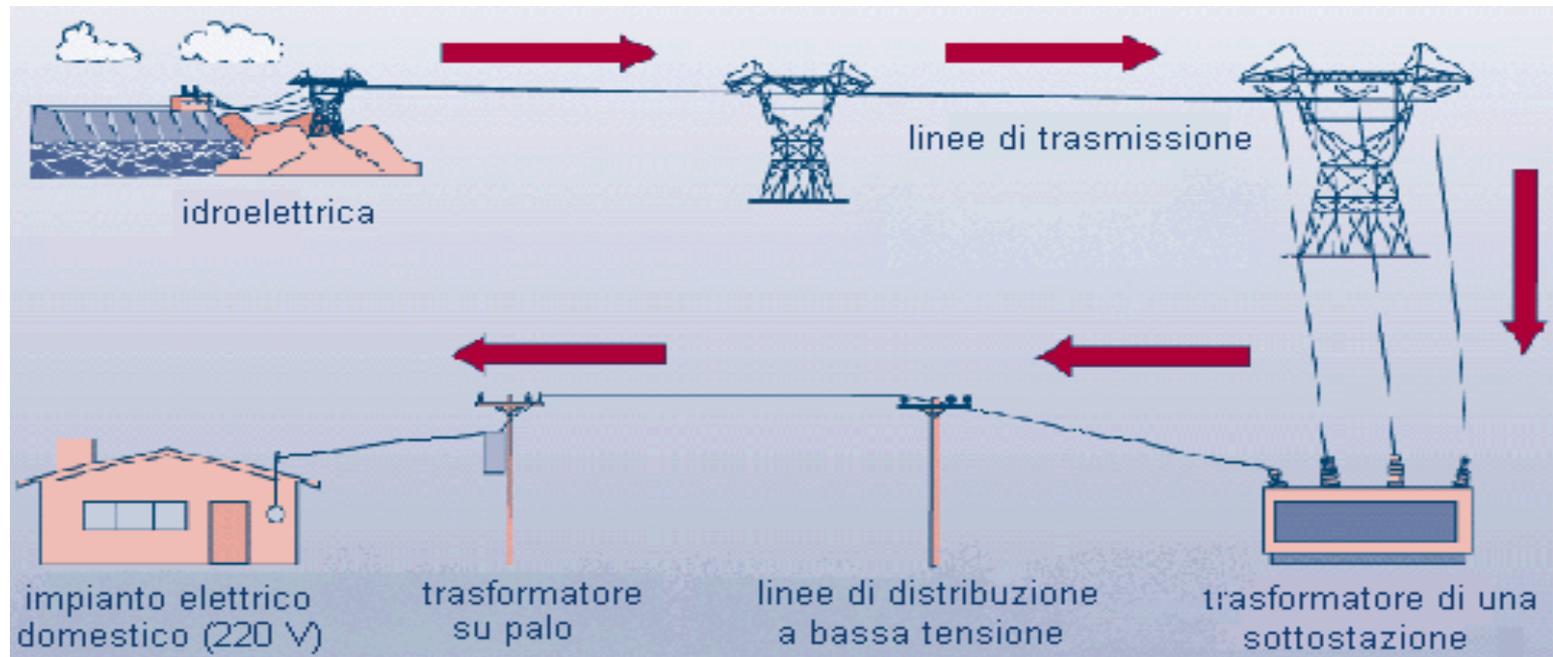
Come si trasporta l'energia

- *Massa*
 - *esempi:*
 - *lo Space Shuttle deve trasportare 1/7 del suo peso in carburante*
 - *le batterie dei dispositivi elettronici sono portatili*
- *Calore*
 - *esempio: teleriscaldamento*
- *Elettricità*

Trasporto dell'energia elettrica

Per ridurre le perdite lungo la linea ($=RI^2$) si può ridurre la resistenza (aumentando la sezione dei fili, cioè il peso) o diminuire la corrente (aumentando di conseguenza la tensione per mantenere costante la potenza trasmessa).

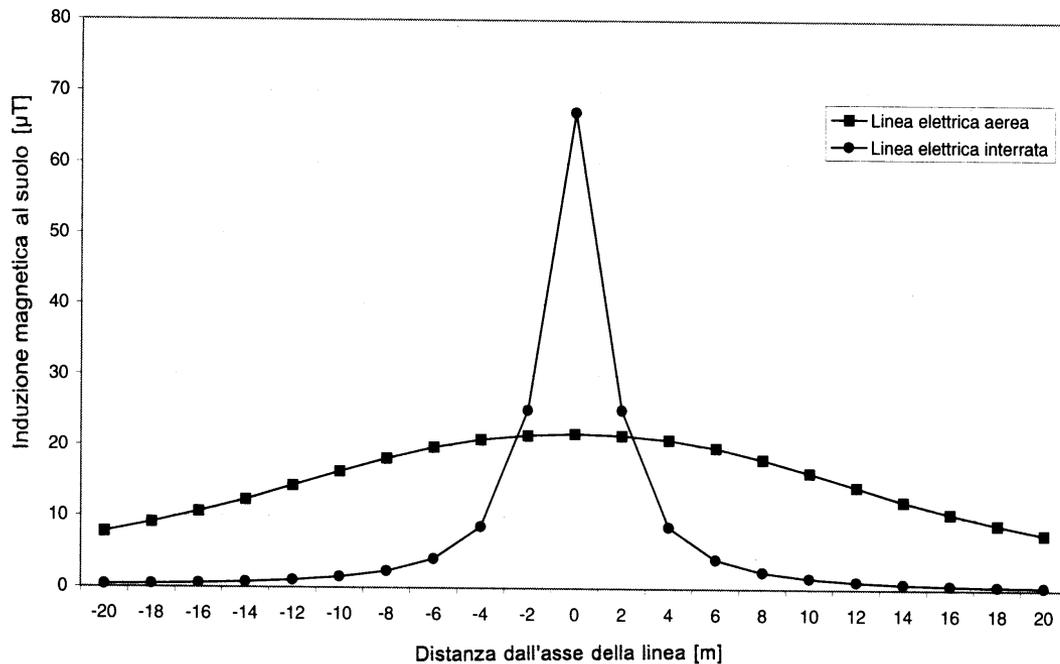
- *Linee ad altissima tensione (380-220 kV): trasporto su grande distanze.*
- *Linee ad alta tensione (150-132 kV): grandi utenze.*
- *Linee a media tensione (15-20 kV): forniture industriali.*
- *Linee a bassa tensione (220-380 V): forniture singole abitazioni.*



Il costo per la costruzione di una tradizionale linea aerea ad alta tensione è pari attualmente a circa 250.000 €/km.

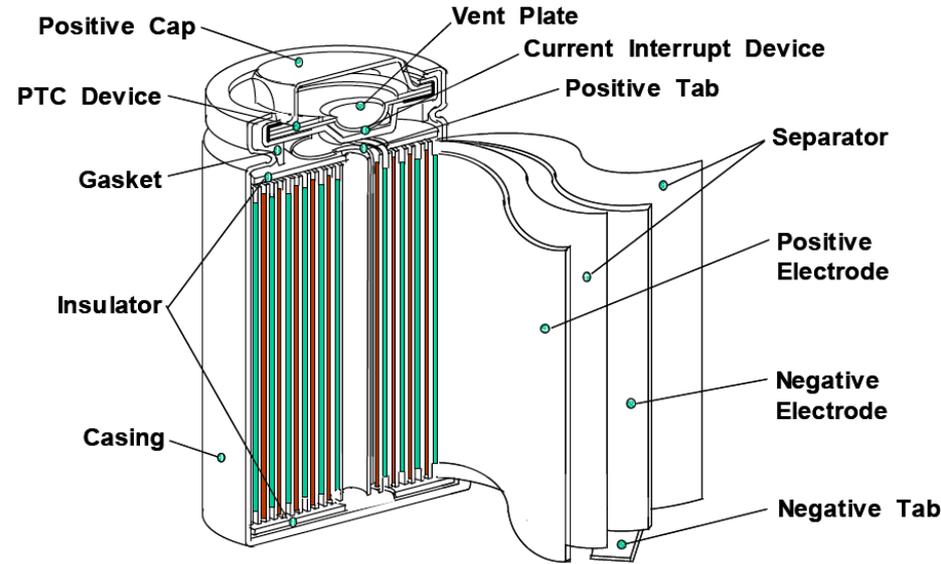
Cavi interrati

- *minore irraggiamento nell'ambiente*
- *minori perdite nella linea*
- *minor impatto sul territorio*
- *maggiore costo (2-3 x)*

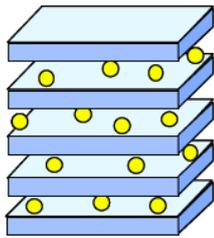


Batterie al Litio

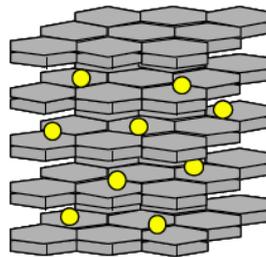
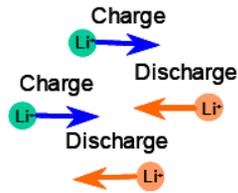
Batterie litio-ioni o litio-polimeri usate nei telefonini, computer e in varia altra elettronica di consumo.



Positive Electrode



solvente organico +
sali di Litio

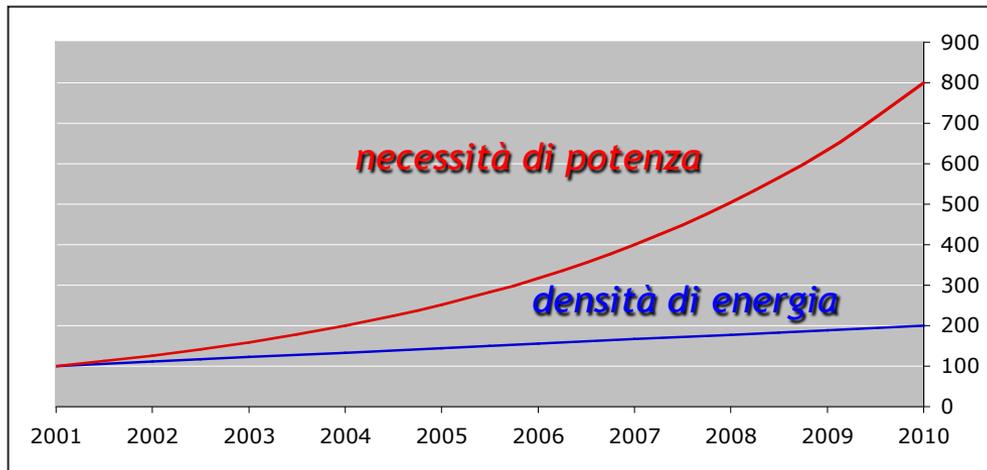


Negative Electrode

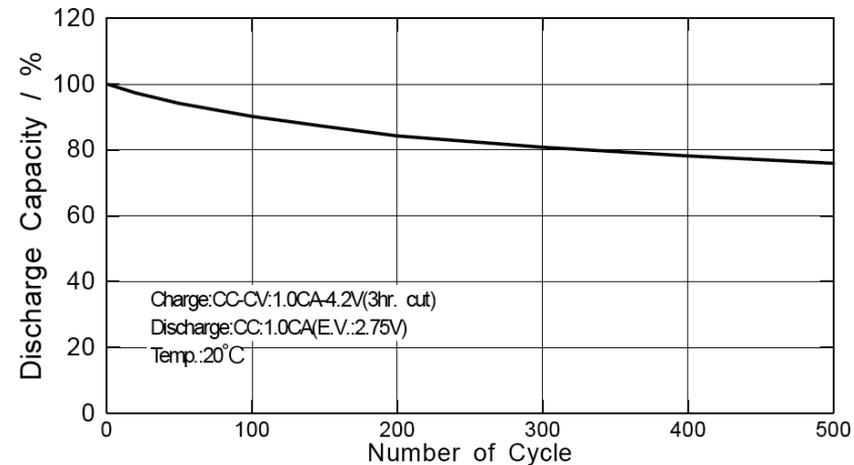
carbonio (grafite)

La vera crisi energetica?

Lo sviluppo delle batterie al litio non tiene il passo con le necessità di energia dei dispositivi



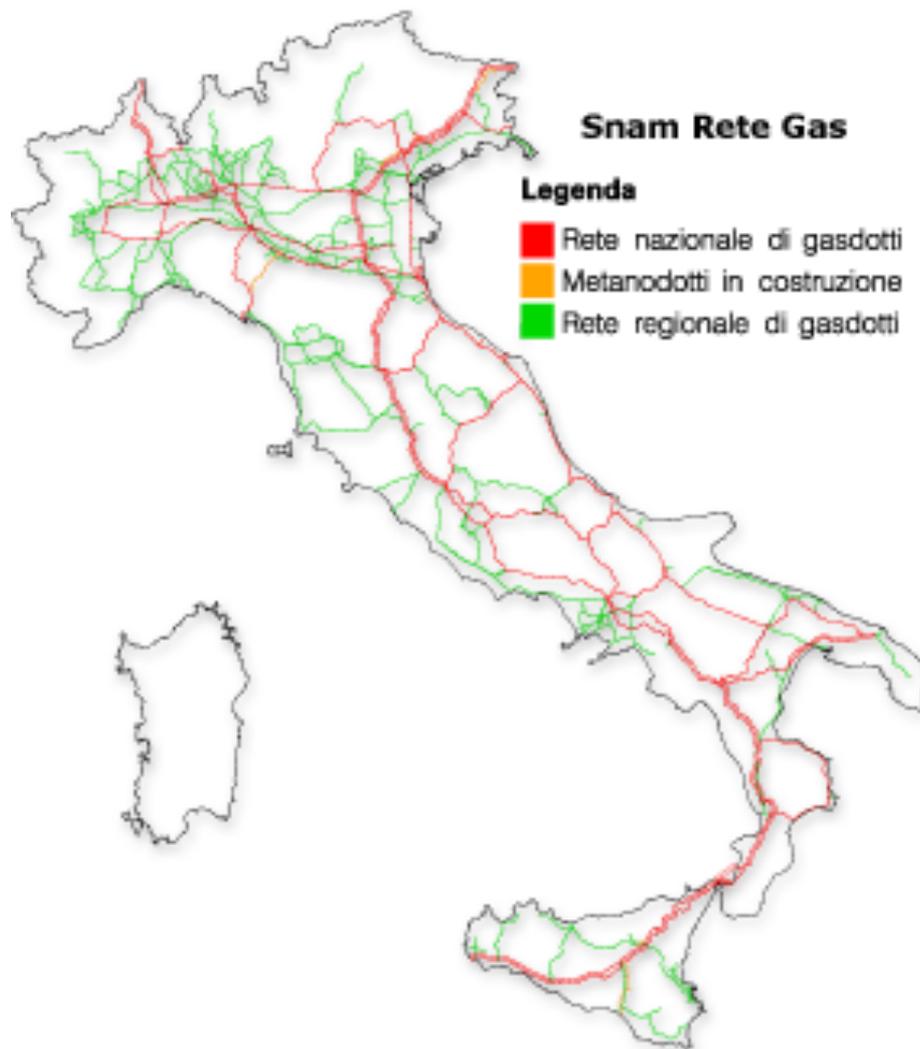
La durata di vita delle batterie al litio è limitata



Gasdotti

*Rete Nazionale di
Gasdotti: 7993 km*

*Rete di Trasporto
Regionale: 22127 km*



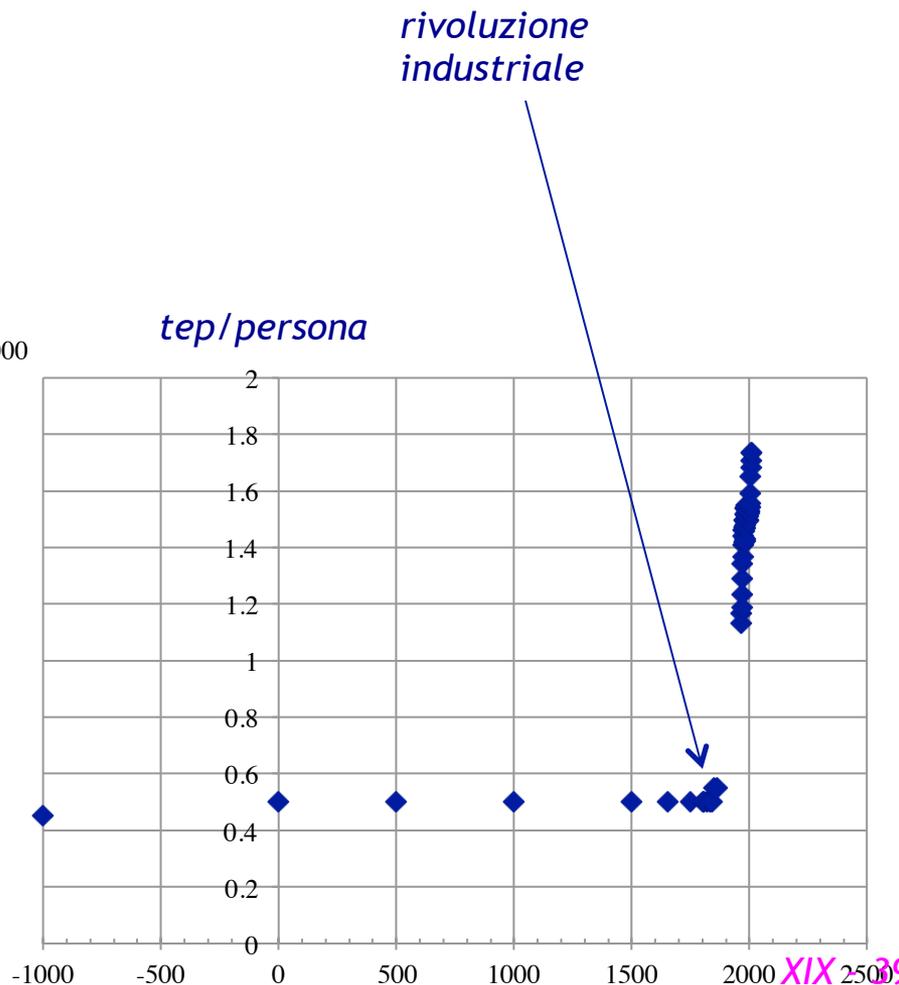
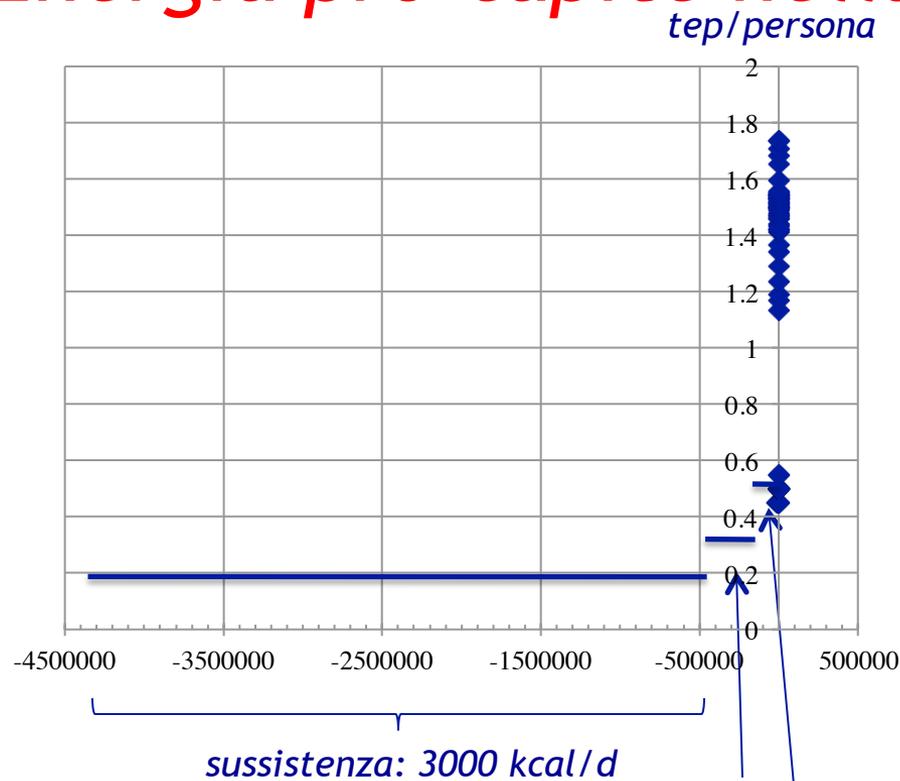
Come si consuma l'energia

L'energia (meccanica, termica, chimica o nucleare) di una sostanza può essere o trasformata in altre forme di energia (secondarie) o utilizzata per compiere lavoro.

Fonti primarie EU-27

	2000		2012	
	GW	%	GW	%
Carbone	159,48	28	227,88	25
Nucleare	128,47	22	120,26	13
Gas	89,80	16	214,99	23
Olio combustibile	66,52	12	50,55	6
Idroelettrico	110,07	19	126,35	14
Fotovoltaico	0,13	n.c.	68,99	7
Eolico	12,89	2	106,04	11
Biomasse	2,79	1	7,32	1
Solare a concentrazione	0,0	0	1,89	0
Rifiuti urbani rinnovabili	0,0	0	3,85	0
Moto ondoso e maree	0,0	0	0,26	0
Totale EU 27	570,14	100	928,38	100
di cui: Energie Rinnovabili	125,87	22,07	312,81	33,69

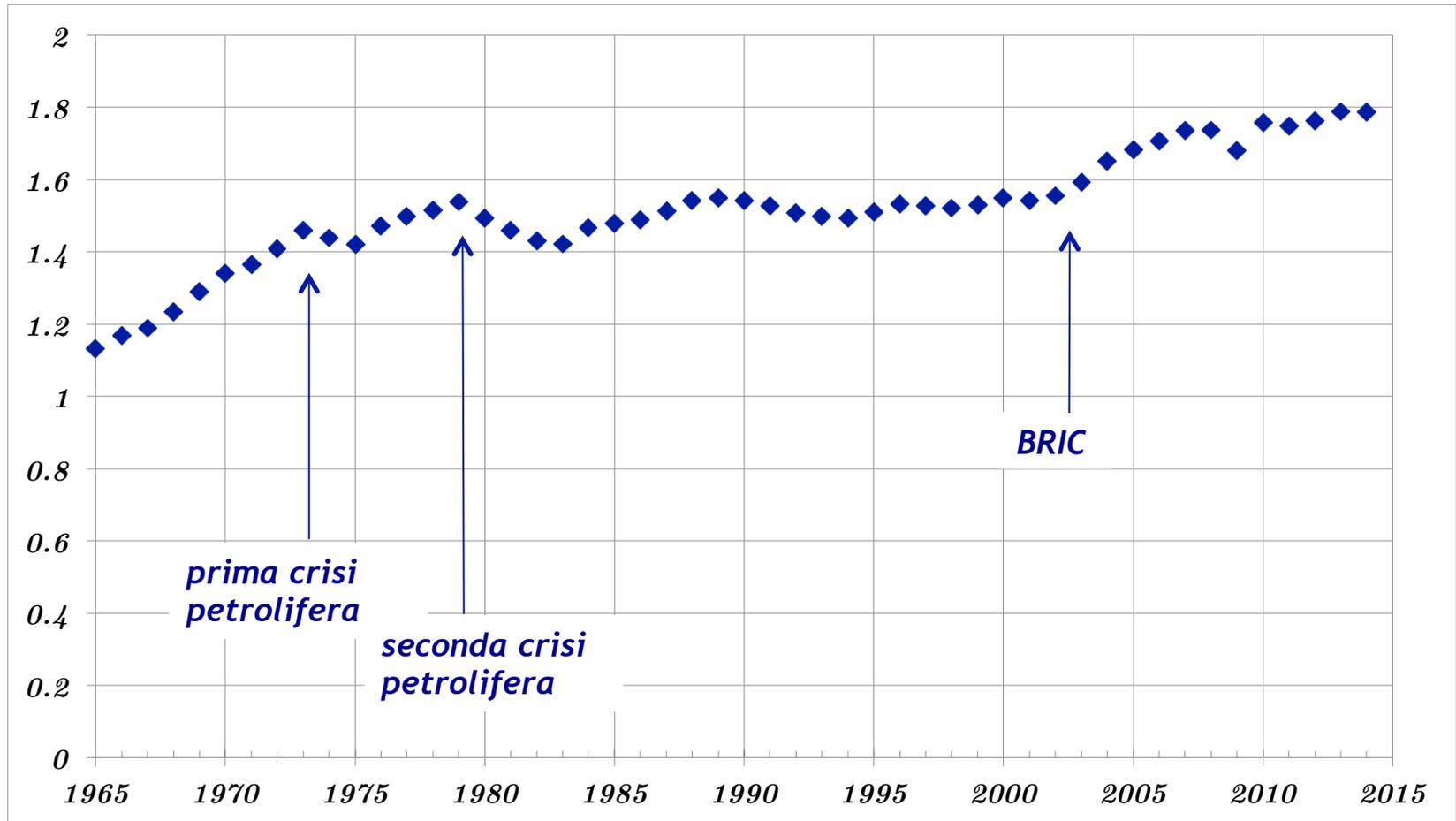
Energia pro-capite nella storia dell'umanità



Elaborazione da:
G.P. Beretta, *WORLD ENERGY CONSUMPTION AND RESOURCES: AN OUTLOOK FOR THE REST OF THE CENTURY*, *International Journal of Environmental Technology and Management* (2007) Vol. 7

Energia pro-capite nella storia dell'umanità

tep/persona



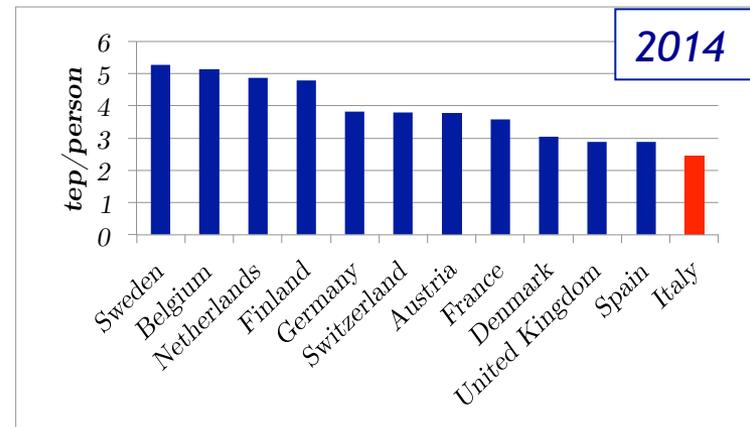
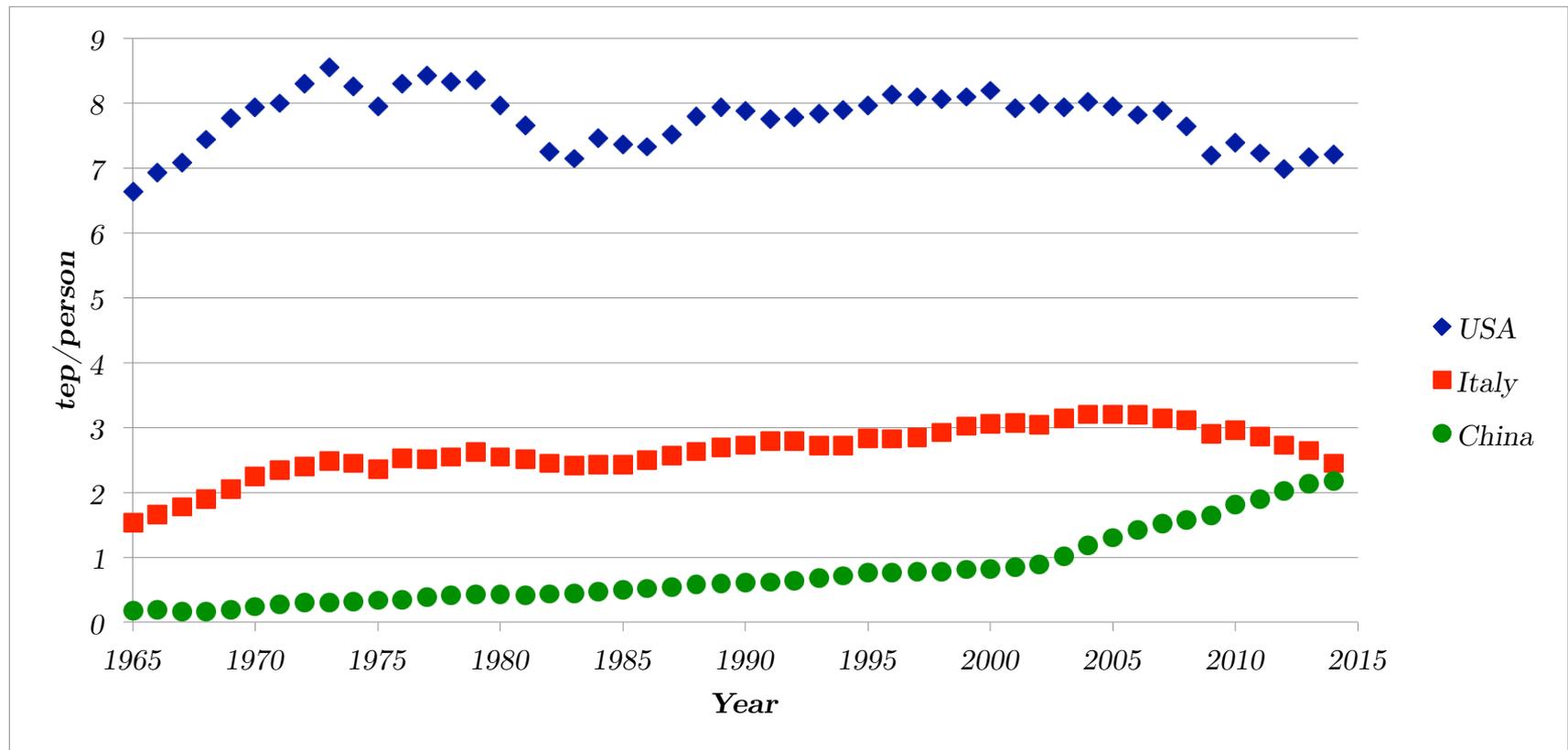
Elaborazione da:

energia: BP Statistical Review of World Energy 2015

popolazione (esempi): http://www.geohive.com/earth/his_history3.aspx,

<http://esa.un.org/unpd/wpp/Excel-Data/population.htm>

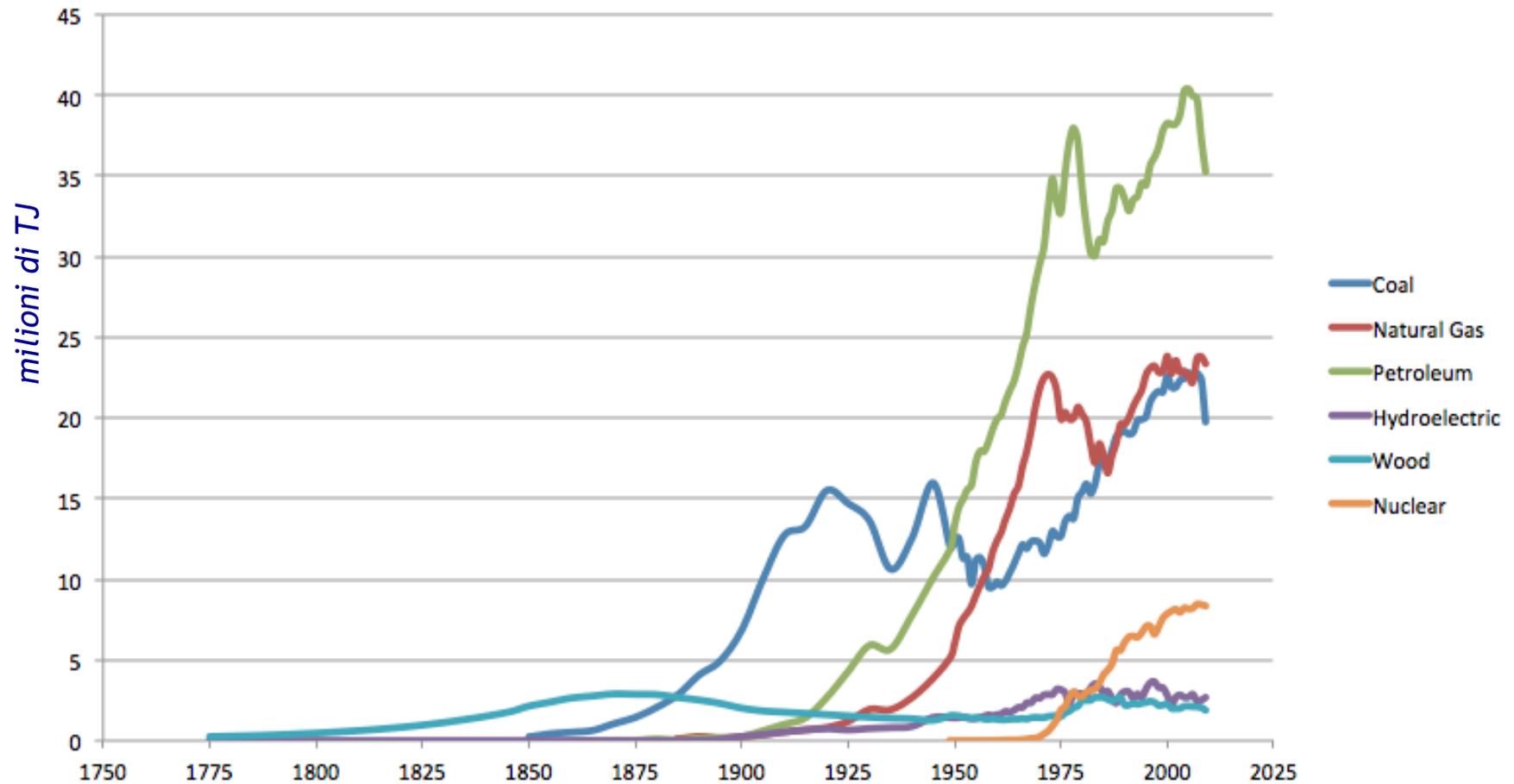
Consumi nazionali



Elaborazione da:
BP Statistical Review of World Energy 2015

Cambiamenti nel consumo

USA



Riscaldamento domestico

$$\frac{Q}{\Delta t} = \kappa A \frac{\Delta T}{l}$$

Appartamento 10 m x 10 m x 2.7 m: area pareti $A = 108 \text{ m}^2$

Differenza di temperatura: $T_{in} - T_{out} = (20^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) = 20 \text{ K}$

Spessore pareti: $l = 0.24 \text{ m}$

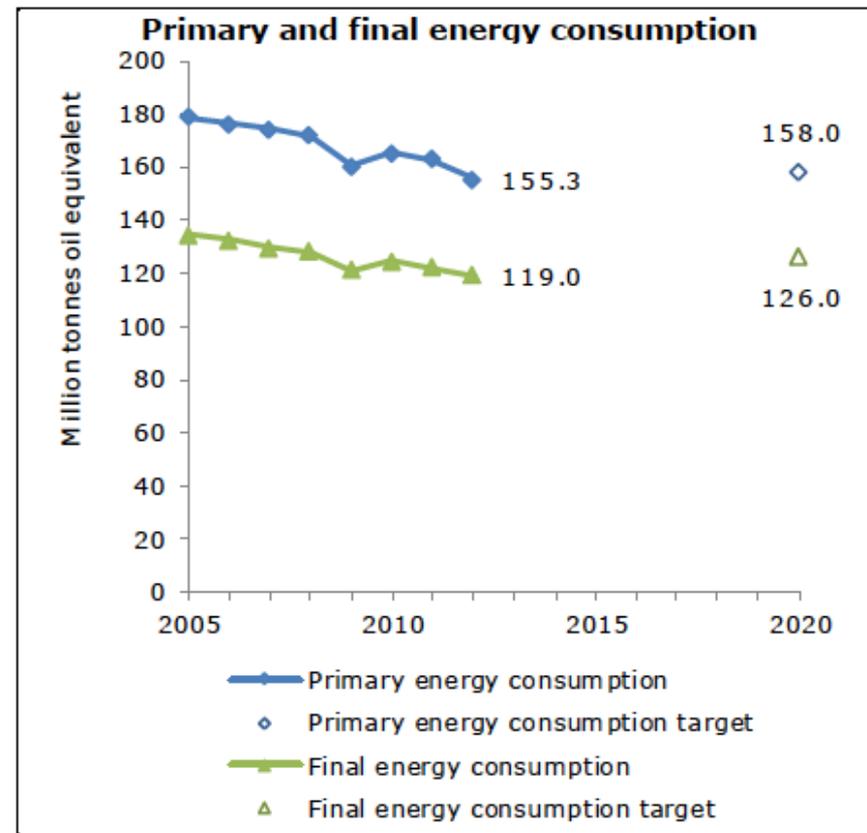
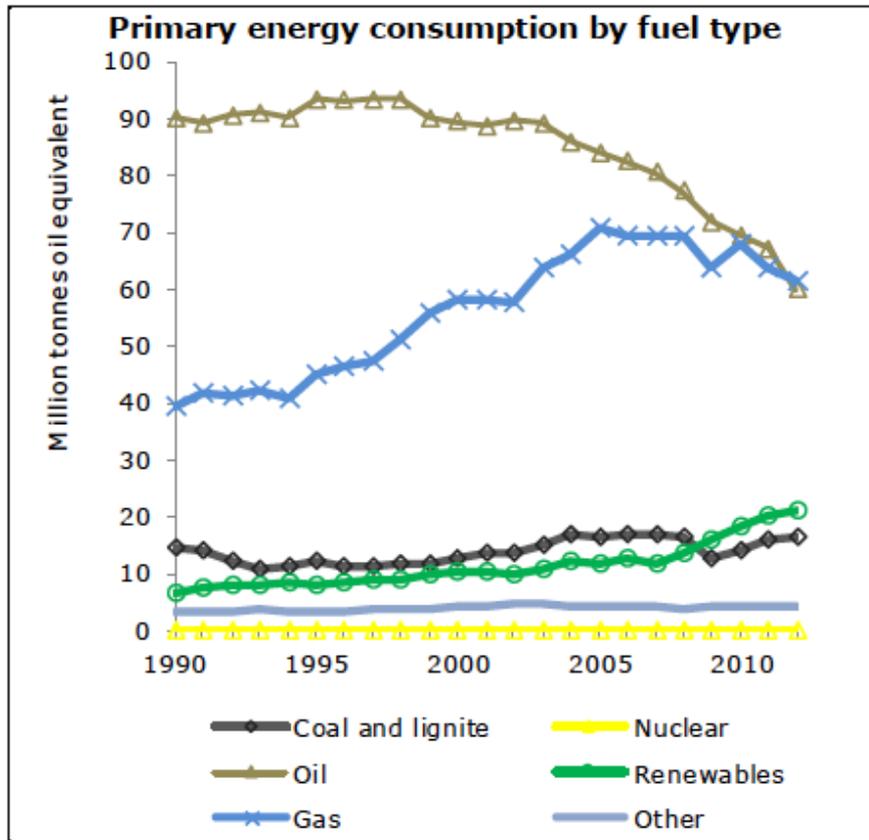
Conducibilità termica pareti: $k = 0.126 \text{ W/m K}$

Esempio:

$$\left. \begin{array}{l} 180 \text{ giorni} \\ \Delta T \text{ medio di } 15^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Rightarrow \left(1.36 \frac{\text{kWh}}{\text{giorno K}} \right) (180 \text{ giorni})(15^\circ\text{C}) = 4.9 \text{ MWh}$$

$$4.9 \text{ MWh} = 1.76 \times 10^4 \text{ MJ} = 511 \text{ m}^3 \text{ metano}$$

Italia



CO₂ da combustibili fossili

	<i>Contenuto in carbonio</i>	<i>Quantità di combustibile</i>	<i>Produzione CO₂</i>
<i>Carbone</i>	<i>85%</i>	<i>290 t/GWh_e</i>	<i>840 t/GWh_e</i>
<i>Petrolio</i>	<i>85%</i>	<i>210 t/GWh_e</i>	<i>670 t/GWh_e</i>
<i>Metano</i>	<i>75%</i>	<i>190 t/GWh_e</i>	<i>500 t/GWh_e (360 t/GWh_e a efficienza=56%)</i>

Supponendo un'efficienza di conversione calore-elettricità del 40%.

*Centrale da 1000 MW_e: $3,15 \times 10^{16}$ J/anno = 8750 GWh_e/anno =
= 4,5-7,5 milioni di tonnellate di CO₂/anno*

Trasporti

Emissioni di CO₂ per kg di combustibile:

Benzina: $2 C_8H_{18} + 25 O_2 \rightarrow 16 CO_2 + 18 H_2O + \text{energia}$
2 mol C₈H₁₈ (114 g/mol) producono 16 mol di CO₂ (44 g/mol)
2×114=228 g di C₈H₁₈ producono 16×44=704 g di CO₂
1 kg di C₈H₁₈ produce (704/228)=3.09 kg di CO₂
1 litro di C₈H₁₈ produce 3.09×0.720=2.22 kg di CO₂
a 17 km/litro si producono 2220/17=131 g di CO₂/km

Gasolio: $4 C_{12}H_{23} + 71 O_2 \rightarrow 48 CO_2 + 46 H_2O + \text{energia}$
4 mol C₁₂H₂₃ (167 g/mol) producono 48 mol di CO₂ (44 g/mol)
4×167=669 g di C₁₂H₂₃ producono 48×44=2112 g di CO₂
1 kg di C₁₂H₂₃ produce (2112/669)=3.17 kg di CO₂
1 litro di C₁₂H₂₃ produce 3.17×0.832=2.64 kg di CO₂
a 20 km/litro si producono 2640/20=132 g di CO₂/km

Metano: $CH_4 + O_2 \rightarrow CO_2 + 2 H_2O + \text{energia}$
1 mol CH₄ (16 g/mol) producono 1 mol di CO₂ (44 g/mol)
16 g di CH₄ producono 44 g di CO₂
1 kg di CH₄ produce (44/16)=2.75 kg di CO₂
a 21 km/kg si producono 2750/21=131 g di CO₂/km

Ibrida (Prius)
22 km/litro (100 g di CO₂/km)
30% in meno a parità di
potenza

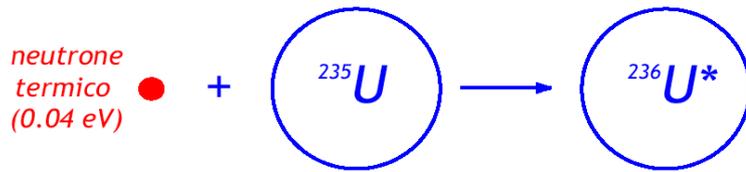
Emissioni automezzi

Veicolo	Carburante	Anno di immatr.	Velocità media					
			fino a 20 km/h			oltre 20 km/h		
			CO	NOx	PM10	CO	NOx	PM10
			g/ km	g/ km	mg/ km	g/ km	g/ km	mg/ km
auto	benzina super		32	1.6	80	20	1.9	80
	benzina verde		6	0.44	19	2.8	0.45	19
	gas (GPL/ metano)		2.3	0.51	18	1.1	0.56	18
	gasolio (diesel)	fino al 1992	0.97	1	320	0.65	0.82	217
		1993-1996	0.86	1	124	0.43	0.68	75
		1997-2000	0.86	1	124	0.43	0.68	75
		dal 2001	0.86	0.76	94	0.43	0.52	59
ciclomotori		fino al 1998	15	0.03	120	15	0.03	120
		1999 - 2001	7.5	0.03	120	7.5	0.03	120
		dal 2002	1.5	0.01	120	1.5	0.01	120
moto (oltre 50cc)		fino al 1998	31	0.11	40	19	0.16	40
		dal 1999	12	0.14	40	6	0.19	40
autobus		fino al 1992	6.34	18.86	890	3.78	13.17	540
		1993 - 1996	3.78	13.55	540	1.89	9.22	360
		1997 - 2000	3.02	9.67	345	1.51	6.58	230
		dal 2001	2.12	6.78	240	1.06	4.61	160

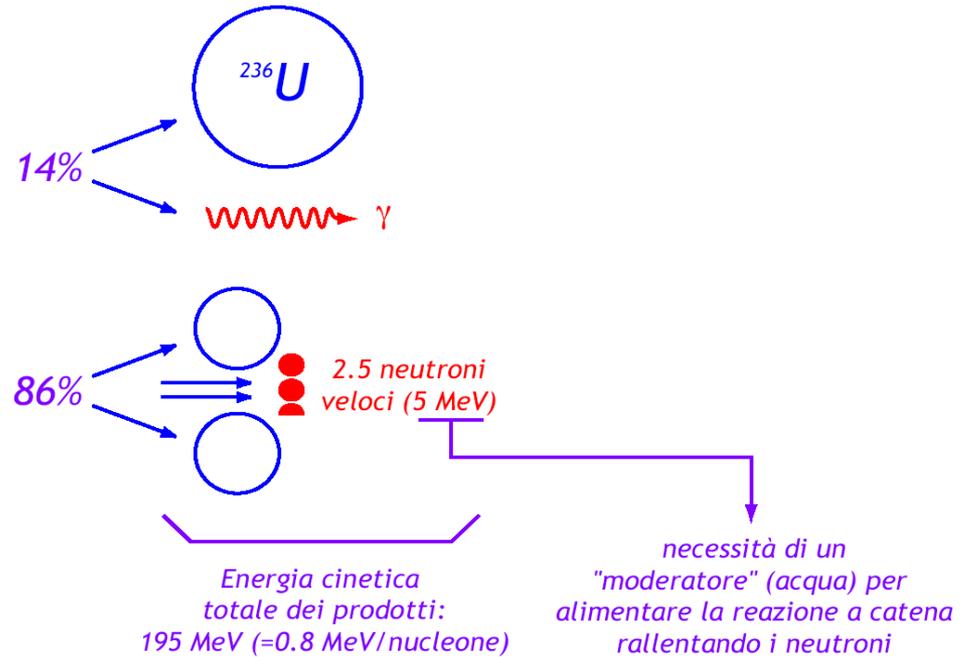
Altri sottoprodotti della produzione di energia da combustibili fossili

- SO_2
- NH_3
- COV
- Benzene
- *altri ~ 100 prodotti in tracce*

Nucleare a fissione



$$E_{\text{termica}} = \frac{3}{2}kT = \frac{1.5 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 293}{1.6 \times 10^{-19}} = 0.04 \text{ eV}$$



Energia/fissione:	$190 \text{ MeV} = (190 \times 10^6 \text{ eV}) \times (1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}) = 3 \times 10^{-11} \text{ J/fissione}$
Fissioni/Joule:	$1 / (3 \times 10^{-11} \text{ J/fissione}) = 3.3 \times 10^{10} \text{ fissioni/J}$
Fissioni/Wattora:	$(3600 \text{ s/ora}) \times (3.3 \times 10^{10} \text{ fissioni/J}) = 1.2 \times 10^{14} \text{ fissioni/Wattora}$
Reazioni ($n+^{235}\text{U}$)/Wattora:	$(1.2 \times 10^{14} \text{ fissioni/Wattora}) / 0.86 = 1.4 \times 10^{14} \text{ reazioni/Wattora}$
Massa consumata (^{235}U) /Wattora:	$(1.4 \times 10^{14} \text{ reazioni/Wattora}) \times (235 \text{ g/mole}) / (6.02 \times 10^{23} \text{ atomi/mole}) = 5.5 \times 10^{-8} \text{ g/Wattora}$
Massa consumata (^{235}U) /GWanno:	$(5.5 \times 10^{-8} \text{ g/Wattora}) \times (3.15 \times 10^7 \text{ s/anno}) \times (10^9 \text{ GW/W}) = 1.7 \text{ t}$

Bilancio di materia - reattore da 1 GW

Uranio naturale: $\frac{^{235}\text{U}}{U_{\text{totale}}} = 0.7\%$

Uranio arricchito (combustibile): $\frac{^{235}\text{U}}{U_{\text{totale}}} = 3\%$ →

Un reattore nucleare funziona sempre a pieno carico di combustibile perchè deve avere sempre una massa critica di ^{235}U presente. Per evitare di abbassare troppo la potenza prodotta, 1/3 del combustibile viene sostituito ogni anno, quindi ciascun elemento di combustibile resta nel reattore tre anni.

Quantità di uranio nel cuore di un reattore da 1000 MW_e:
(3 anni) x (1.7 t/anno) / 0.03 = 170 t

Ogni anno vengono sostituite 57 t di combustibile (equivalente a carbone: 3x10⁶ t/anno):

53.4 t = 94.3% ^{238}U

0.45 t = 0.8% ^{235}U

● 1.98 t = 3.5% prodotti di fissione (inclusi quelli derivati dalla fissione di ^{239}Pu prodotto per assorbimento di neutroni da parte dell' ^{238}U)

● 0.51 t = 0.9% isotopi del Plutonio

0.26 t = 0.46% ^{236}U

● 0.028 t = 0.05% elementi transuranici (^{237}Np , ^{243}Am , ...)

→ 2.52 t di scorie per anno se il combustibile viene ritrattato con estrazione dell'uranio

→ 0.25 m³ ($\rho=10 \text{ g/cm}^3$) = 63x63x63 cm³

(in realtà 2÷4 m³ dopo la vetrificazione, in contenitori di diametro 30 cm e altezza 3 m)

Problemi: stoccaggio a breve termine a causa della radioattività residua: $P=0.066 P_{\text{reattore}} t^{-0.2}$

Dopo circa 100 anni la radioattività residua è pari alla radioattività naturale.

Sottoprodotti della produzione di energia termonucleare

Combustibile nucleare: 97% ^{238}U , 3% ^{235}U

Combustibile esaurito: 94,8% $^{238}\text{U}+^{236}\text{U}$,
0,8% ^{235}U ,
4,4% residui di fissione
e altro

170 g di scorie radioattive / GWh

8,8 kg di ^{238}U impoverito / GWh

← *completamente
riciclato*

Dal processo di arricchimento dell'uranio (^{235}U dal 0,7% al 3%) provengono altri 45 kg di ^{238}U impoverito (<0,3% di ^{235}U) / GWh

Referenze

IEA (International Energy Agency)

ENEA (Ente Nazionale Energie Alternative)

ISPRA (Istituto Superiore per la Ricerca Ambientale)

ENEL (Ente Nazionale Energia Elettrica)

Legambiente

EnergiaLab (<http://www.energialab.it/>)

+

moltissime altre: scuole (<http://www.paciolo.com/Ambiente/>), enti (EEA, EPA), riviste (La nuova ecologia, Ilsoleatrecentosessantagradi), ecc.