



Fotovoltaico: da Alessandro Volta all'energia rinnovabile

Lucio Claudio Andreani

Dipartimento di Fisica "A. Volta", Università di Pavia

lucio.andreani@unipv.it

Corso AIF, Pavia, 21 ottobre 2026

INDICE

- Energia, clima, problema energetico
- Energie rinnovabili
- Fotovoltaico: uno sguardo privilegiato
- Transizione energetica, stoccaggio, sostenibilità

Unità di energia: Joule (J) e kilo-Watt-ora (kWh)

- 1 kWh=1000 Watt · 3600 s=$3.6 \cdot 10^6$ J
- 1 kWh=Energia necessaria per sollevare 367 kg di 1000 m (=M·g·h)
- Quanto lavoro può compiere una persona in 1 giorno? Un uomo che pesa 70 kg, con uno zaino di 20 kg, che sale per 2000 m, compie un lavoro pari a 0.5 kWh





- 1 kWh è il lavoro che può compiere un uomo robusto, in due giornate lavorative ⇒ **0.5 kWh !**

→ **1 kWh vale tantissimo!**

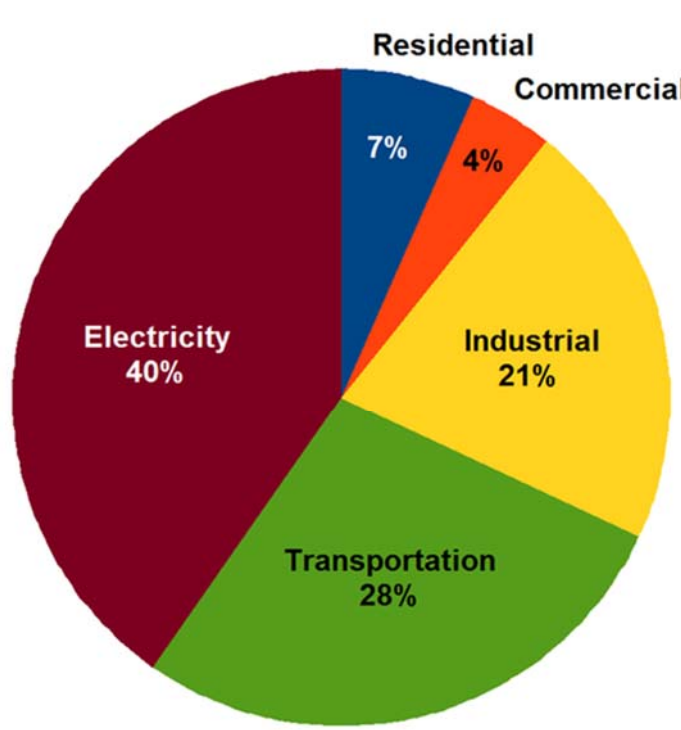
- 1 kWh costa circa da 0.05 € (costo di produzione) a 0.15 € (prezzo di vendita)

→ **1 kWh costa pochissimo!**

- Consumo medio di energia elettrica (primaria) a persona:

Italy: ~15 (100) kWh/day, equivalenti a 30 (200) giornate di lavoro;
World: ~9 (60) kWh/day, equivalenti a 18 (120) giornate di lavoro.

Energia primaria: i 4 settori



Data Source: US Energy Information Agency

Riscaldamento

Le fonti principali di energia rinnovabile (idroelettrico, solare fotovoltaico, eolico) producono ***energia elettrica***.

Per aumentare la quota di energie rinnovabili sull'energia primaria è necessario ***elettrificare*** altri settori dell'economia.

Consumo annuo di energia elettrica (TWh)		
World	EU	Italy
~30'000	~2'700	~300

Consumo di energia primaria nel mondo

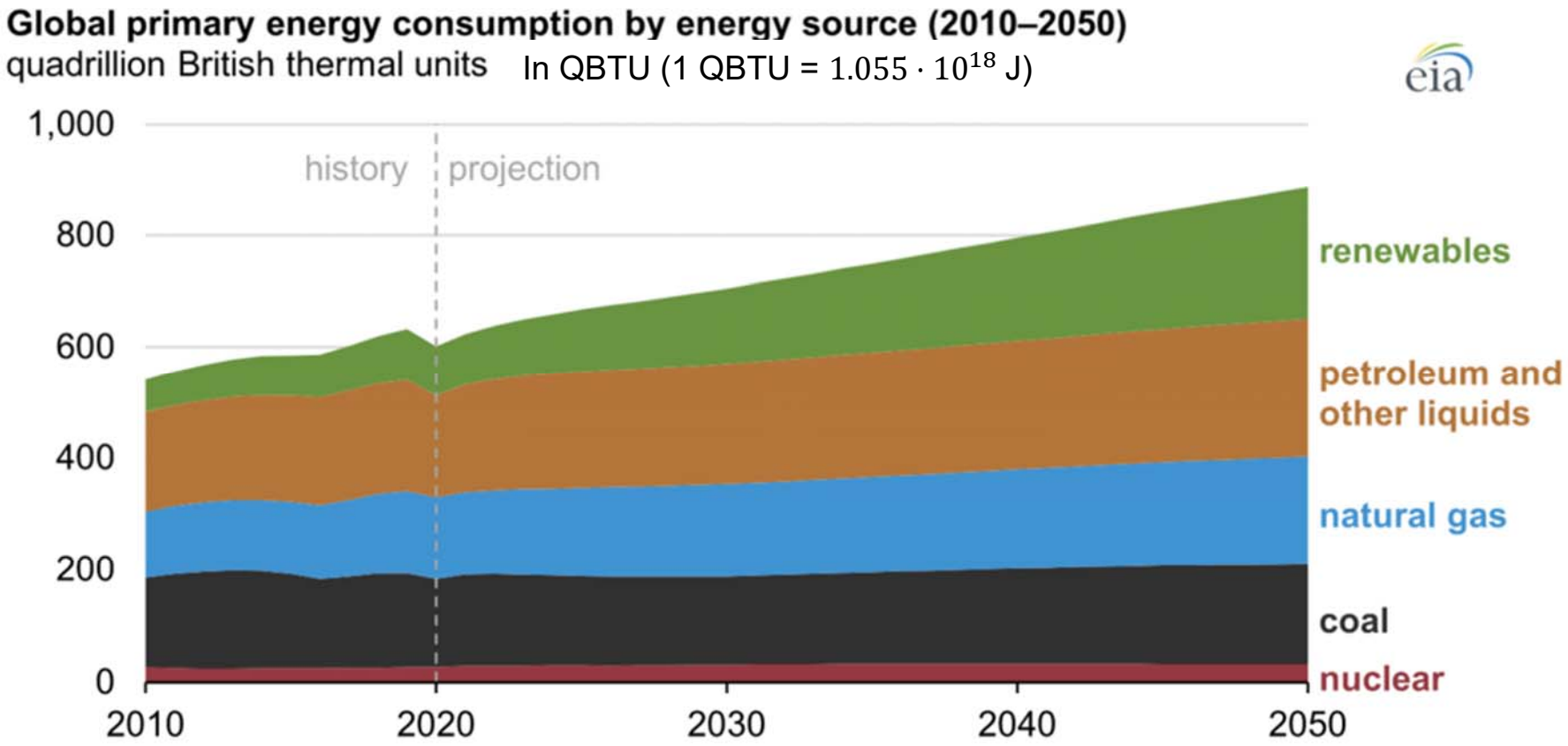
World primary energy demand in the Sustainable Development Scenario in Mtoe (1 Toe=11.63 MWh)

IEA World Energy Outlook, 2020	Sustainable Development Scenario					
	Energy demand (Mtoe)					
	2010	2018	2019	2025	2030	2040
Total primary demand	**12 852**	**14 300**	**14 406**	**13 853**	**13 378**	**13 020**
Coal	3 650	3 839	3 775	2 939	2 243	1 295
Oil	4 117	4 496	4 525	4 253	3 963	3 006
Natural gas	2 755	3 284	3 340	3 450	3 312	2 943
Nuclear	719	707	727	764	895	1 126
Hydro	296	362	370	416	475	575
Bioenergy	1 205	1 327	1 354	1 341	1 283	1 682
Other renewables	110	286	314	691	1 207	2 393

81% carbone + petrolio + gas naturale

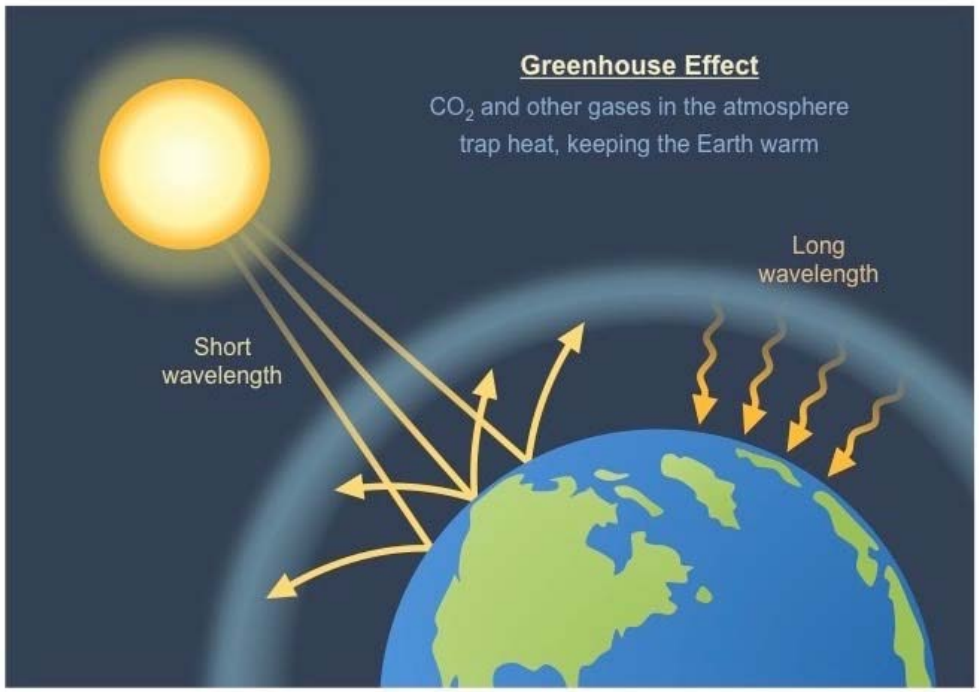
dal 2% … al 18%

Consumo globale di energia primaria

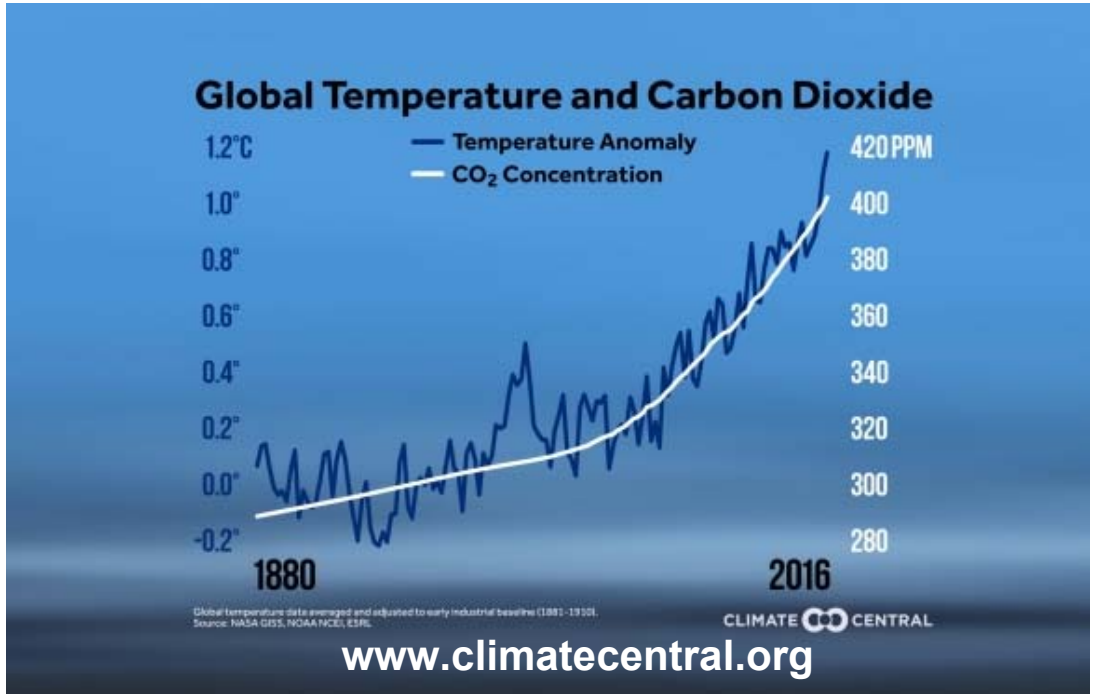


https://www.instituteforenergyresearch.org/international-issues/eia-expects-energy-demand-to-increase-almost-50-percent-worldwide-by-2050/

Effetto serra e aumento della temperatura globale



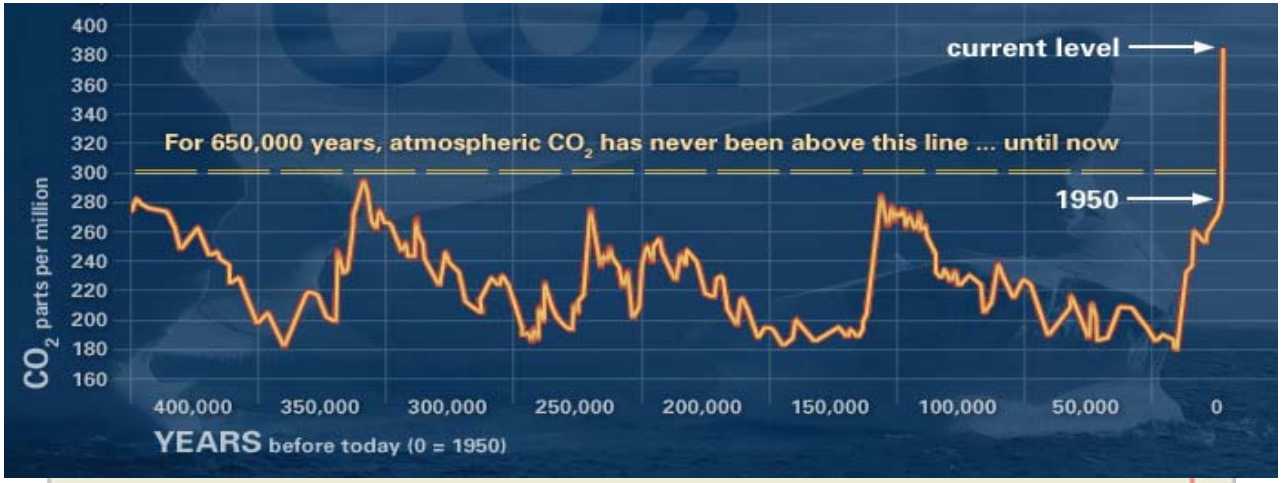
È un fenomeno naturale, dovuto alla presenza di gas nell'atmosfera (CO_2, CH_4, …), che trattiene parte del calore proveniente dalla radiazione solare e rende la Terra abitabile.

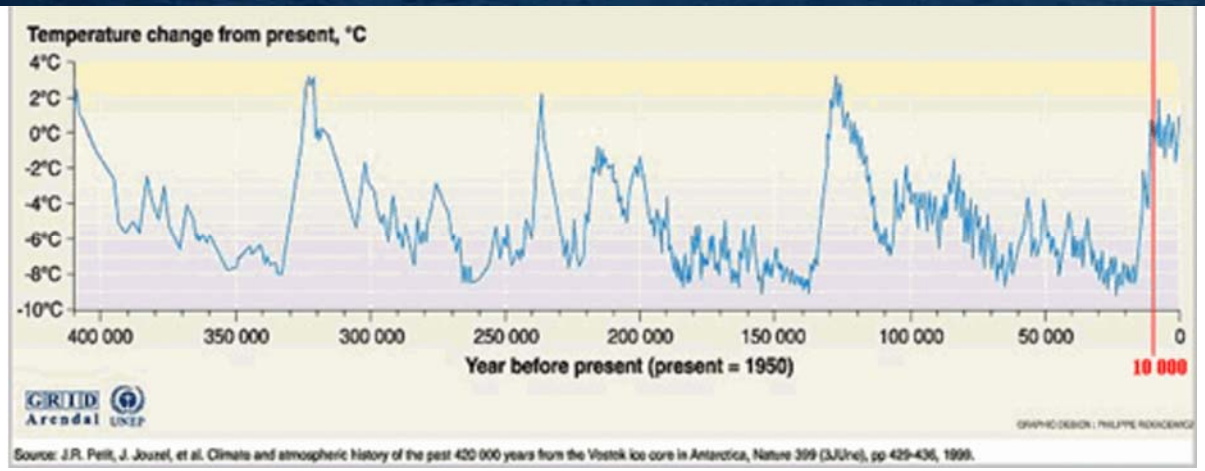


La temperatura globale è aumentata di ≈1 °C rispetto ai livelli pre-industriali. Questo è correlato soprattutto alle emissioni di CO_2, dovute all'uso dei combustibili fossili. Conclusioni dell'Intergovernmental Panel on Climate Change, http://www.ipcc.ch/

E rispetto agli ultimi 400’000 anni?

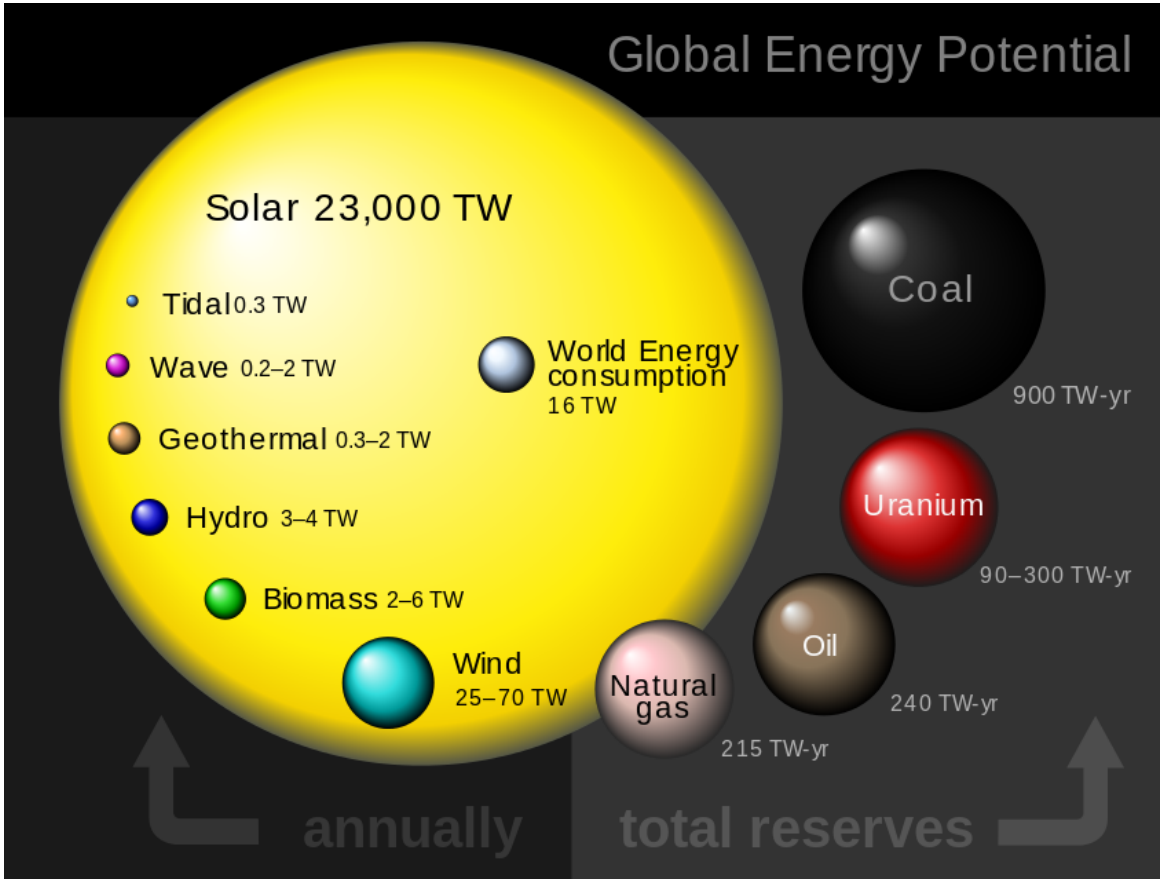
La concentrazione di CO_2 nell’atmosfera ha continuato a fluttuare… ma non aveva mai superato il livello di 300 ppm, e l’aumento rapido negli ultimi 70 anni è chiaramente correlato alle attività umane.





Risorse energetiche: il potenziale

Energie rinnovabili



https://waitbutwhy.com/2015/06/the-deal-with-solar.html

Combustibili fossili e nucleare

N.b. questa figura rappresenta schematicamente il *potenziale* delle diverse fonti di energia *rinnovabili*. Non va intesa come una rappresentazione accurata della disponibilità di combustibili fossili e nucleare.

Energia idroelettrica

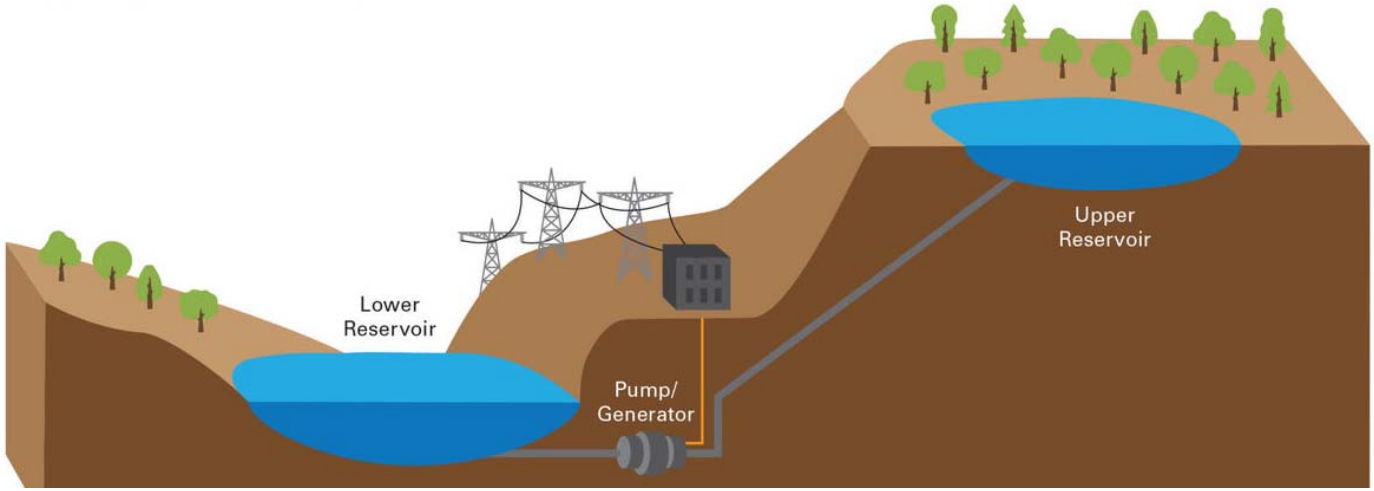
- Sfrutta la trasformazione dell'energia gravitazionale, posseduta da una massa d'acqua ad una certa quota, in energia cinetica; quest'ultima viene trasformata in energia elettrica grazie ad alternatori accoppiati a turbine.
- È stata la prima fonte rinnovabile utilizzata ed è tuttora la più diffusa.
- E' una fonte pulita, a basso costo (~0.05 €/kWh), con tecnologia matura.
- L'impatto ambientale può essere notevole.



Diga delle Tre Gole (Hubei, Cina)

Energia idroelettrica e stoccaggio

- Nell'Unione Europea, l'energia idroelettrica contribuisce alla produzione di energia elettrica per circa il 12% (in Italia il 16%).
- Le sue potenzialità di sviluppo in UE sono limitate: la maggior parte delle risorse grandi (*large hydro*) sono già in uso. Anzi, si può porre un problema di scarsità di risorse idriche a causa dei cambiamenti climatici.
- I bacini idroelettrici rivestono una grande importanza nel contesto delle fonti rinnovabili intermittenti (*vento* e *solare*), come sistemi per lo stoccaggio dell'energia (*pumped hydro*).



Energia da biomasse

- Le biomasse per la produzione di energia si dividono in tre categorie:

a) Legno e residui vegetali

b) Rifiuti solidi urbani

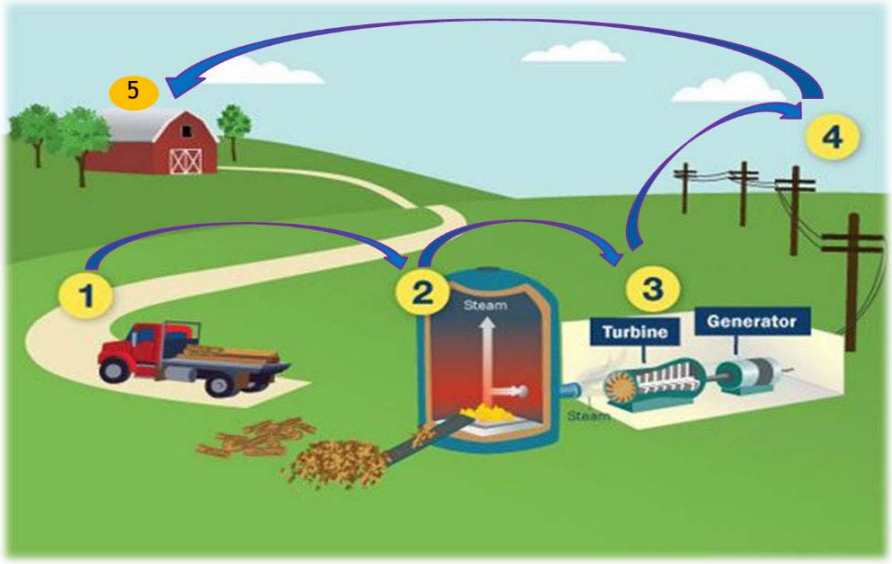
c) Biogas (metano da fermentazione batterica anaerobica)

- Le biomasse hanno varie applicazioni per la produzione di energia:

1) Bio-elettricità
2) Riscaldamento
3) Biocarburanti

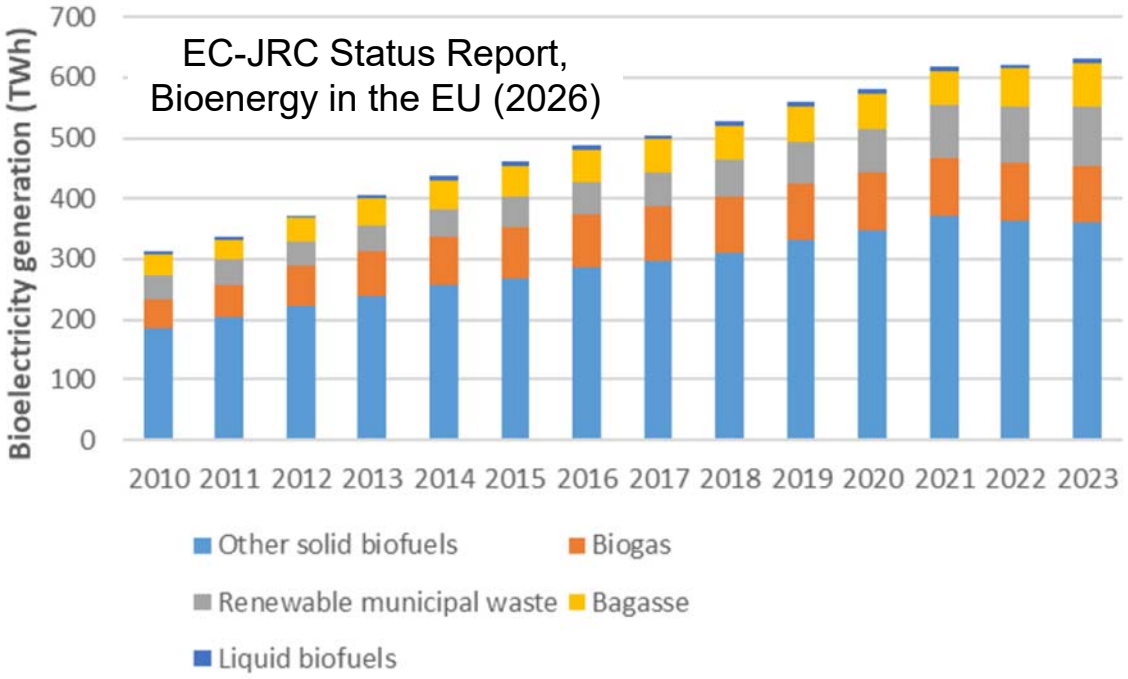
Vi sono aspetti ambientali molto positivi legati al riutilizzo degli scarti agricoli e dei rifiuti.

Non è proponibile invece l'uso di bio-elettricità e di biocarburanti su grande scala.



Elettricità da biomasse

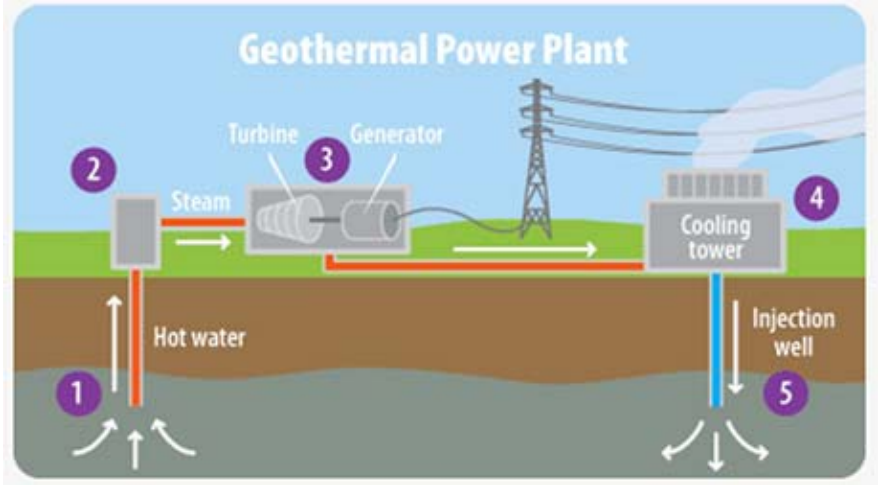
- La bio-elettricità ha il vantaggio che la bio-massa può essere immagazzinata, generando l'elettricità su richiesta.
- E' possibile recuperare parte del calore prodotto nella combustione mediante impianti di co-generazione.



- Nel 2023 la generazione di bio-elettricità è di ~200 TWh in UE, ~600 TWh nel mondo (~6% della produzione di energia elettrica). Per via della competizione con altri usi delle biomasse e del territorio, è difficile ipotizzare sviluppi su scala più grande.

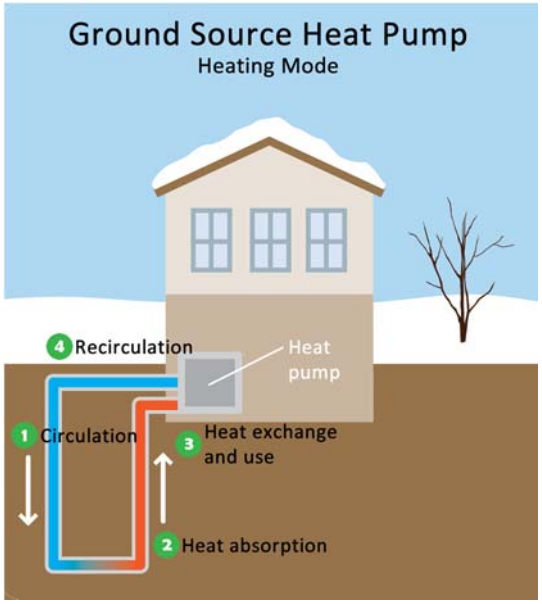
Geotermia

- Nelle centrali geotermiche si sfrutta il calore contenuto nella crosta terrestre, utilizzando il vapore nel sottosuolo per muovere una turbina accoppiata ad un generatore.
- In Italia vi sono 33 impianti geotermici, tutti in Toscana.
- Attualmente la geotermia contribuisce attorno allo 0.5% dell'energia elettrica prodotta in Europa. Le possibilità di sviluppo sono ristrette ad alcune zone, globalmente sono molto limitate.



E' invece molto promettente e in crescita l'applicazione della geotermia al riscaldamento tramite le ***pompe di calore geotermiche***.

Esse utilizzano il calore dell'ambiente esterno, attraverso il meccanismo inverso di quello di un frigorifero, con alimentazione elettrica.



Energia dal vento

- Il vento muove eliche o pale collegate ad una turbina per la generazione di energia elettrica.
- L'energia eolica è rinnovabile, pulita, a basso costo (0.04 €/kWh). Può essere prodotta a terra oppure off-shore.
- Ha un impatto visivo e di occupazione dello spazio non trascurabile.

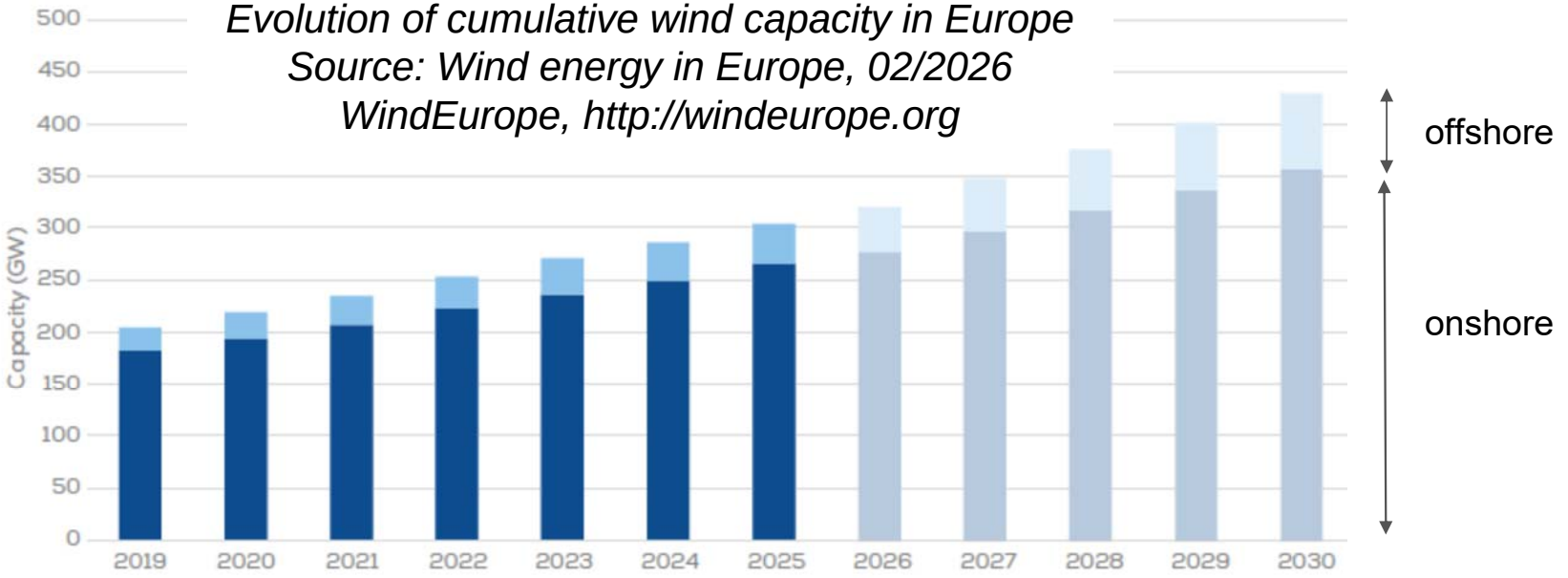




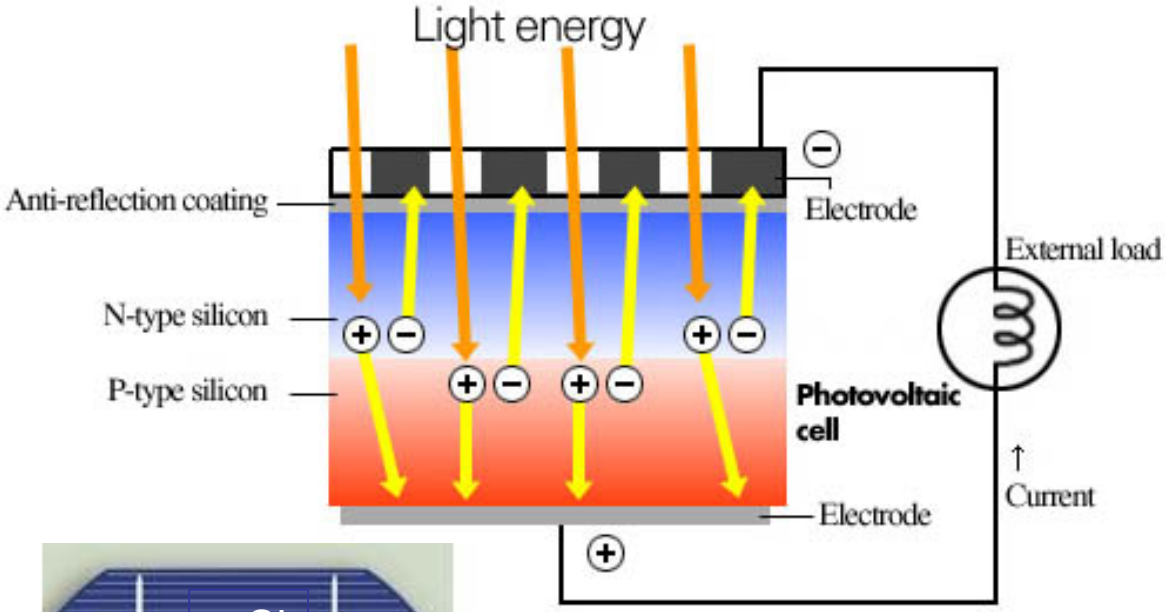
Energia dal vento

- La capacità di energia eolica installata in Europa a fine 2025 è di circa 300 GW, per una produzione annua di ~465 TWh di elettricità (circa il 18% della produzione totale).
- Il paese leader è la Germania (25% del totale in EU). In Danimarca, il 50% dell'energia elettrica è di fonte eolica. Gran parte della produzione è onshore.

Evolution of cumulative wind capacity in Europe
Source: Wind energy in Europe, 02/2026
WindEurope, http://windeurope.org



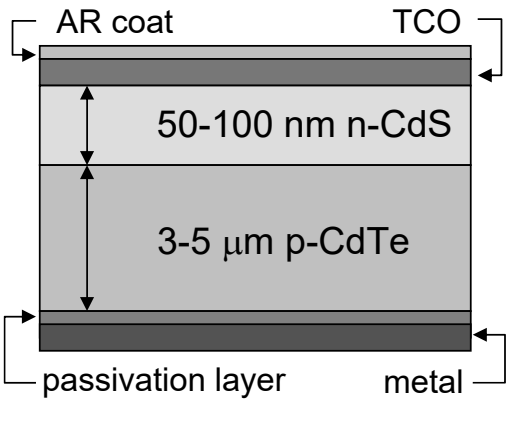
Struttura di una cella fotovoltaica



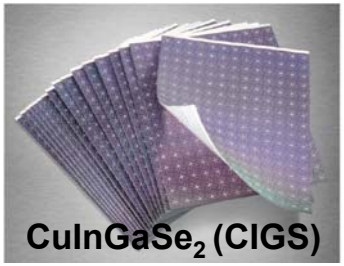


Silicon (wafer-based)

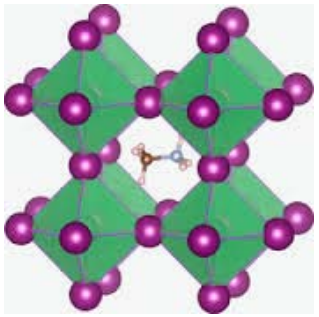
CdTe

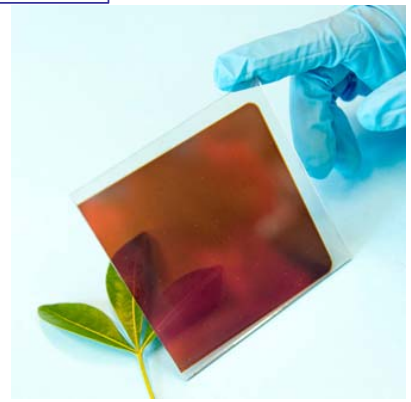






Perovskite

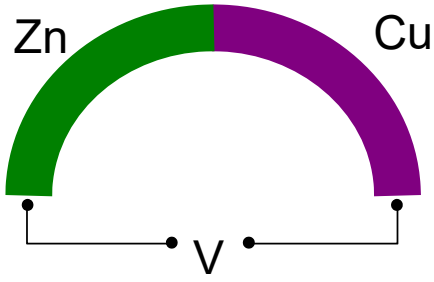




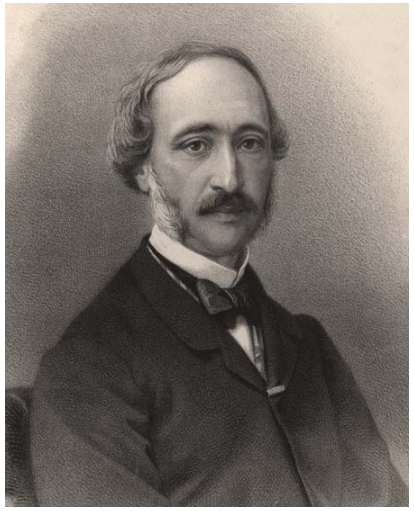
Volta e fotovoltaico…

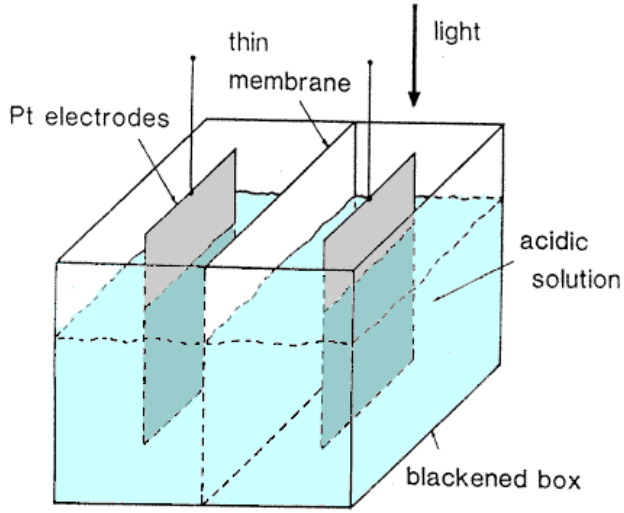
Effetto Volta (Alessandro Volta, Pavia, 1797) = potenziale di contatto fra due metalli diversi





Effetto fotovoltaico (Alexandre E. Becquerel, Paris, 1839) = differenza di potenziale indotta dall'illuminazione in una cella elettrolitica. Oggi: in una giunzione p-n a circuito aperto

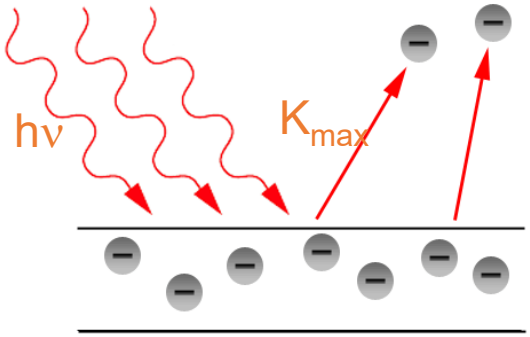




Effetto fotoelettrico



L' ***effetto fotoelettrico, scoperto da*** Heinrich Hertz nel 1887, consiste nell'estrazione di elettroni da un materiale come conseguenza dell'assorbimento di radiazione elettromagnetica.



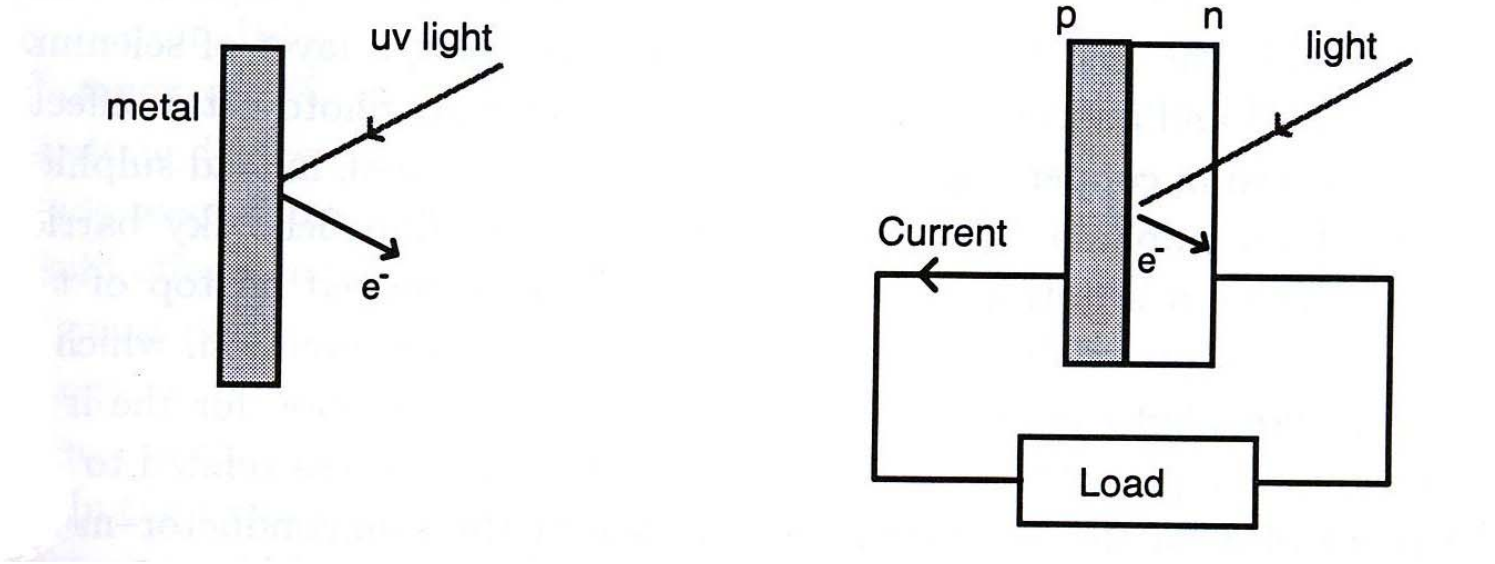
E' caratterizzato da una ***frequenza di soglia*** ν_{th} : solo la radiazione con frequenza $\nu > \nu_{th}$ viene assorbita e produce fotoelettroni.



Nella teoria sviluppata da Albert Einstein (1905), egli assume che la radiazione elettromagnetica consiste di ***quanti di luce***, o ***fotoni***, di energia $E = h\nu$, dove h è la costante di Planck. Solo i fotoni con energia $h\nu > h\nu_{th} \equiv W$ possono estrarre elettroni, dove W è la ***funzione lavoro***, cioè la minima energia necessaria per estrarre un elettrone (indipendentemente dall'intensità della radiazione).

L'effetto fotoelettrico è quindi evidenza della ***natura quantistica*** della luce.

Effetto fotoelettrico ed effetto fotovoltaico



Per generare una corrente in un carico (circuito esterno) a seguito della produzione di coppie elettrone-lacuna occorre una struttura asimmetrica → **giunzione p-n**

Celle fotovoltaiche e semiconduttori

1901- proprietà raddrizzatrici dei cristalli: silicio, SiC, PbS (galena), …

1930-1932: celle al selenio (efficienza < 1%)

1940: silicio ultra-puro, giunzioni p-n (radar a onde corte)

1947: transistor (AT&T Bell Laboratories)

1954: celle al silicio (AT&T Bell Laboratories, efficienza ~6%)

1954-1970: sviluppo della tecnologia, applicazioni spaziali

1969-1980: Solar Power Corporation (Exxon) → riduzione dei costi

1973: primo shock petrolifero → intense ricerche su energie alternative

1986: crollo prezzi del petrolio → ridimensionamento ricerche su solare

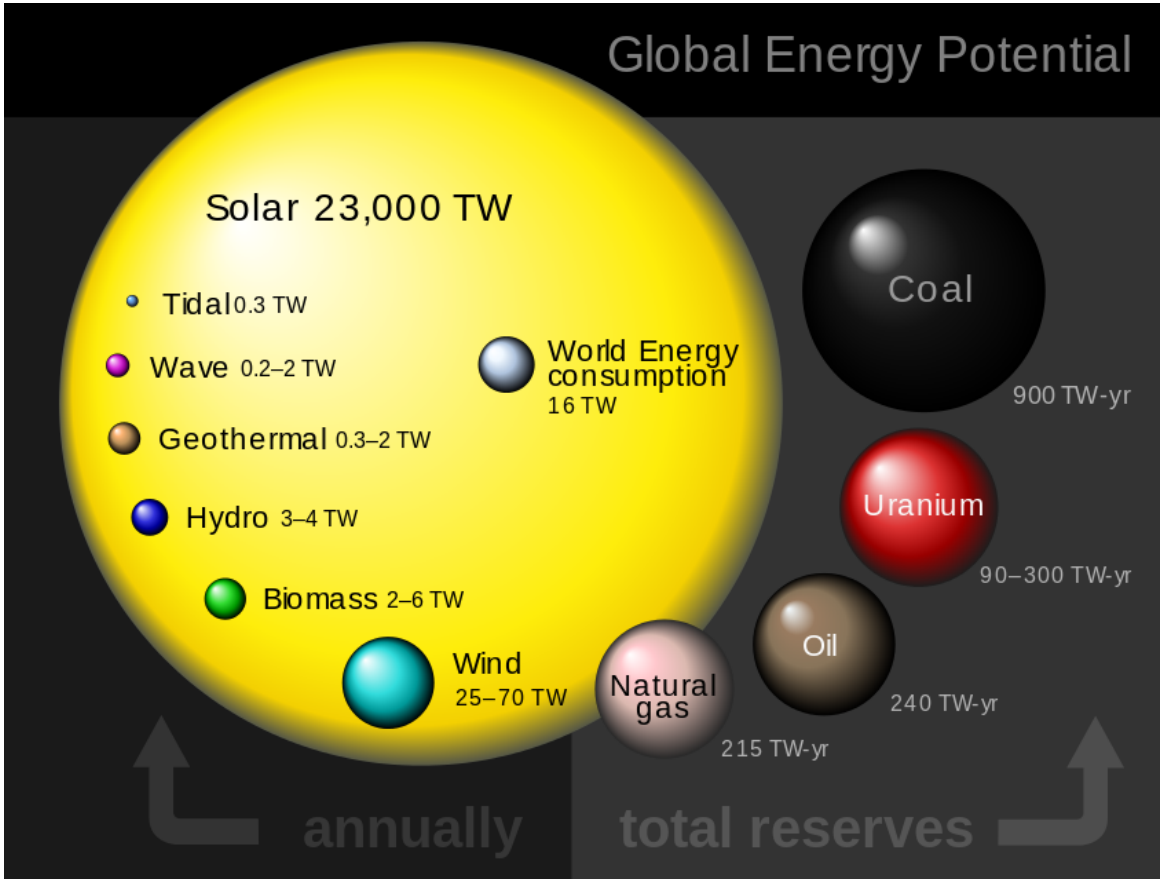
1995: cella solare al silicio di efficienza record (25%)

2000- incentivi, rapida crescita della potenza installata (D, J, USA, IT, Cina)

2026: secondo shock energetico…

Risorse energetiche: il potenziale

Energie rinnovabili



https://waitbutwhy.com/2015/06/the-deal-with-solar.html

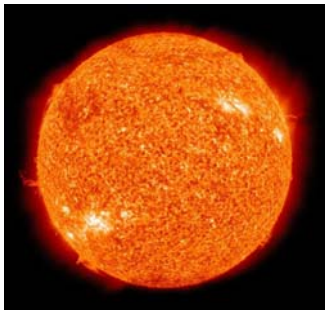
Combustibili fossili e nucleare

N.b. questa figura rappresenta schematicamente il *potenziale* delle diverse fonti di energia *rinnovabili*. Non va intesa come una rappresentazione accurata della disponibilità di combustibili fossili e nucleare.



San Francesco d’Assisi (1181-1226)

Laudato sie, mi’ Signore, cum tucte le tue creature,
spetialmente messor lo frate sole,
lo qual’è iorno, et allumini noi per lui.
Et ellu è bellu e radiante cum grande splendore:
de te, Altissimo, porta significatione.



Laudato si’, mi’ Signore, per frate vento
et per aere et nubilo et sereno et onne tempo,
per lo quale a le tue creature dài sustentamento.

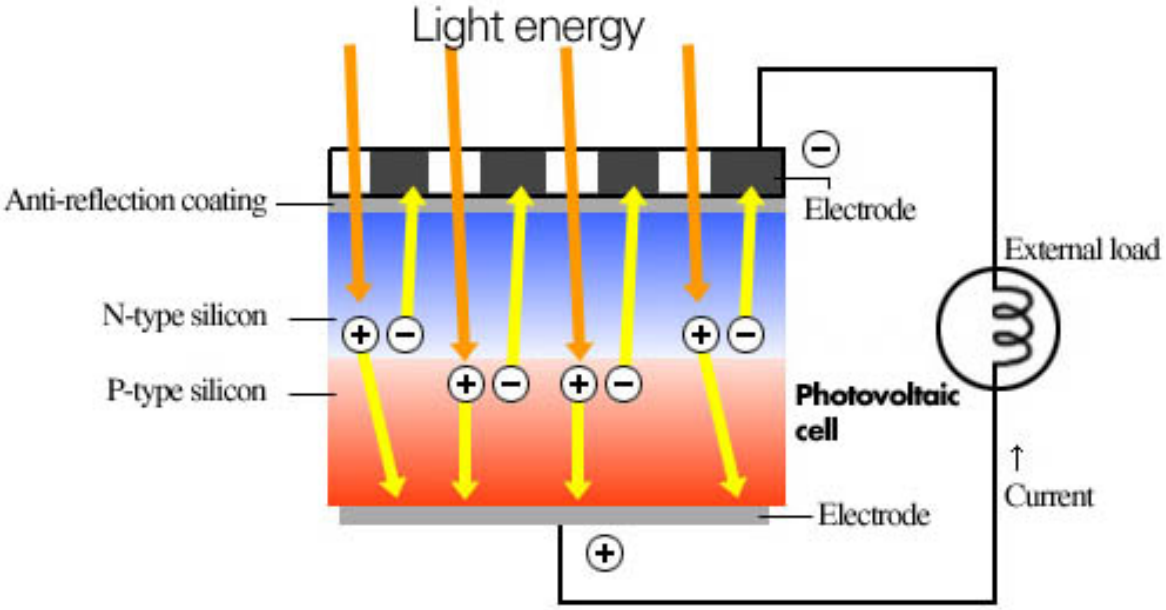


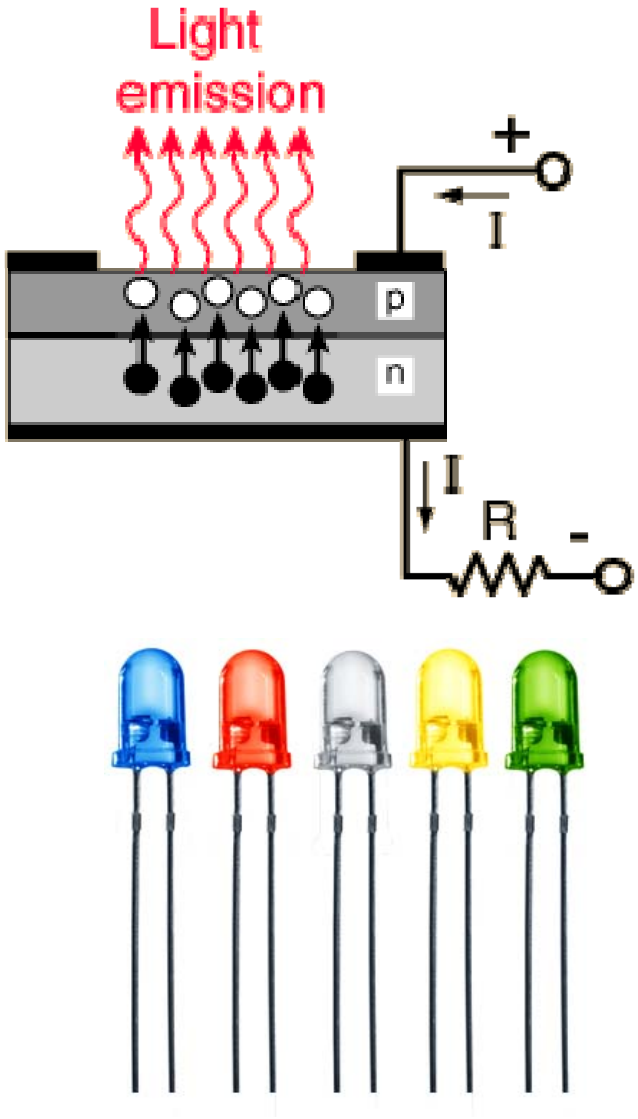
Laudato si’, mi’ Signore, per sor’acqua,
la quale è multo utile et humile et
pretiosa et casta.



Laudato si', mi' Signore, per sora nostra
matre terra, la quale ne sustenta et
governa, et produce diversi fructi con
coloriti flori et herba.

Celle fotovoltaiche e LED…

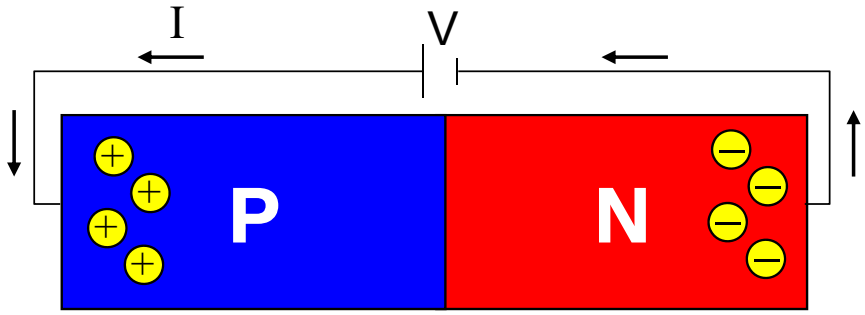




Una cella fotovoltaica è una giunzione p-n (o diodo) che viene illuminata e produce corrente elettrica → ***energia rinnovabile***

Un LED (light-emitting diode) è una giunzione p-n o diodo, che emette luce quando viene alimentato con una corrente → ***efficienza energetica***

LED e laser a semiconduttore: giunzione pn (con composti III-V: GaAsP, InGaN)



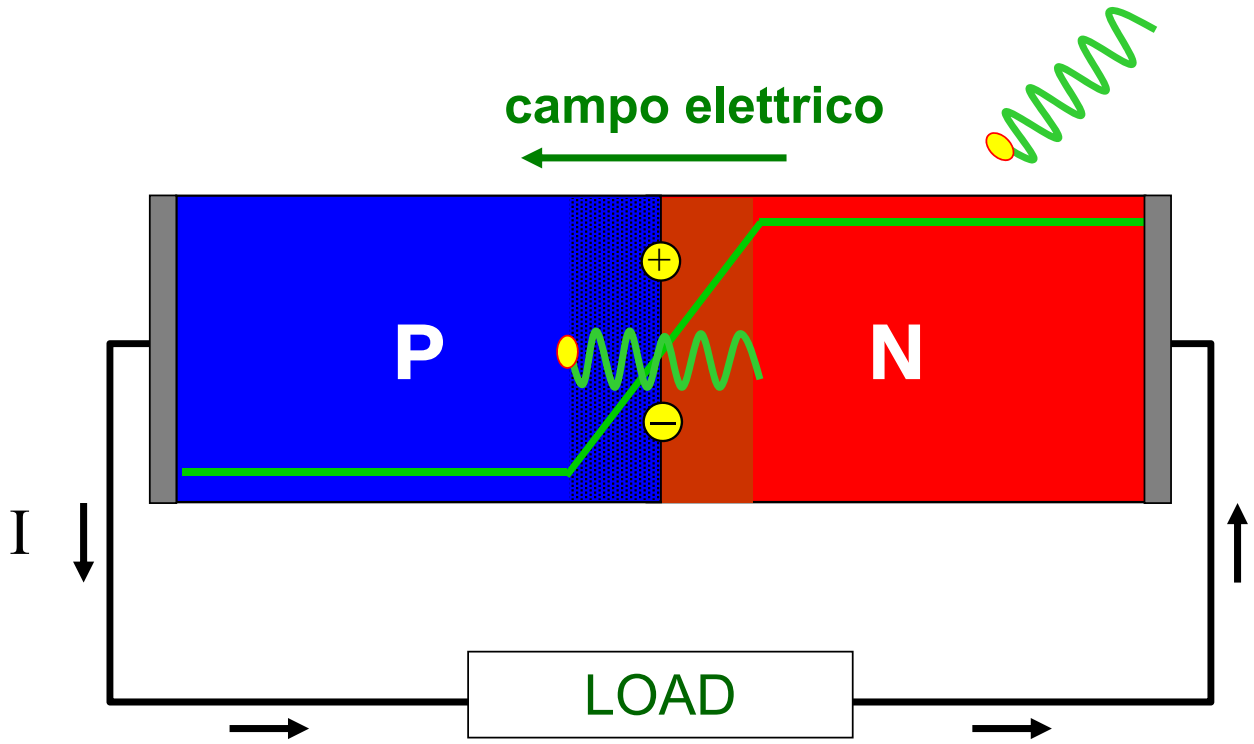








Cella fotovoltaica: giunzione p-n illuminata



Una cella fotovoltaica funziona in maniera opposta a un LED o un laser a semiconduttore: quando viene illuminata, la corrente prodotta ha il verso della corrente inversa del diodo.

La fotocorrente è dovuta alla differenza di potenziale fra i due lati della giunzione, che è in sostanza l'effetto Volta fra due semiconduttori drogati.

Celle fotovoltaiche di silicio (wafer)

Silicio mono-cristallino





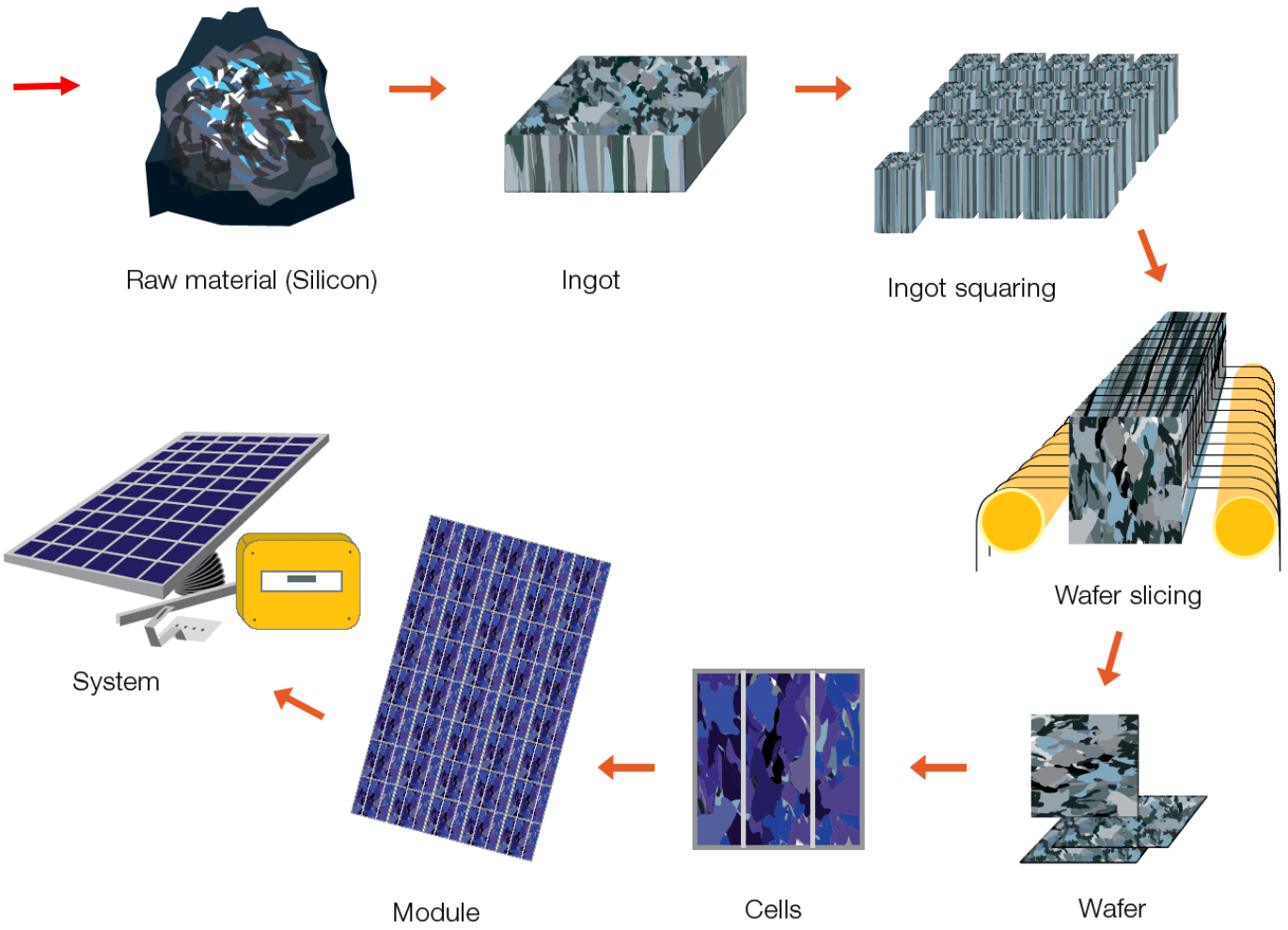
Silicio poli-cristallino

Le celle fotovoltaiche basate su fette (wafer) di silicio coprono circa il 97% del mercato mondiale del fotovoltaico

Catena industriale



SiO_2



Silicon production

1) Metallurgical silicon (98-99% purity): reaction of silica with carbon at high T,

$$SiO_2 + C \rightarrow Si + CO_2$$

2) Chemical purification: distillation of silicon compounds (tri-chloro-silane, silicon tetra-chloride) followed by high-temperature reaction

$SiCl_4 + 2\ Zn \rightarrow Si + 2\ ZnCl_2$ (DuPont method, no more in use)

$2\ HSiCl_3 \rightarrow Si + 2\ HCl + SiCl_4$ (Siemens method)

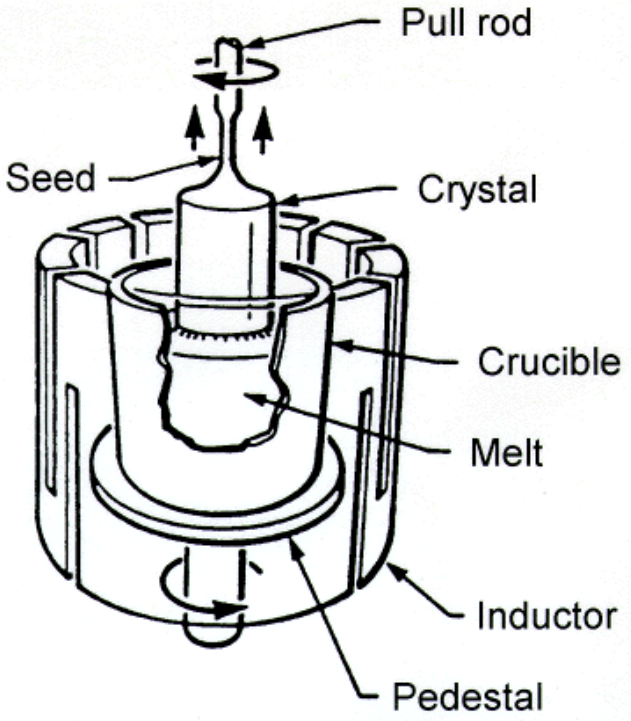
Silicon material produced with these or similar processes is called **polysilicon** and it has high purity degree (impurities $<10^{-9}$).

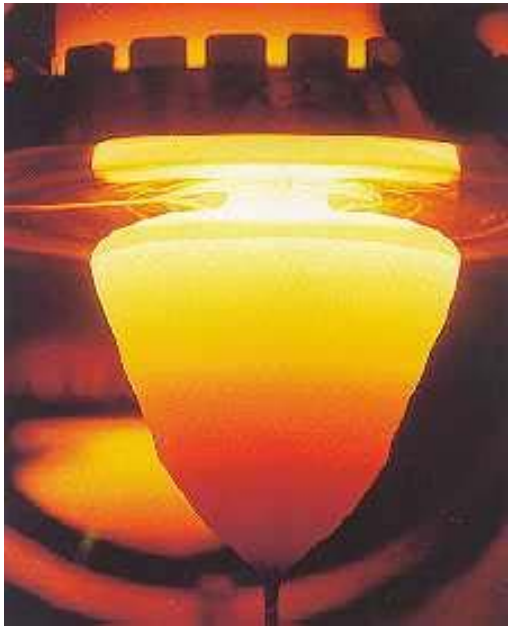
Monocrystalline silicon (ingots) is then obtained with Czokralski method.

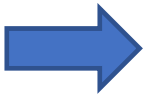
poly-Silicon rod



Czochralski growth



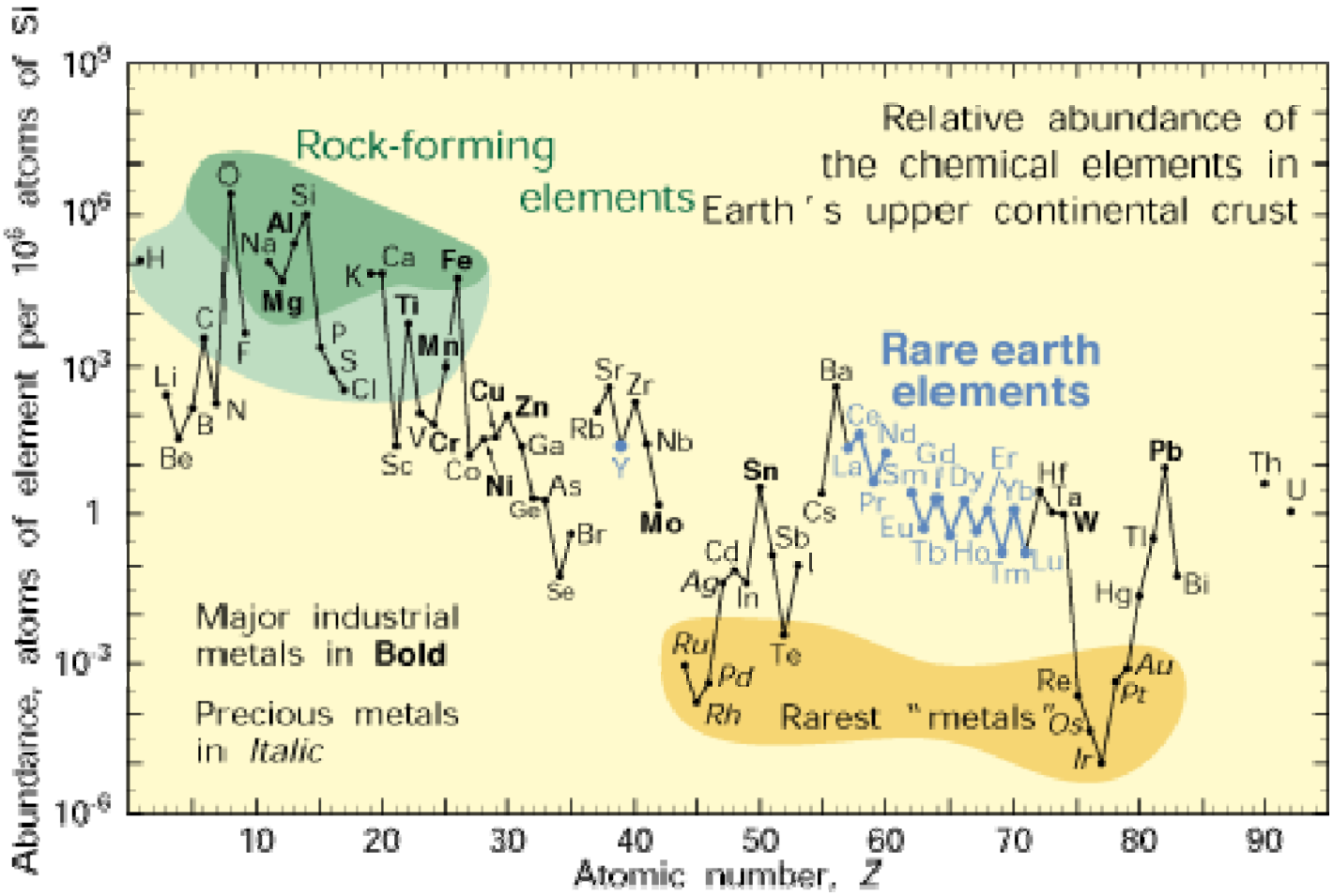




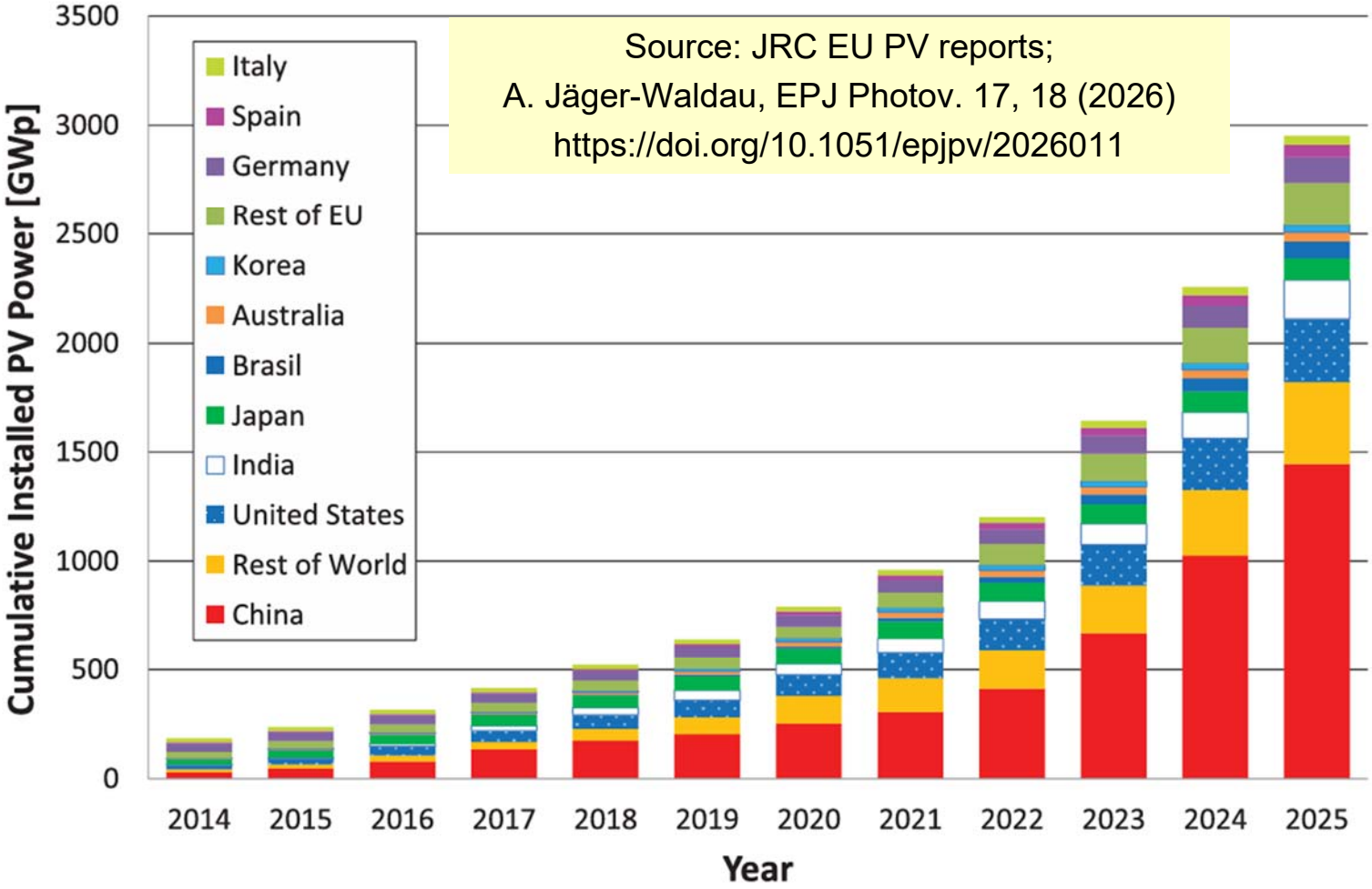


Silicon ingot

Abbondanza degli elementi nella crosta terrestre

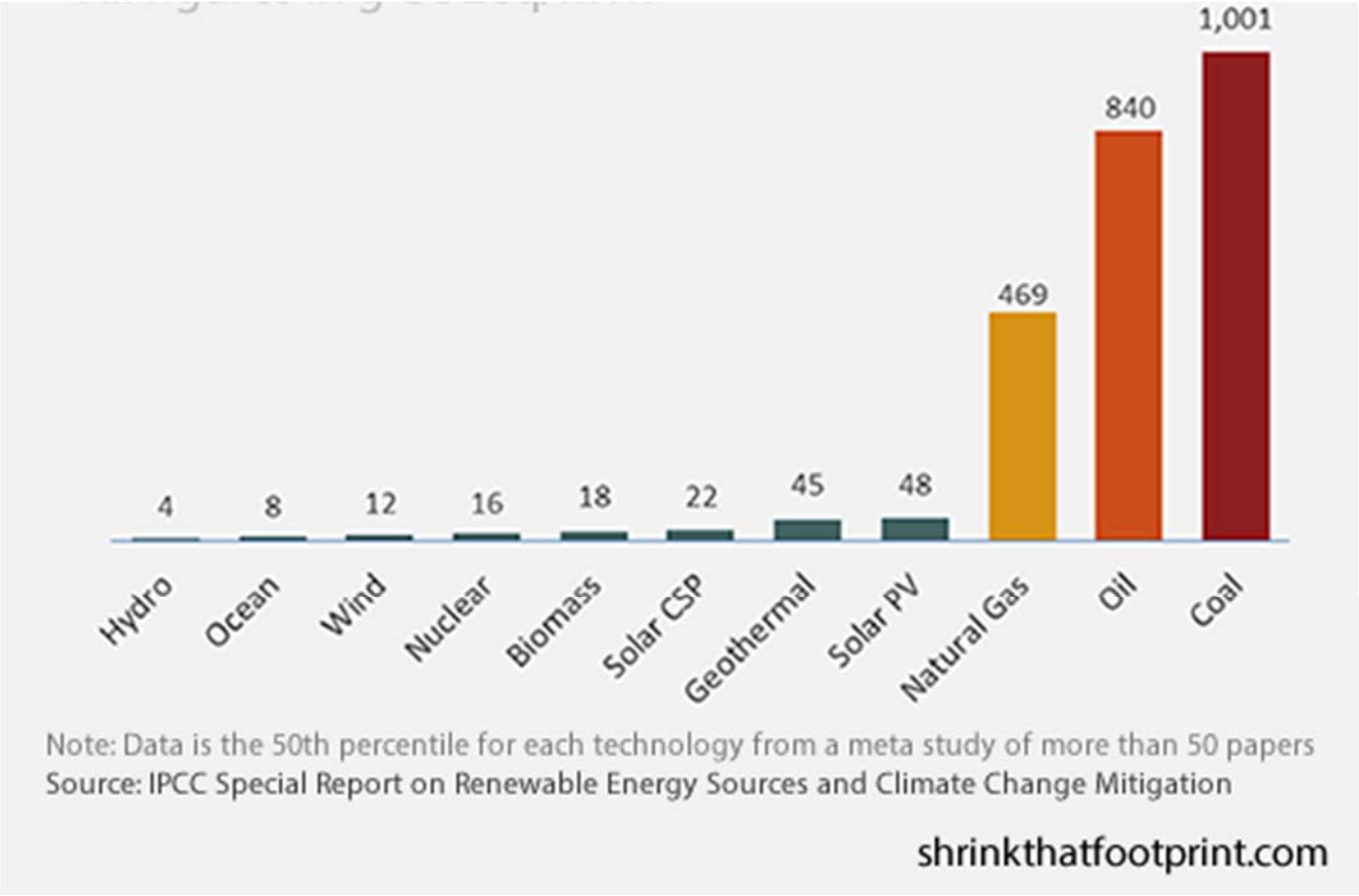


Potenza fotovoltaica cumulativa



Il tasso di crescita annuo è vicino al 30%, con un tempo di raddoppio di circa 2-3 anni e una continua riduzione dei costi grazie all'economia di scala

Impatto ambientale: gas serra in g CO_2-eq/kWh



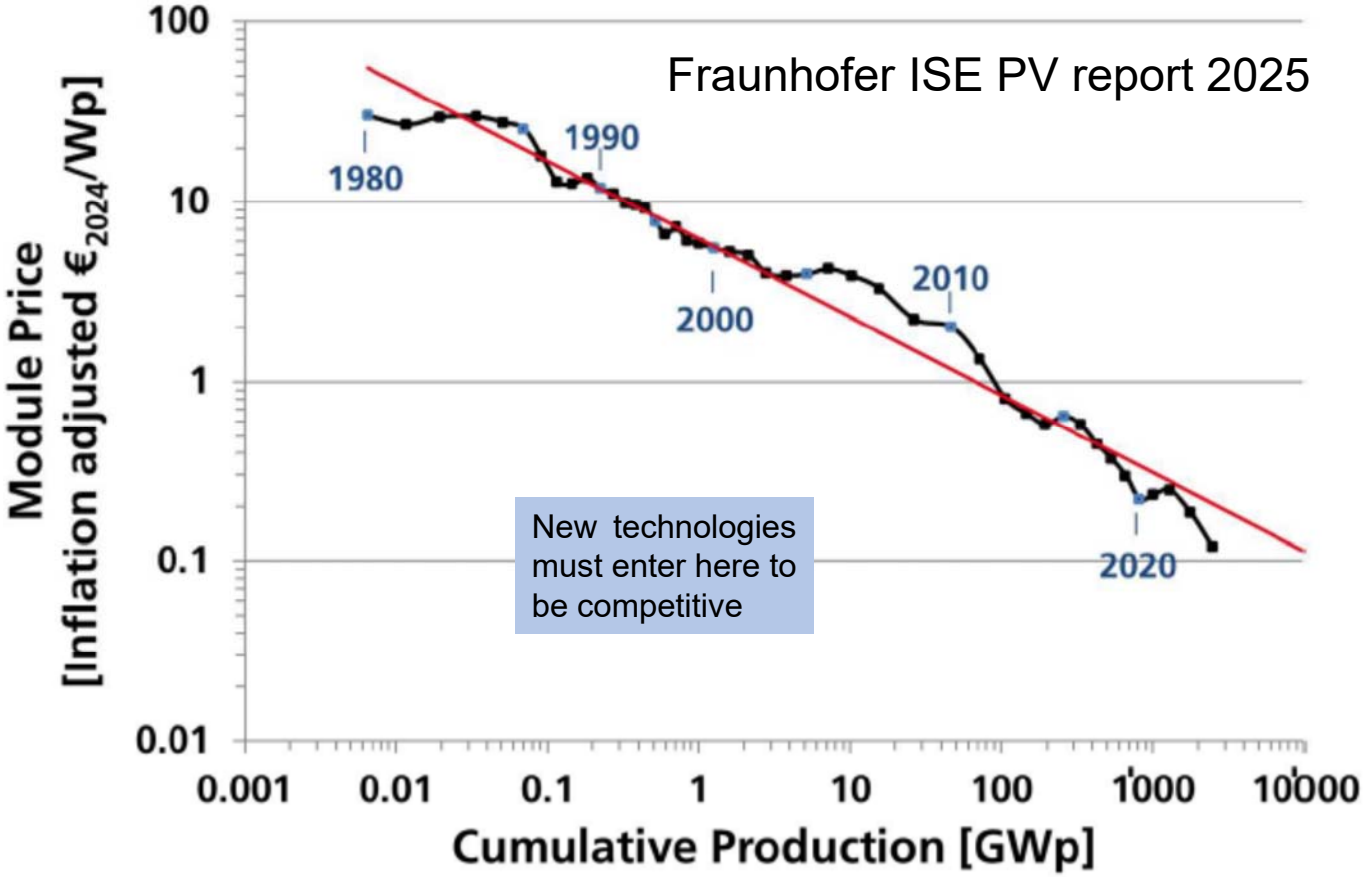
IPCC study: http://www.ipcc-wg3.de/report/IPCC_SRREN_Annex_II.pdf

https://www.vrec.ca/blog/2014/11/05/photovoltaic-energy-better-bcs-grid/

Sia le energie rinnovabili sia il nucleare portano ad una sostanziale riduzione delle emissioni rispetto ai combustibili fossili.

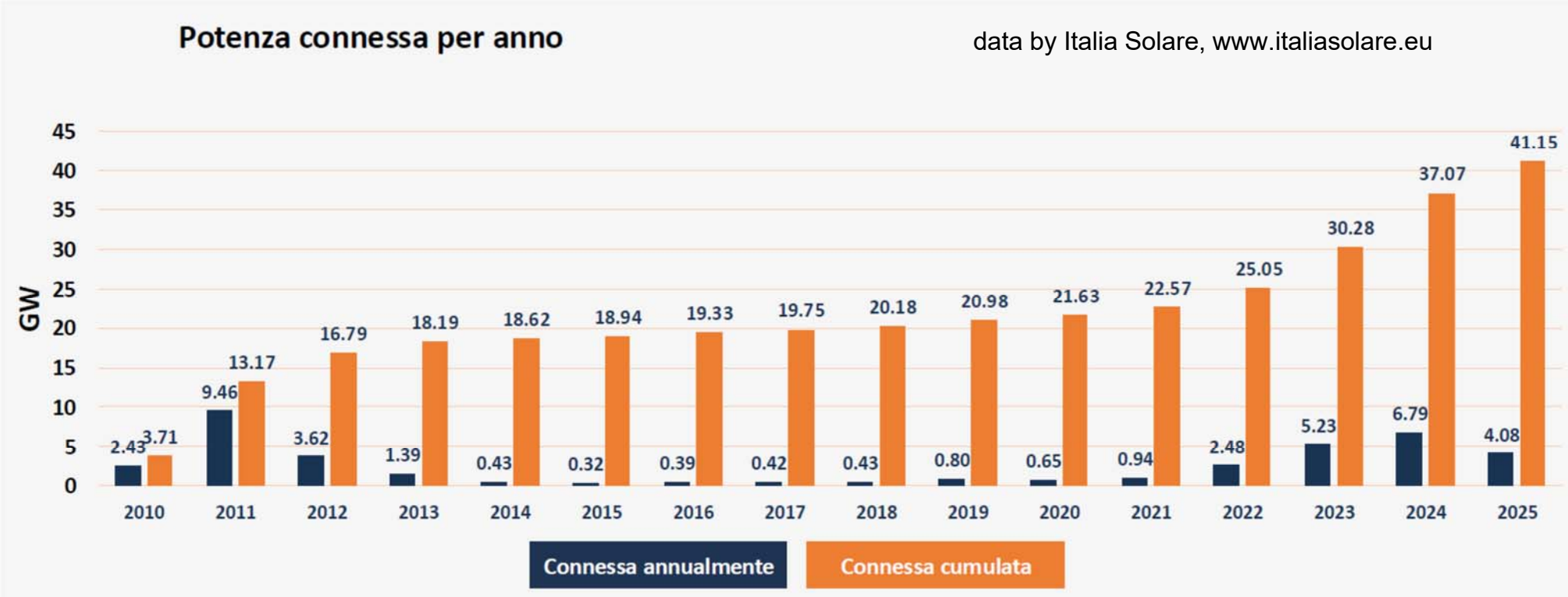
L'emissione di gas serra per il fotovoltaico è legata all'energia spesa durante la fabbricazione (finora in gran parte da fonti fossili, in futuro anche da fonti rinnovabili).

Curva di apprendimento storico ($/W)



Il costo dei moduli fotovoltaici diminuisce del 24.4% quando la produzione totale raddoppia, grazie all'economia di scala e all'aumento di efficienza. Costo attuale: 3-6 c€/kWh e parità di rete raggiunta in quasi tutta la UE.

Il fotovoltaico in Italia



In Italia a fine 2025 sono installati ~40 GW di moduli fotovoltaici, che contribuiscono il 13% dell'energia elettrica consumata (~300 TWh/anno) e oltre il 50% della potenza di picco (max ~56 GW).

In Europa sono installati ~300 GW di moduli fotovoltaici
→ ~10% dell'energia elettrica consumata (~2800 TWh/anno).

Il prezzo dell'energia elettrica

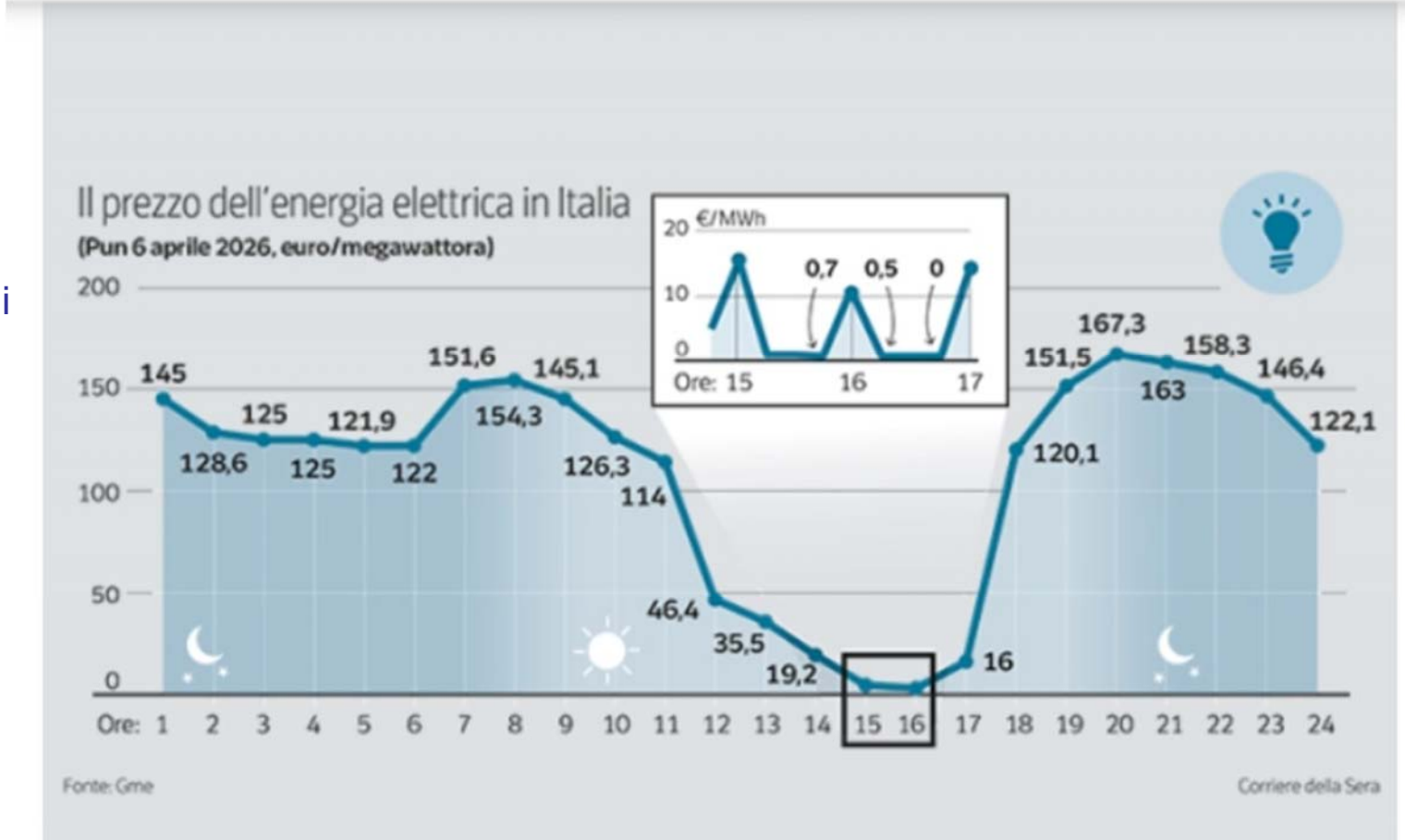
CORRIERE DELLA SERA 150 anni 1876

Corriere 11/04/2026

n.b. 100 €/MWh = 10 c€/kWh

Il prezzo dell'energia elettrica segue fasce orarie e può diventare nullo nelle ore centrali della giornata, in condizioni di buona insolazione.

In caso di sovrapproduzione, l'energia in elettrica in eccesso viene immagazzinata nei sistemi di accumulo (ossia pompando acqua nei bacini idroelettrici, oppure nelle batterie centralizzate).



Gli obiettivi dell'Unione Europea nel piano NextGenerationEU: "A European Green Deal"

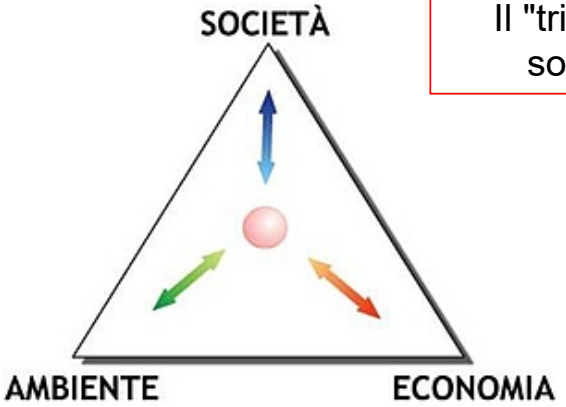
- Ridurre le emissioni di gas serra almeno del 55% (rispetto al 1990) entro il 2030

Ciò richiede di aumentare la quota di energie rinnovabili sull'energia primaria almeno al 32% entro il 2030

- Diventare "climate neutral" (zero emissioni nette di CO_2) entro il 2050

E nello stesso tempo

- Crescita economica disaccoppiata dall'uso delle risorse
- Nessuna persona e nessun luogo deve essere lasciato indietro

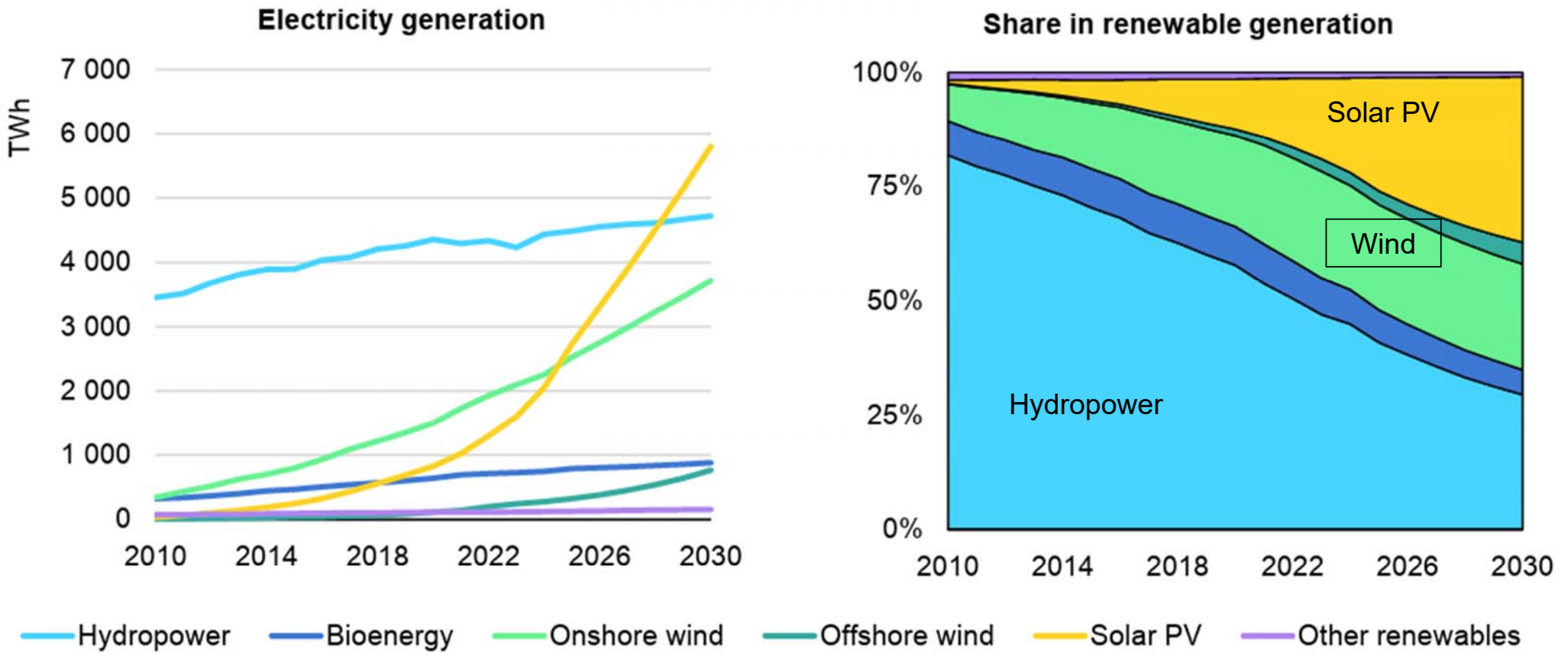


Il "triangolo della sostenibilità"

https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

Energia elettrica da fonti rinnovabili nel mondo

IEA (International Energy Agency), Renewables 2025

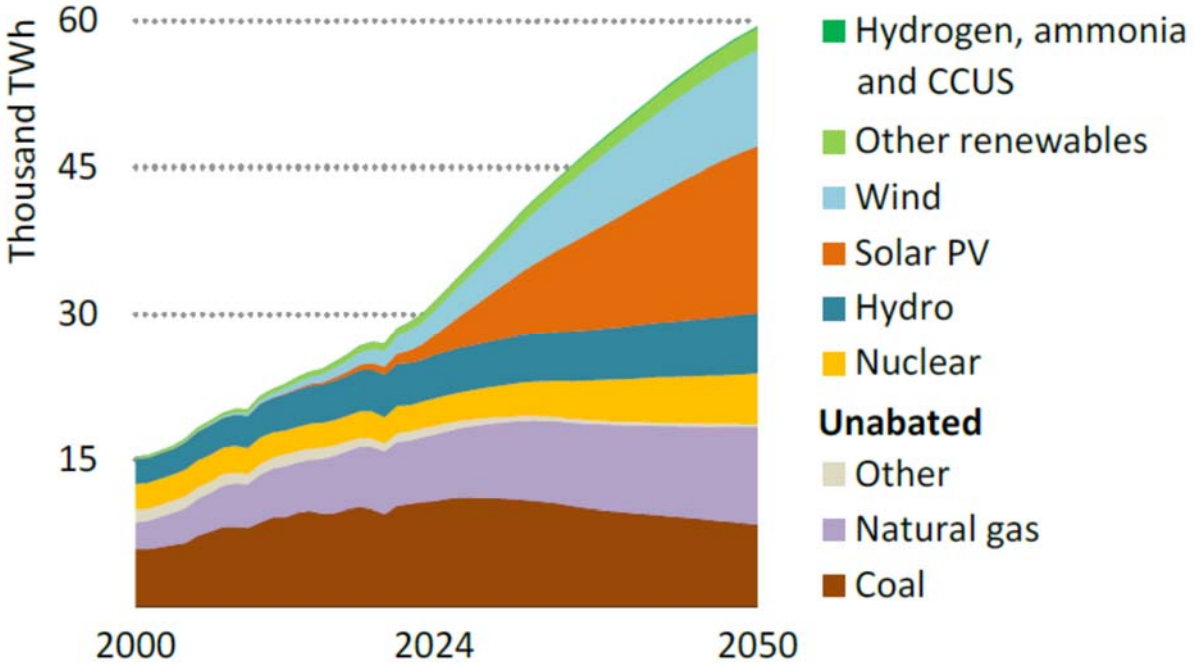


IEA. CC BY 4.0.

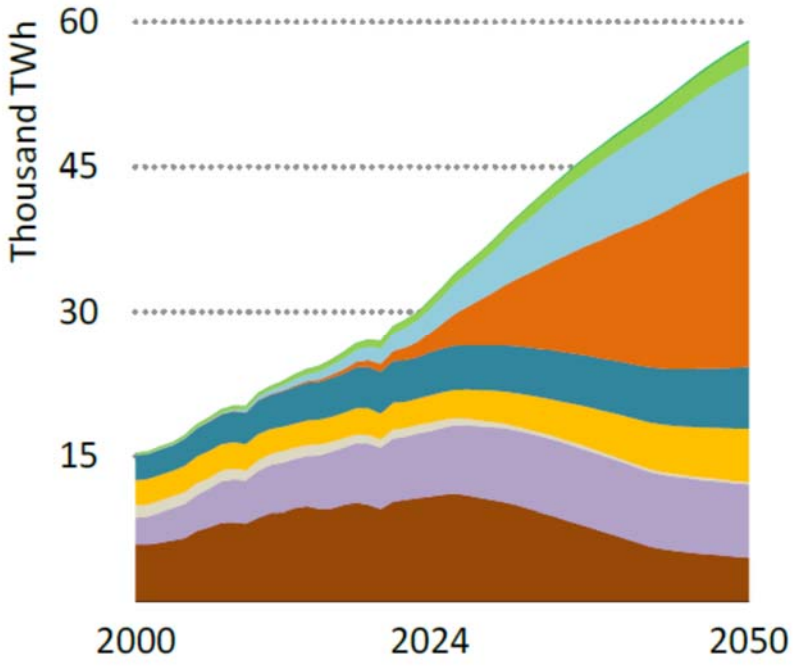
Global electricity generation in two scenarios

IEA World Energy Outlook, 2025

CPS – Current Policies Scenario

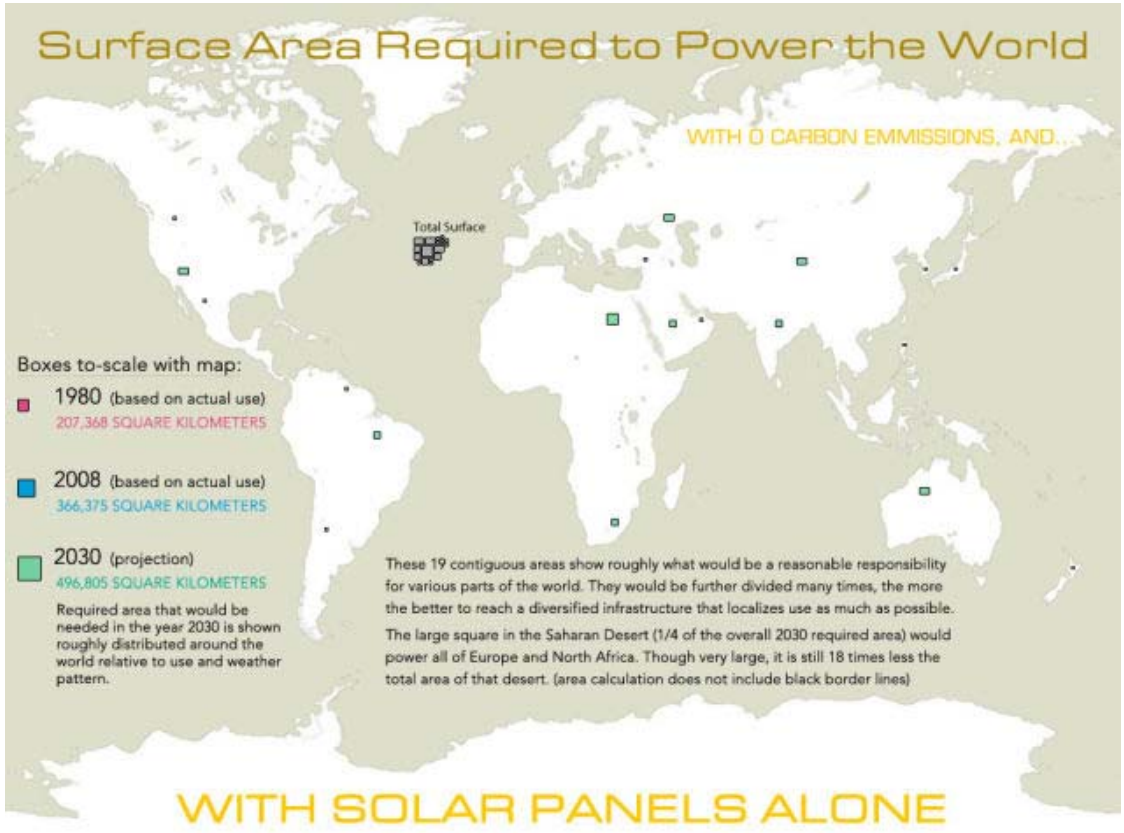


STEPS – Stated Policies Scenario



Lo sviluppo del solare fotovoltaico, dell'eolico e del nucleare riducono l'utilizzo del carbone e ridisegnano il mix energetico

Quanta superficie sarebbe necessaria per produrre con il fotovoltaico "tutta" l'energia consumata?



Mondo: ~0.3% delle terre emerse
Italia: ~ 2% del territorio nazionale

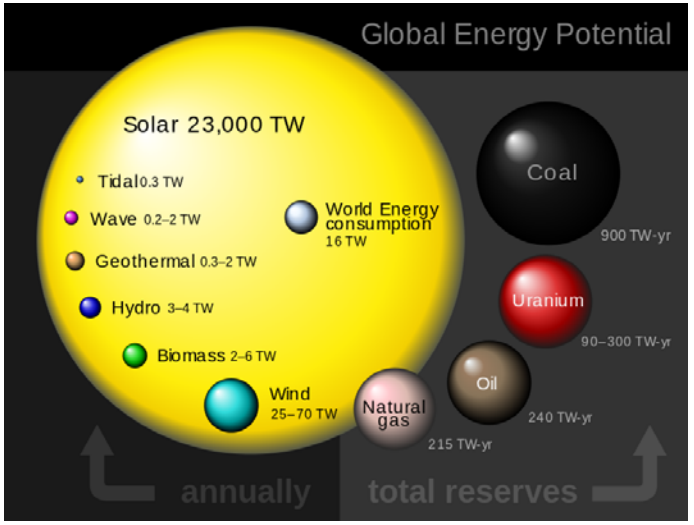
Però non è così semplice: pur restando molto sotto ai limiti fisici, il problema dell'energia solare ed eolica sta nell' **intermittenza della fonte** → *mix energetico, sistemi di stoccaggio, smart grids*



Pixabay
ArtsyBee

Potenziale / fattore di capacità (o di carico)

Un sistema energetico stabile deve avere un **mix bilanciato** di fonti, sia continue sia intermittenti, oltre a **sistemi di accumulo**



Fonte	Fattore di capacità	Ore di lavoro/anno (1 anno = 8760 ore)	GWh prodotti da 1 GW installato
Nucleare	0.90	~ 8000	8000
Idroelettrico*	0.40	~ 3500	3500
Eolico*	0.45	~ 4000	4000
Solare*	0.18	~ 1500	1500
Gas, carbone…	Su richiesta	Su richiesta (buffer)	Su richiesta

*Il fattore di capacità varia molto a seconda della zona e delle caratteristiche dell'impianto

Sistemi di accumulo dell'energia

L'energia solare e l'energia eolica sono ***intermittenti*** e la loro disponibilità è solo in parte prevedibile. Per essere utilizzate nella rete elettrica, quando superano una quota significativa della produzione, si rendono necessari ***sistemi di stoccaggio***: pumped hydro, batterie (e idrogeno, aria compressa…)

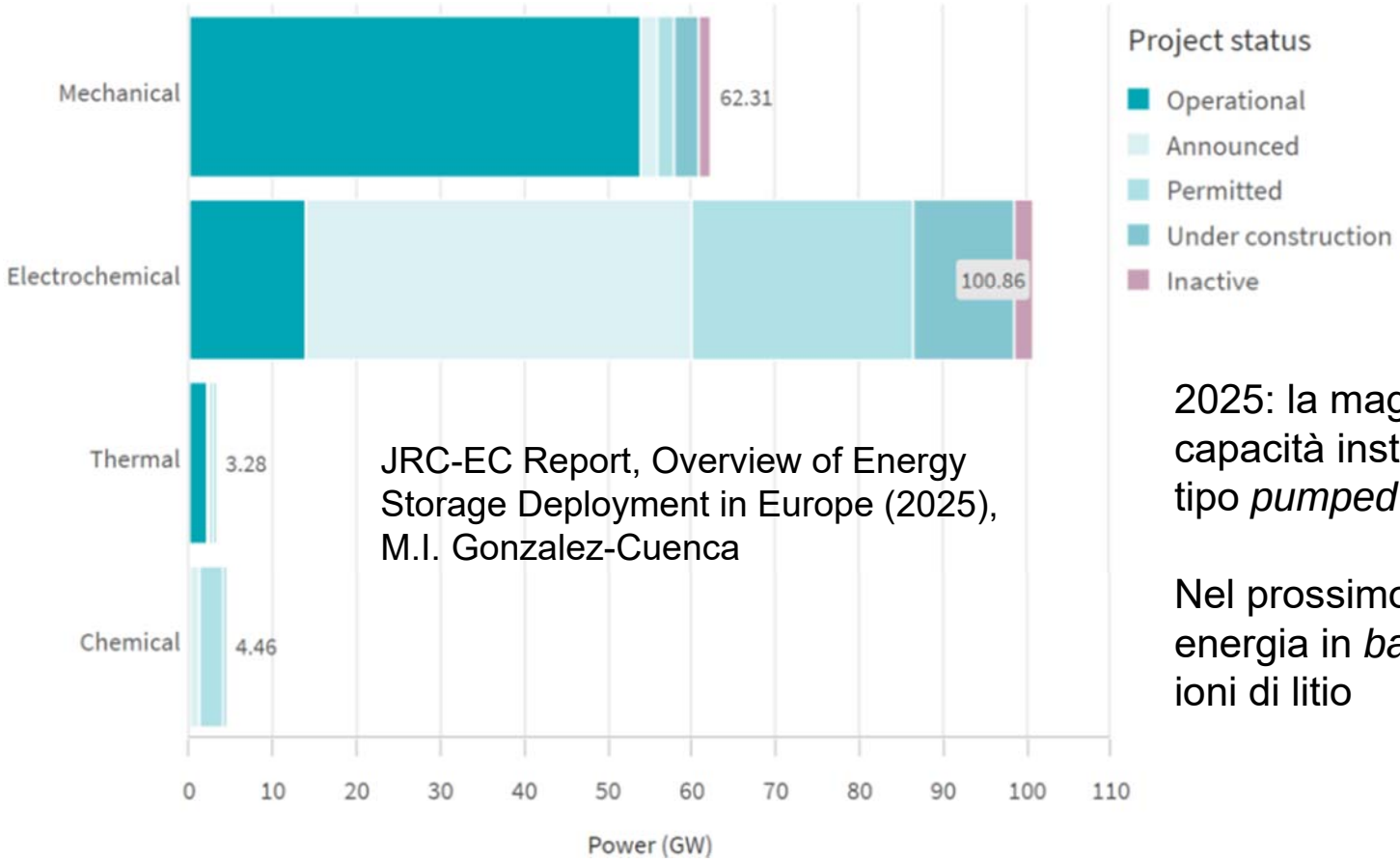


Immagine: Zenelgie Global

Stoccaggio (accumulo) dell'energia

Pumped hydro

Batteries

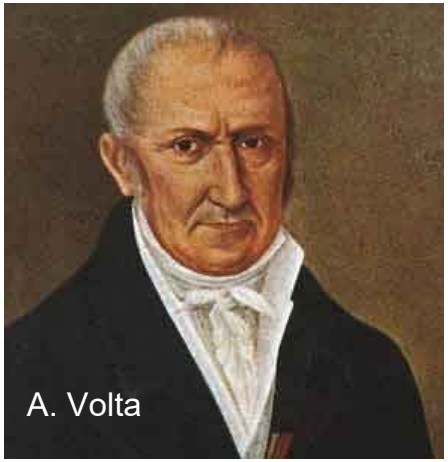


JRC-EC Report, Overview of Energy Storage Deployment in Europe (2025), M.I. Gonzalez-Cuenca

2025: la maggior parte della capacità installata di accumulo è di tipo *pumped hydro*

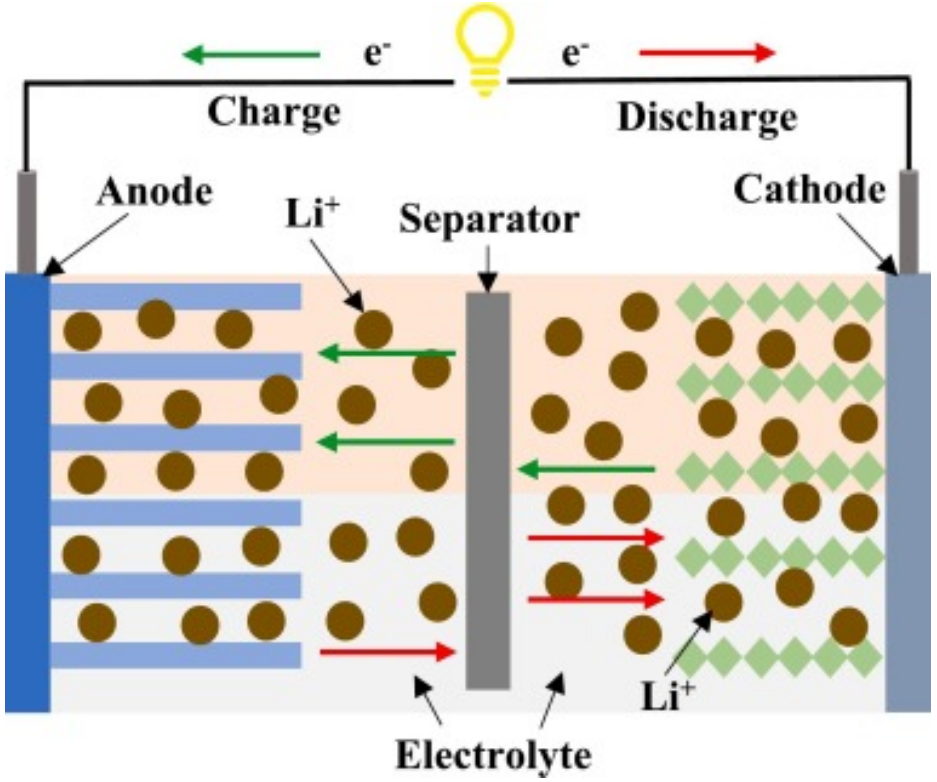
Nel prossimo futuro: accumulo di energia in *batterie*, soprattutto a ioni di litio

Pila di Volta / batteria ricaricabile


A. Volta



Batteria a ioni di Litio



Hasan et al, J. Energy Storage 120, 116511 (2025)
https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116511

Batterie ricaricabili (accumulatori)

Batteria piombo-acido
Anodo: Pb Catodo: PbO_2
Elettrolita: soluzione acquosa con acido solforico (H_2SO_4)



Batteria nichel-cadmio
Anodo: Cd Catodo: $Ni(OH)_2$
Elettrolita: soluzione acquosa con idrossido di potassio (KOH)



Batteria a ioni di Litio
Anodo: Grafite Catodo: ossidi metallici (Ni, Mn, Co)
Elettrolita: liquido o solvente organico a base di sali di Li



Accumulo su larga scala: i BESS
Battery Energy-Storage Systems



Celle (batterie a ioni di Li + inverter + trasformatori + sistemi ausiliari)

Elettrificazione dei consumi

Nel settore dei trasporti:

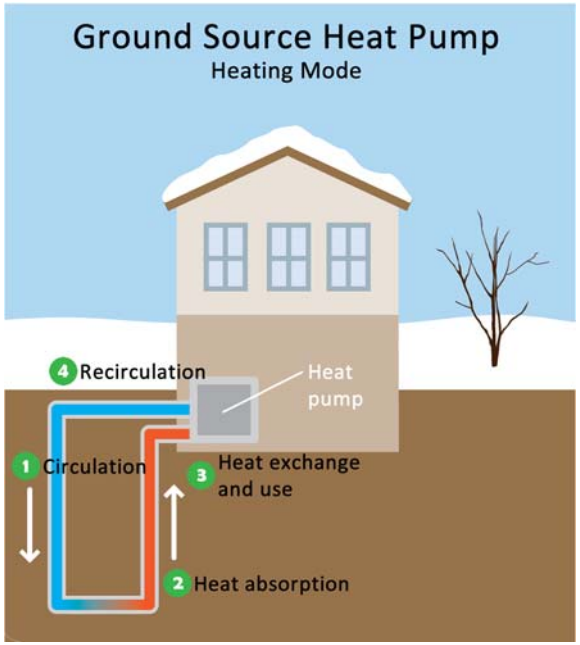
auto elettrica

(oppure: auto a idrogeno…)



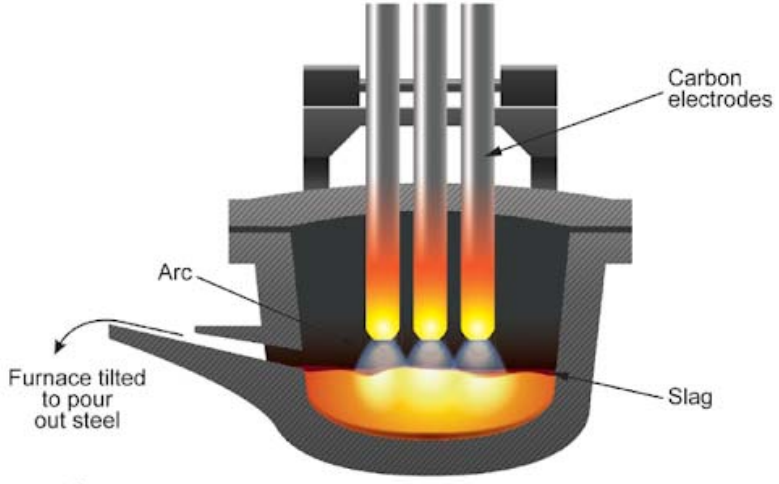
Nel settore del riscaldamento:

Pompe di calore (heat pumps)



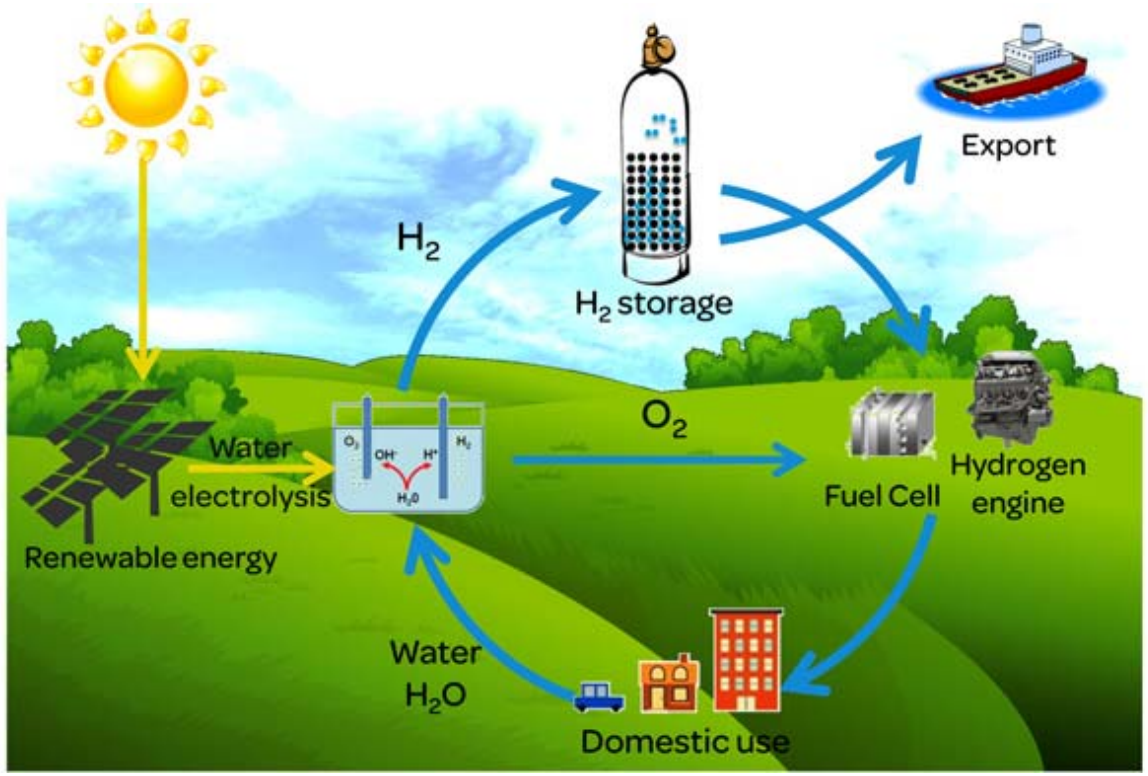
Nei settori industriali, ad es acciaierie:

Forni ad arco (Electric Arc Furnace, EAF)



https://www.cwbgroup.org/resources/articles/the-story-of-steel-part-2-the-creation-of-steel

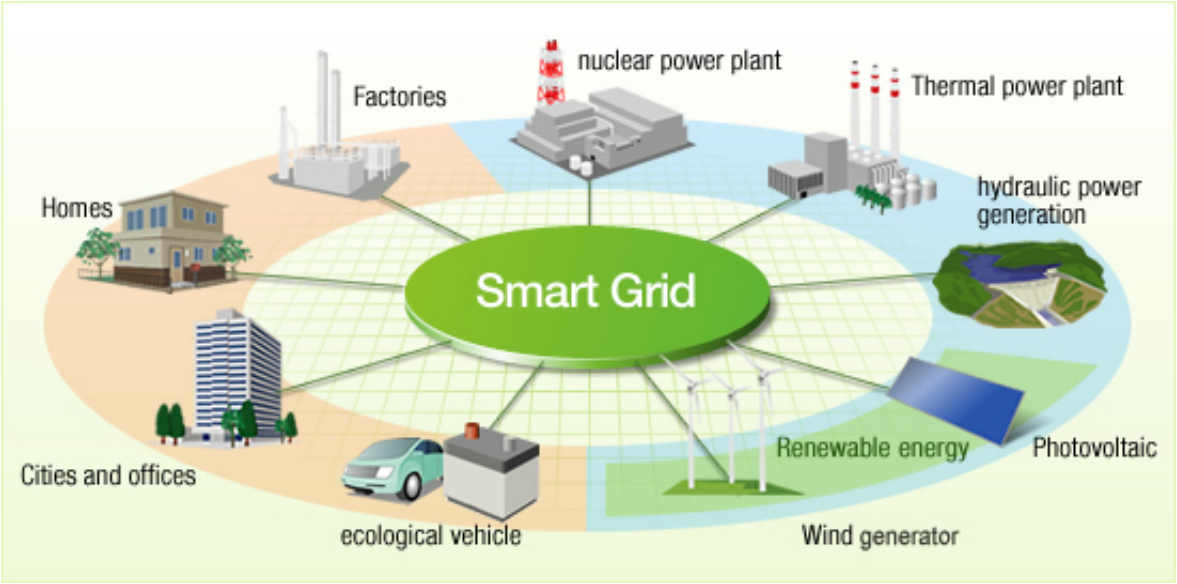
L’idrogeno come vettore energetico



Elettrolisi:
$2H_2O$ + energia → $2H_2+O_2$

Cella a combustibile:
$2H_2+O_2$ → $2H_2O$ + energia

Smart grids



Le ***smart grids*** sono reti intelligenti a controllo informatico che permettono di ottimizzare la distribuzione e il consumo di energia elettrica, minimizzando gli sprechi, integrando le fonti di generazione distribuita (energie rinnovabili) attraverso flussi bidirezionali e aumentando le quote di autoconsumo.

Il concetto di *smart grid* porta a ripensare completamente la rete di distribuzione elettrica, che era stata pensata per poche centrali di produzione e con flussi unidirezionali.

Conclusioni

- Stiamo vivendo la transizione del sistema energetico, da quello basato sulle fonti fossili ad alta emissione di CO_2, a quello futuro dettato dalla sostenibilità (low CO_2 emission)

- Sono necessari
  - mix energetico (baseload nucleare/gas + rinnovabili)
  - sistemi di accumulo: pumped hydro + batterie (+ idrogeno, …)
  - elettrificazione dei consumi
  - efficienza energetica
  - smart grids…

- Fra le fonti rinnovabili, **fotovoltaico** (in primis) ed eolico sono quelle a maggiore potenziale, le uniche con grandi possibilità di espansione sia a breve sia a lungo termine.

- Fra i sistemi di accumulo; le **batterie ricaricabili** hanno il maggiore potenziale di espansione a breve-medio termine.