



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Congresso della Divisione di Didattica SCI 2025

7 - 8 dicembre 2025, Centro Interuniversitario di Bertinoro (CEUB)

Qualcosa di nuovo sotto il Sole, anzi d'antico Fonti energetiche rinnovabili e non solo

Alessandra Bonoli

**Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei
Materiali (DICAM)**

energiaperl'Italia

L'AQUILONE
Poesie di
Giovanni Pascoli

Letture: Diego De Nafai



C'è qualcosa di nuovo oggi nel **sole**,
anzi d'antico: io vivo altrove,
e sento che sono intorno nate le viole.

Son nate nella selva del convento
dei cappuccini, tra **le morte foglie**
che al ceppo delle querce agita il vento.

Si respira una dolce **aria** che scioglie
le dure zolle, e visita le chiese
di campagna, ch'erbose hanno le soglie:

un'aria d'altro luogo e d'altro mese
e d'altra vita: un'aria celestina
che regga molte bianche ali sospese...

Qualcosa di nuovo sotto il Sole: Storia dell'ambiente nel XX secolo

John Mc Neill

cos'è successo nel XX secolo?

la popolazione mondiale è quadruplicata
il consumo di energia è cresciuto di sedici volte
la produzione industriale di quaranta
il consumo d'acqua è cresciuto di nove volte
le emissioni di biossido di carbonio sono aumentate di tredici.

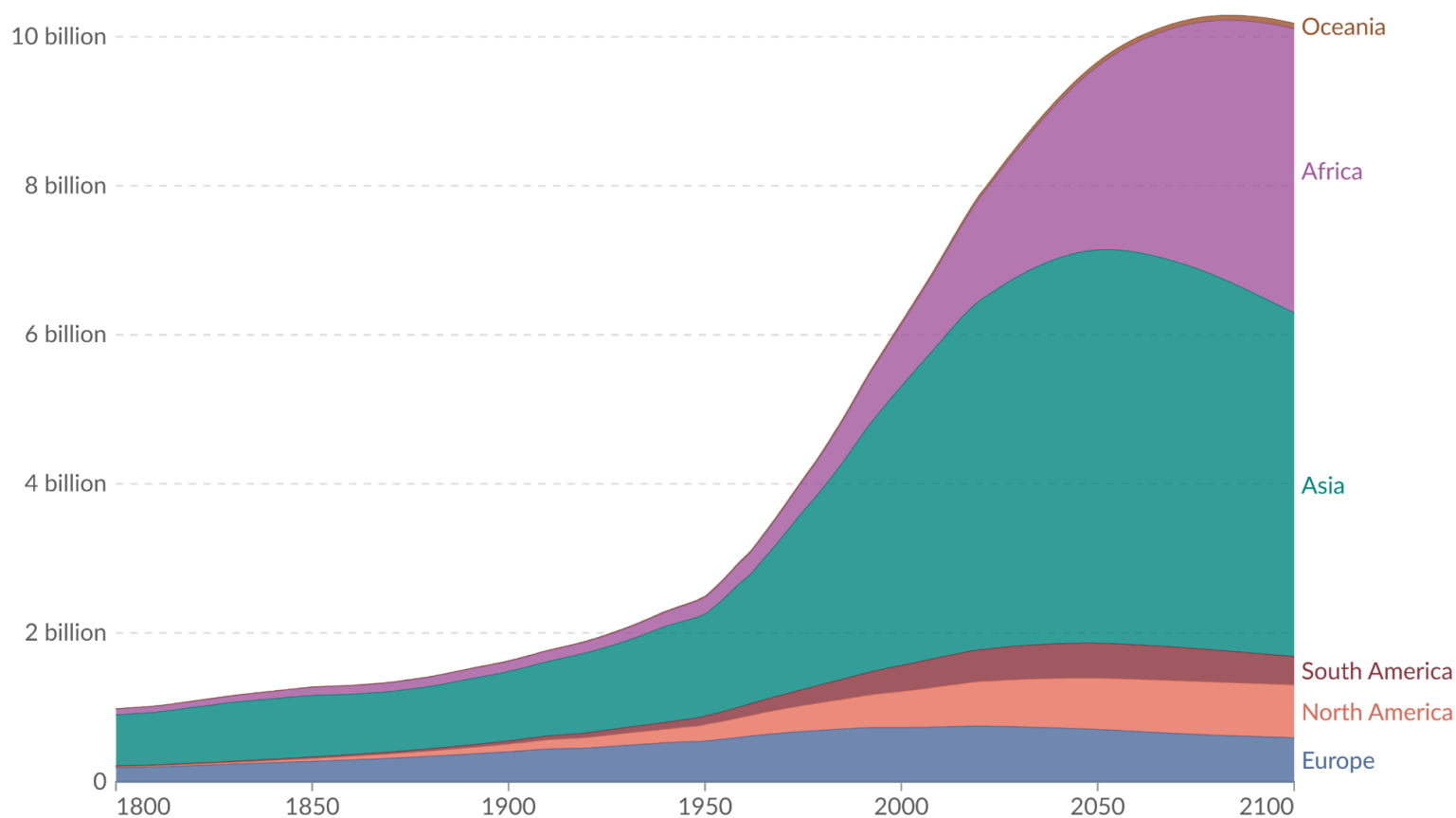
i progressi umani sono stati stupefacenti, per il benessere di una parte della popolazione mondiale, ma anche in termini ambientali il nostro impatto sul pianeta è stato unico

Assolutamente non paragonabile con nessun altro momento della nostra storia precedente.



Population by world region

Historic estimates with future projections based on the UN medium scenario¹.



Data source: HYDE (2023); Gapminder (2022); UN WPP (2024)

OurWorldinData.org/population-growth | CC BY

Note: Historical country data is shown based on today's geographical borders.

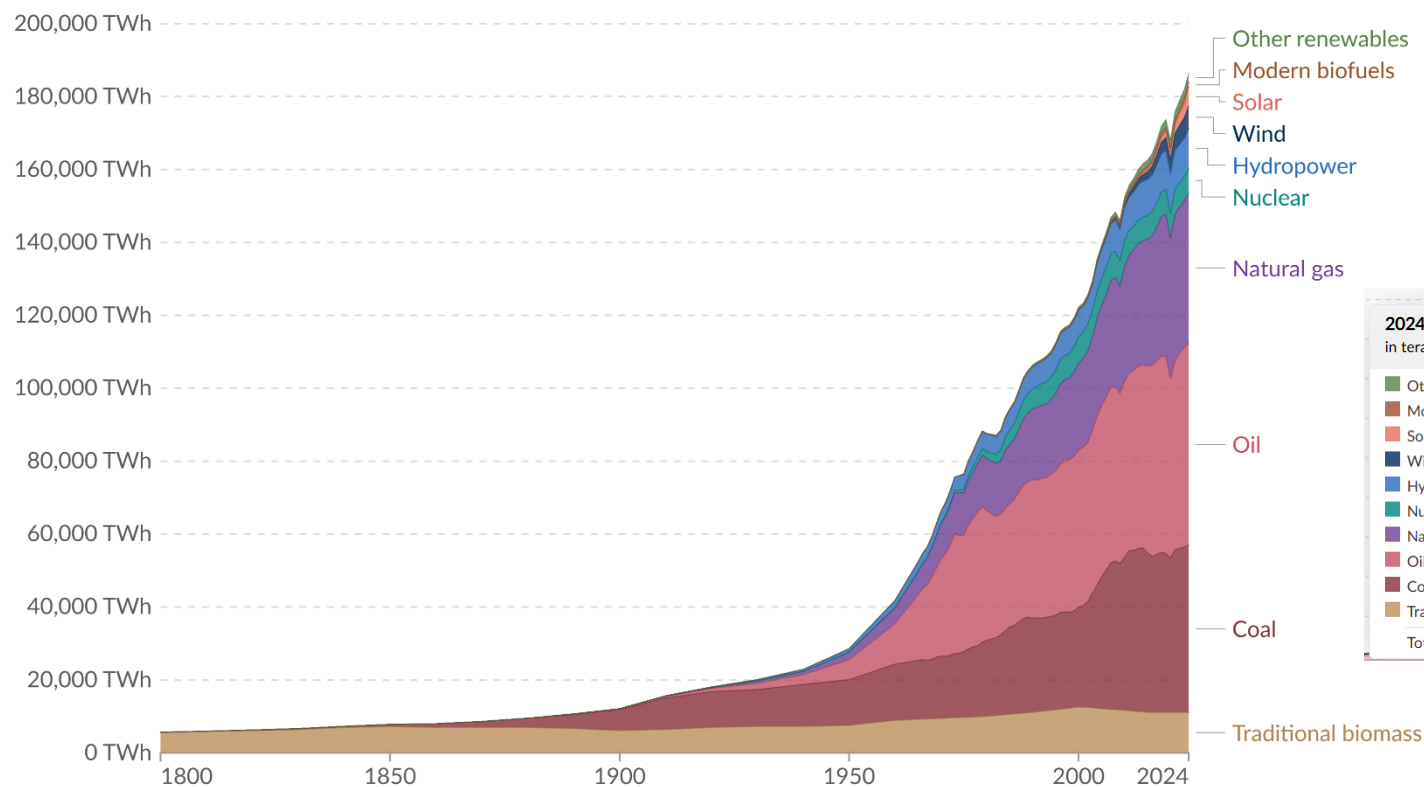
1. United Nations projection scenarios The United Nations' World Population Prospects include a range of projected scenarios for population change. These scenarios rely on different assumptions for fertility, mortality, and migration patterns to project different demographic futures.

[Read more on population.un.org](https://population.un.org/)

Global primary energy consumption by source

Our World
in Data

Primary energy¹ is based on the substitution method² and measured in terawatt-hours³.



Data source: Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2025); Smil (2017)

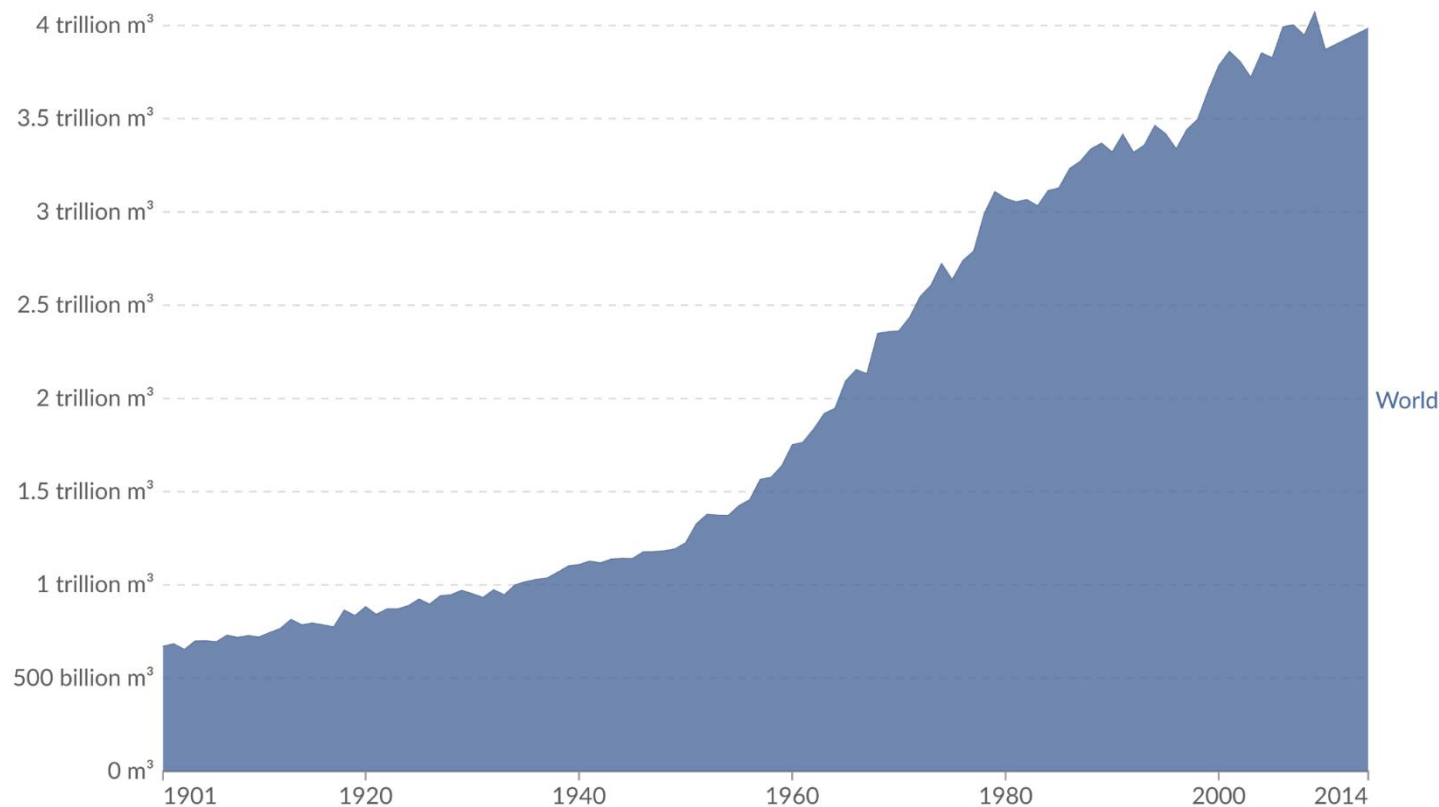
OurWorldinData.org/energy | CC BY

Note: In the absence of more recent data, traditional biomass is assumed constant since 2015.

Global freshwater use over the long-run



Global freshwater withdrawals for agriculture, industry and domestic uses since 1900, measured in cubic metres (m³) per year.



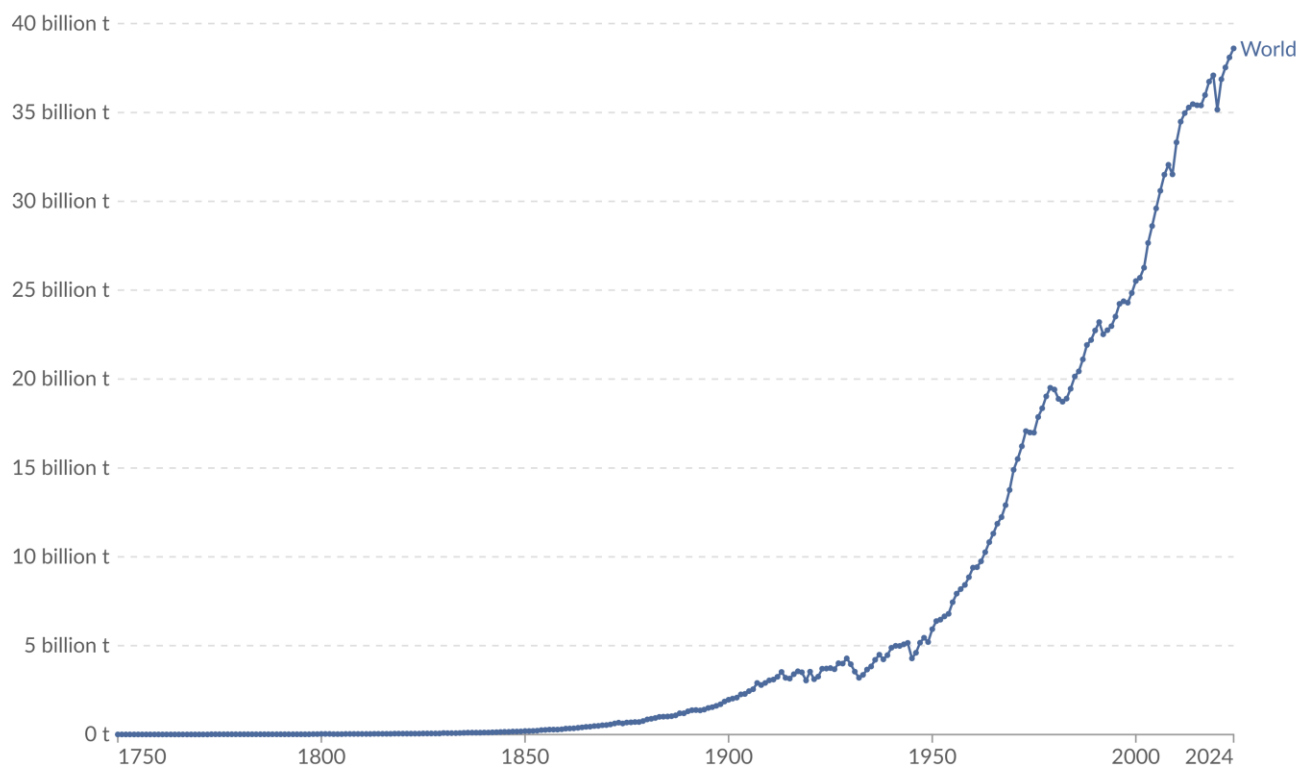
Data source: Global International Geosphere-Biosphere Programme (IGB)

OurWorldinData.org/water-use-stress | CC BY

Annual CO₂ emissions

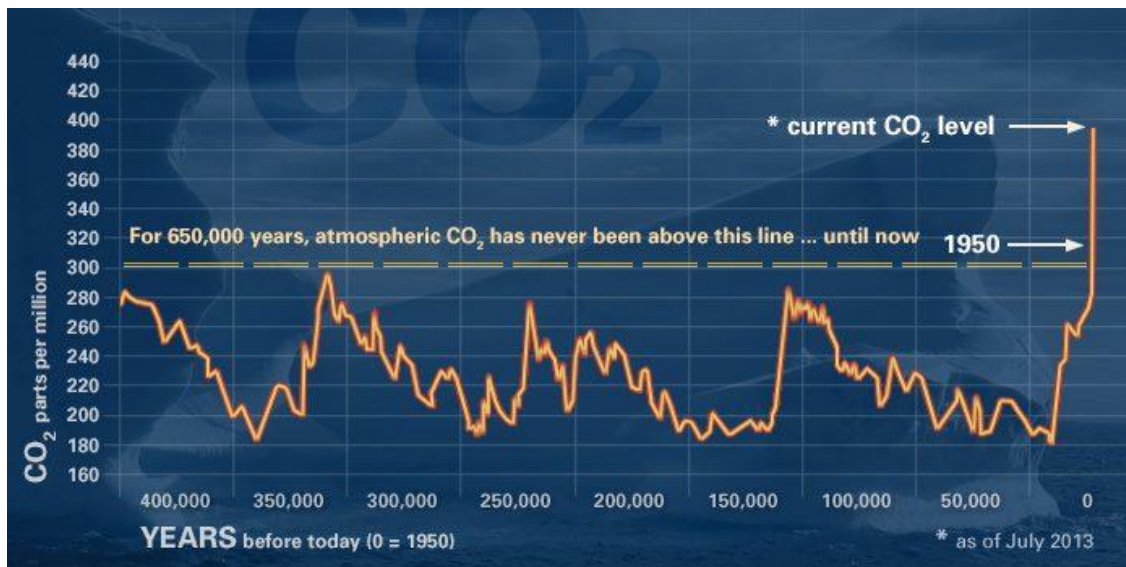
Our World
in Data

Carbon dioxide (CO₂) emissions from fossil fuels and industry¹. Land-use change emissions² are not included.

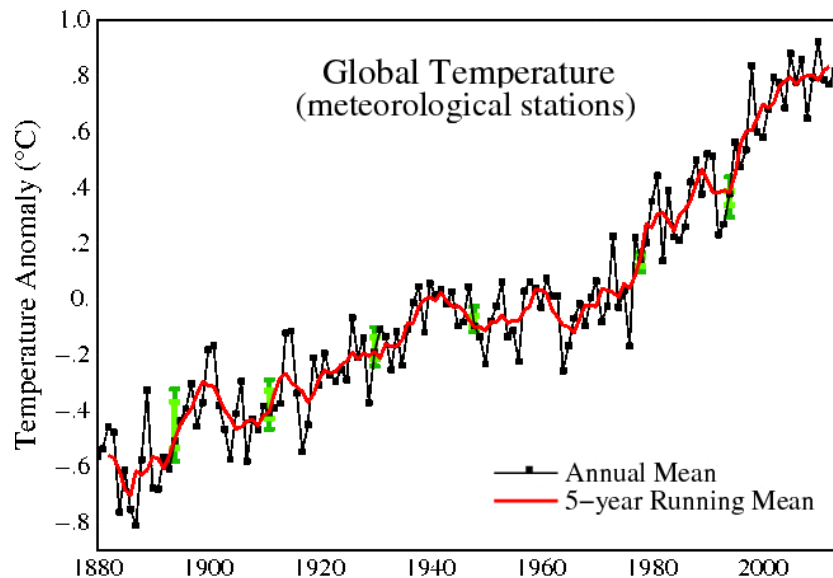


Data source: Global Carbon Budget (2025)

OurWorldinData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions | CC BY

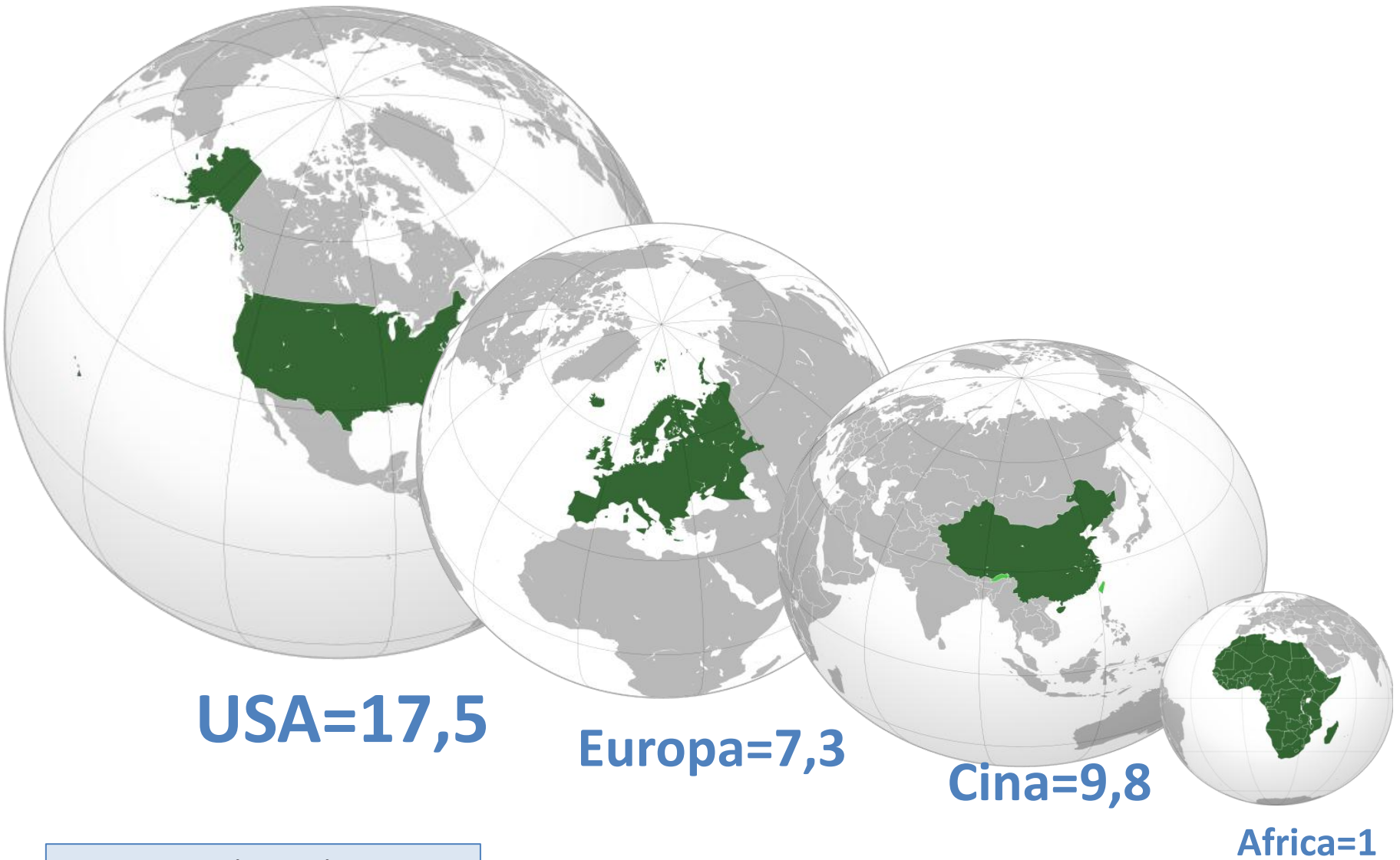


Concentrazione di CO₂ nell'atmosfera negli ultimi 400mila anni,
http://climate.nasa.gov/system/content_pages/main_images/co2



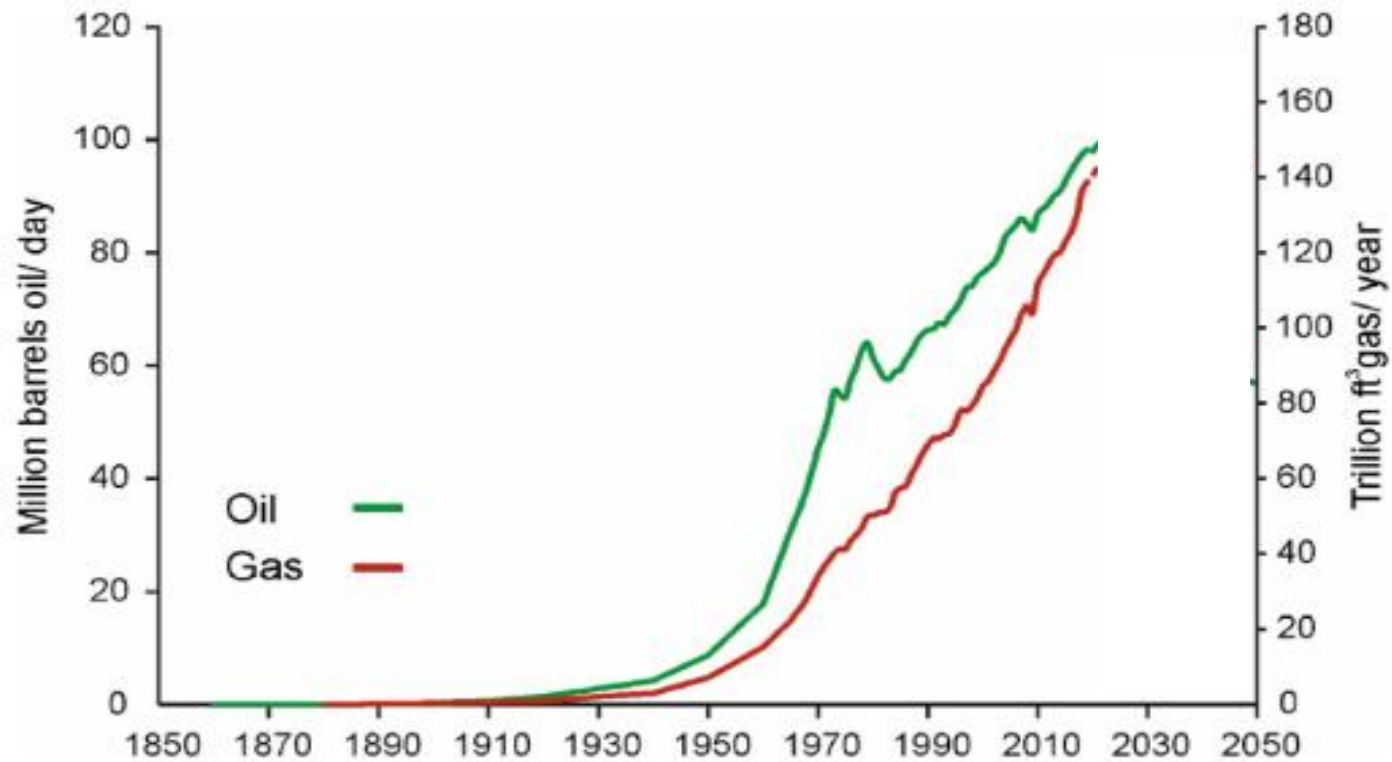
Temperatura media della terra dal 1880 al 2014, caricato da
http://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v3/Fig.A.gif

Le responsabilità sono molto diversificate

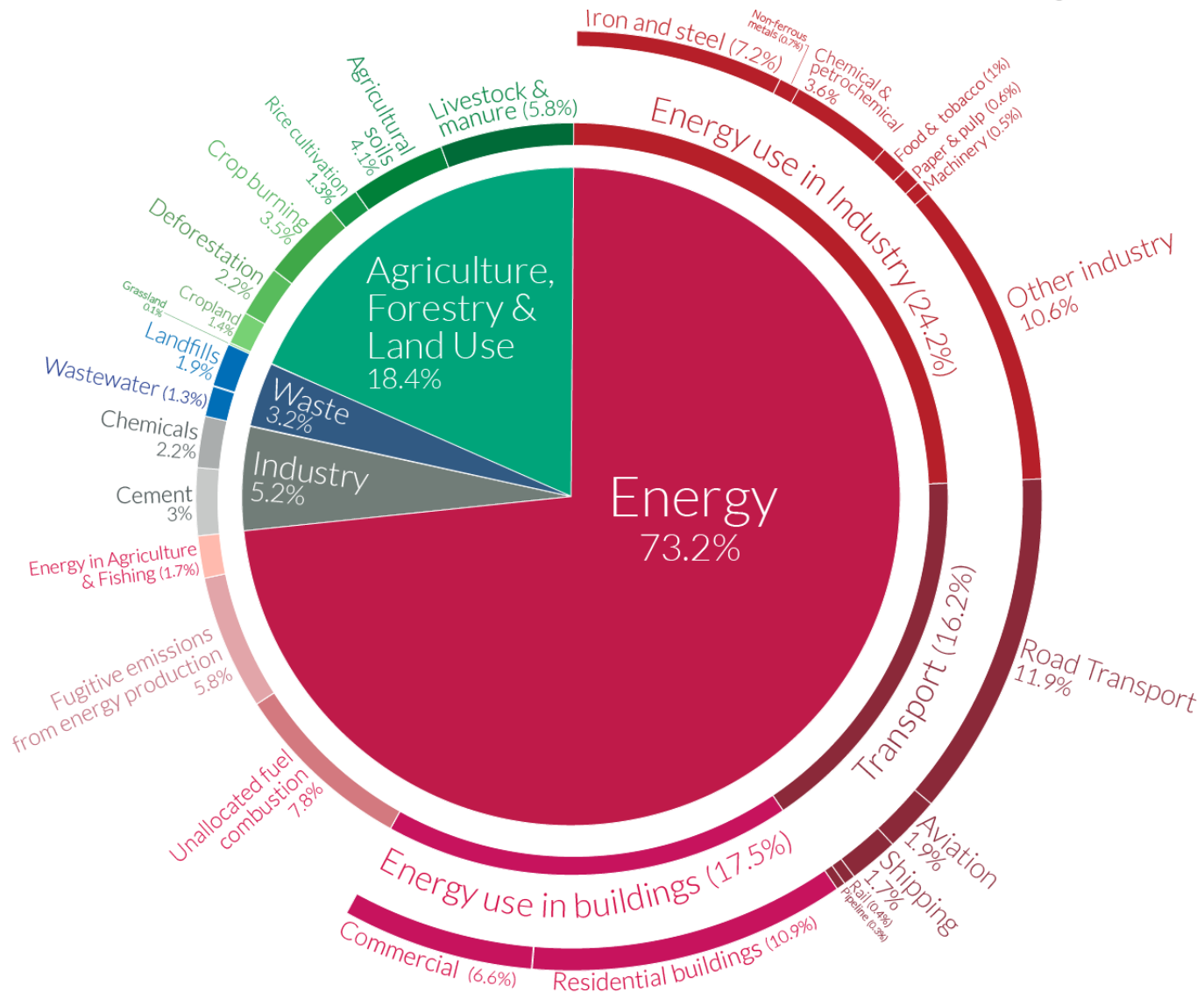


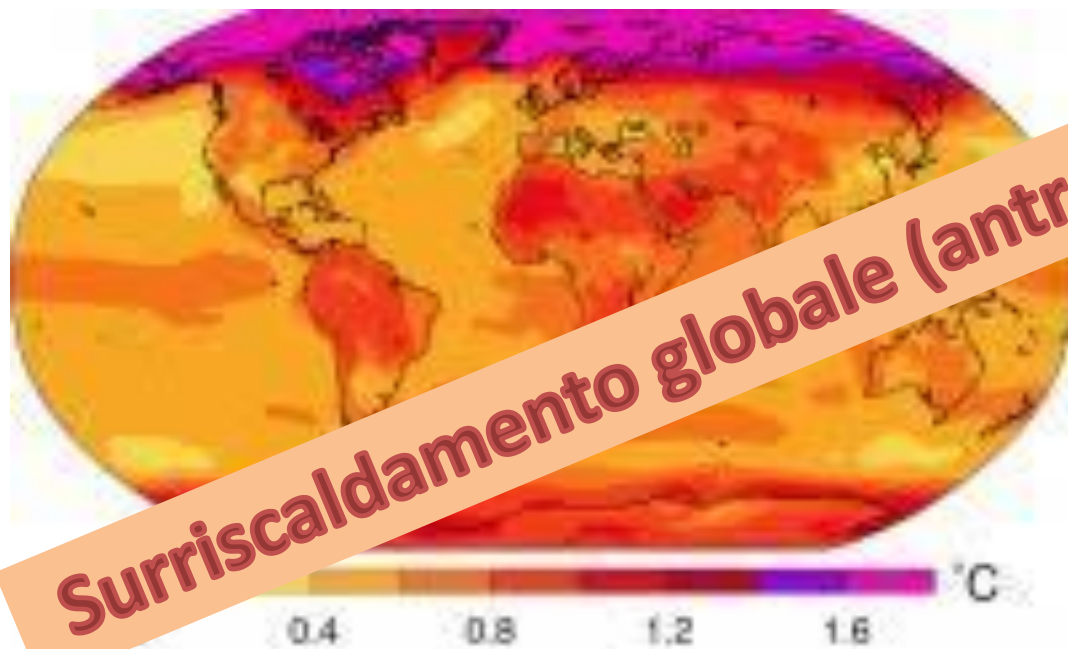
(ton CO₂eq/anno/persona)

La CO₂ in più è dovuta alla crescita esponenziale dei consumi fossili...



Emissioni globali di gas serra nei vari settori



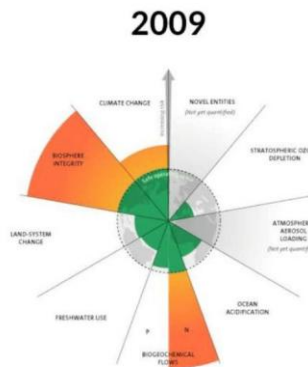
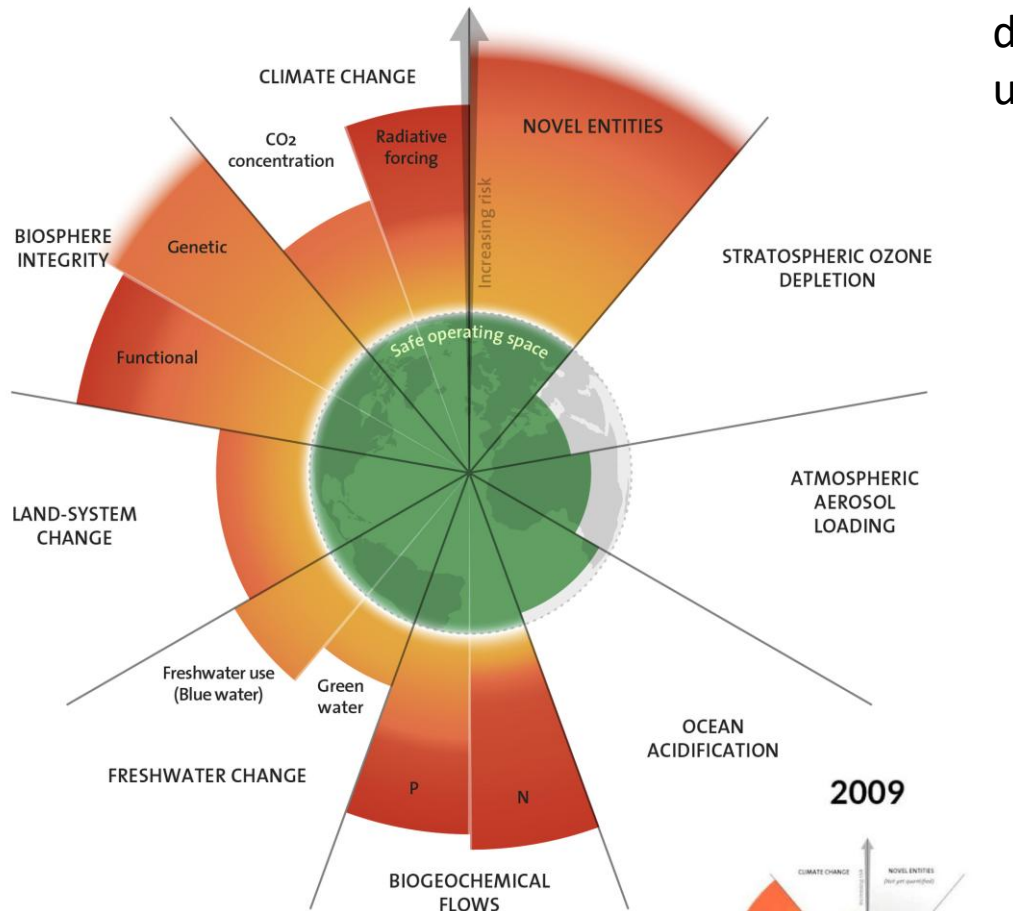


Surriscaldamento globale (antropologico)

Antropocene



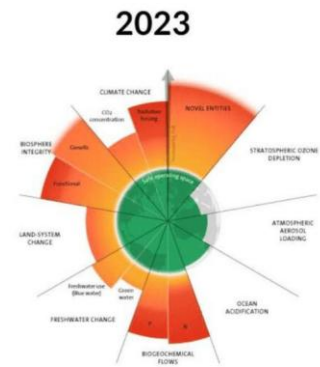
Limiti planetari: i confini che non dovrebbero essere superati per una vita umana sicura sul pianeta



3 boundaries crossed



4 boundaries crossed



6 boundaries crossed

Necessità di una transizione ecologica e di un cambiamento profondo

Mitigazione

Adattamento

Sufficienza/sobrietà



Assicurare l'accesso all'energia a prezzi accessibili, affidabile, sostenibile e moderno per tutti

L'accesso all'energia è un prerequisito essenziale per raggiungere molti obiettivi di sviluppo sostenibile che si estendono ben al di là del settore energetico:

**l'eliminazione della povertà,
aumentare la produzione alimentare,
la fornitura di acqua pulita,
il miglioramento della sanità pubblica,
l'istruzione,
la creazione di opportunità economiche
l'emancipazione femminile**

OBIETTIVI PER LO SVILUPPO SOSTENIBILE



Povertà energetica

allo stato attuale, 1,6 miliardi di persone in tutto il mondo non hanno accesso all'energia elettrica

L'Obiettivo 7 sostiene in tal modo l'accesso universale e affidabile ai servizi di produzione di energia moderni a prezzi accessibili

sviluppo economico e clima

l'obiettivo 7 mira ad un notevole aumento della quota di energie rinnovabili nell'ambito delle energie globali e un raddoppio del tasso globale di miglioramento dell'efficienza energetica.

promuovere la ricerca nelle energie rinnovabili
Investimenti in infrastrutture e tecnologie di energia pulita





Era dei combustibili fossili



Era zero carbonio

Era zero carbonio

-3000

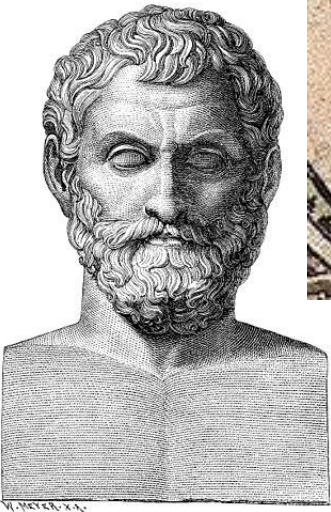
-2000

0

2000

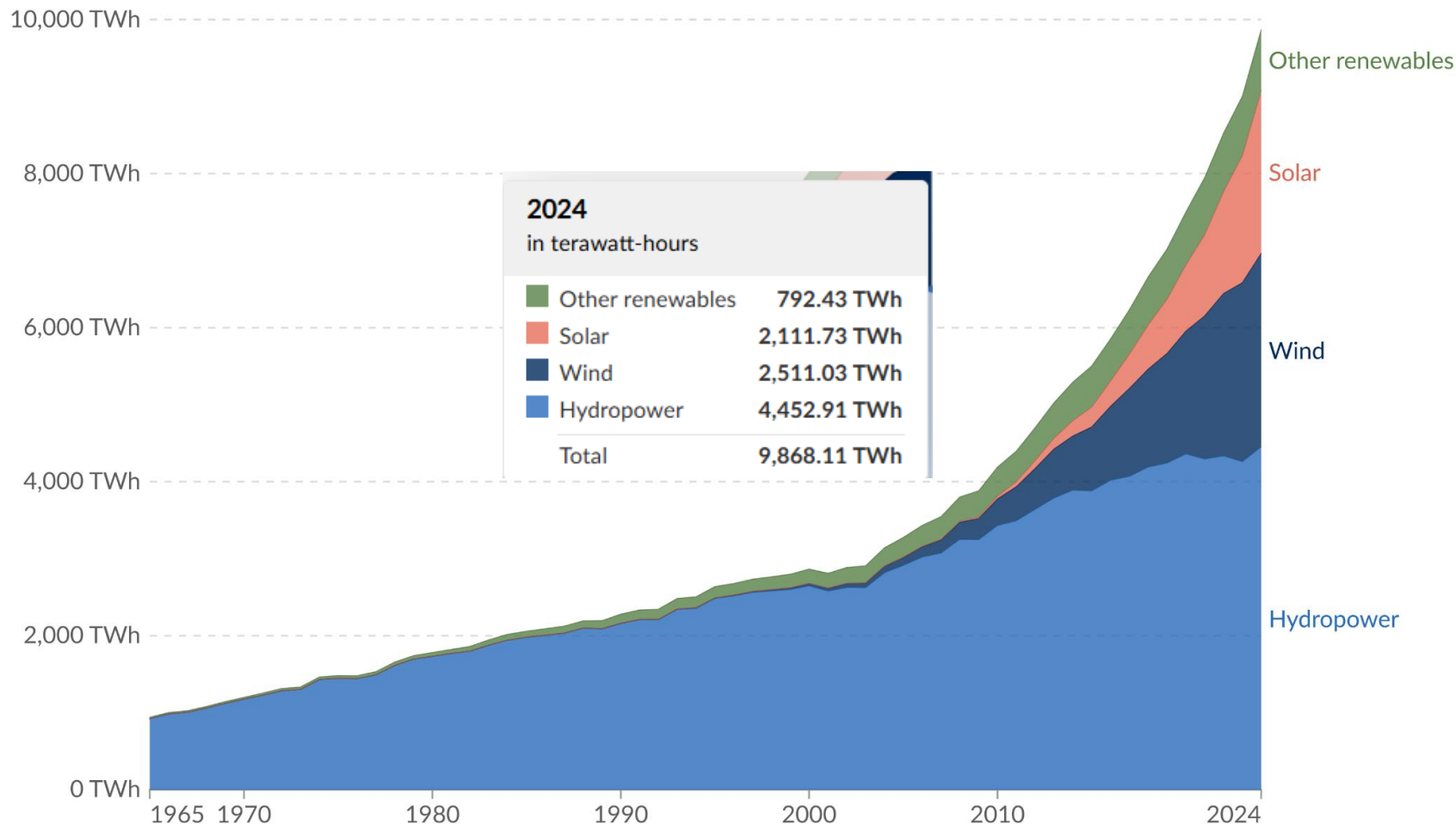
3000

antropocene



Renewable electricity generation, World

Our World
in Data



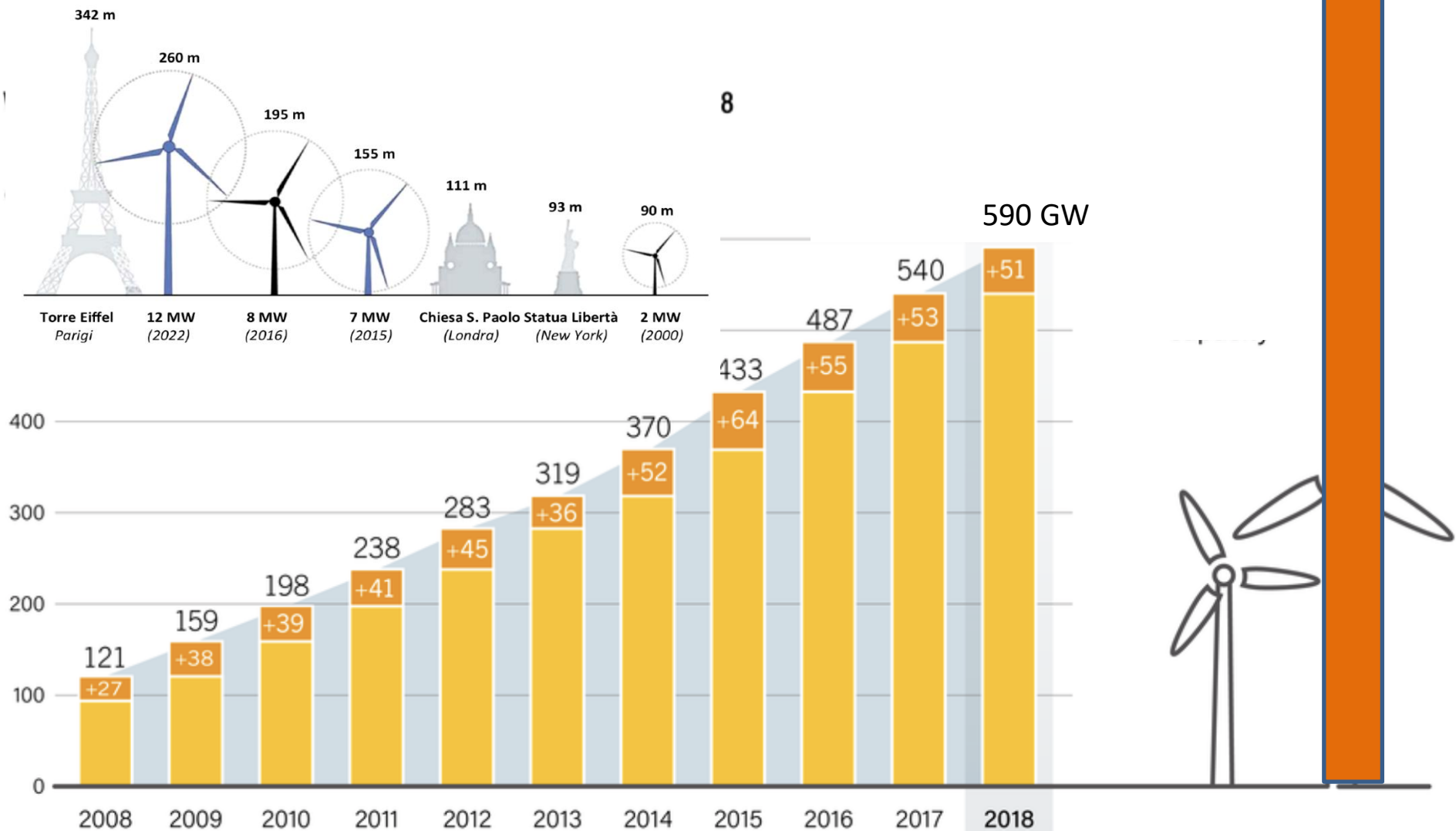
Data source: Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2025)

OurWorldinData.org/renewable-energy | CC BY

Note: 'Other renewables' refers to renewable sources including geothermal, biomass, waste, wave and tidal. Traditional biomass is not included.

Energia eolica

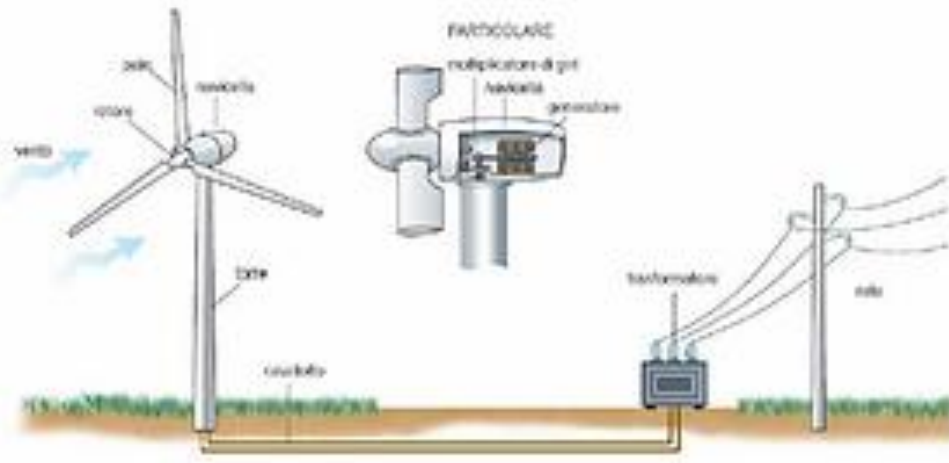
2024 1136 GW



Nel 2024 ha generato energia pari a circa 1100 reattori nucleari

energia eolica

è la prima per il rapporto costo/produzione
e per lo sfruttamento semplice e poco oneroso



on-shore (a terra)



off-shore (in mare)

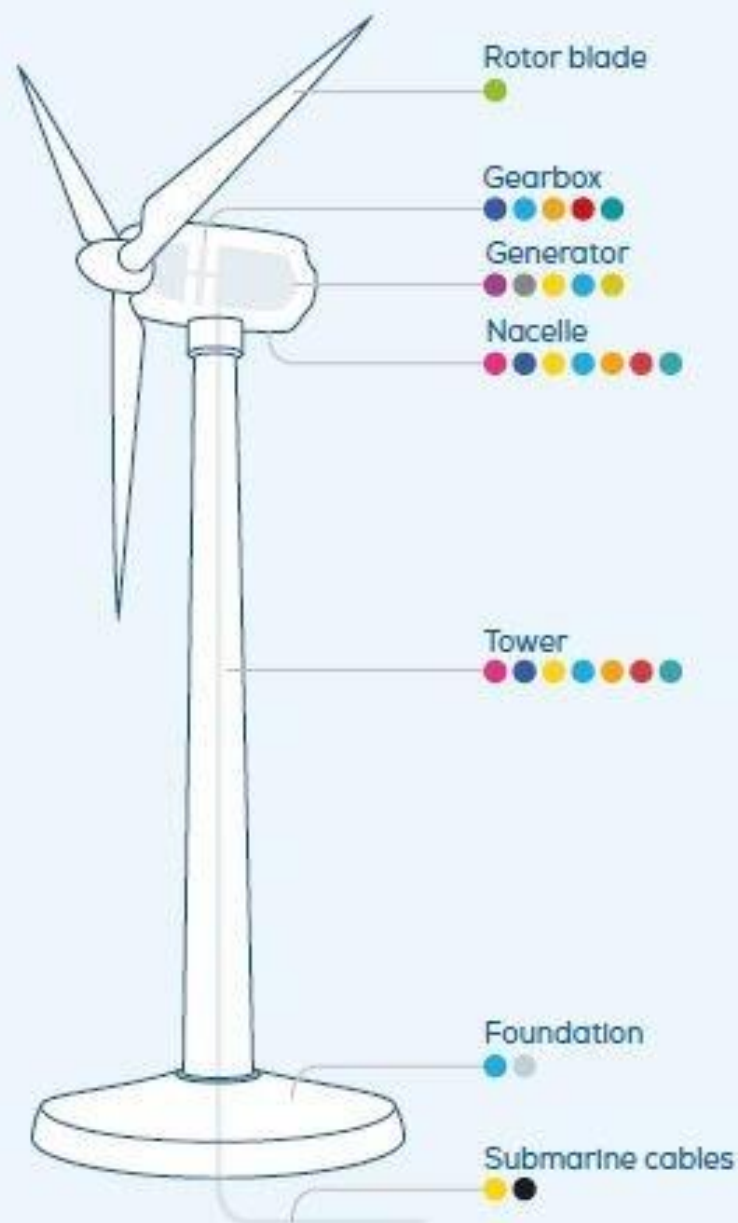


- Aluminium
- Boron
- Chromium
- Cobalt
- Composite
- Copper
- Iron
- Lead
- Manganese
- Molybdenum
- Nickel
- Rare Earths*
- Concrete

* Dysprosium, neodymium, praseodymium, terbium

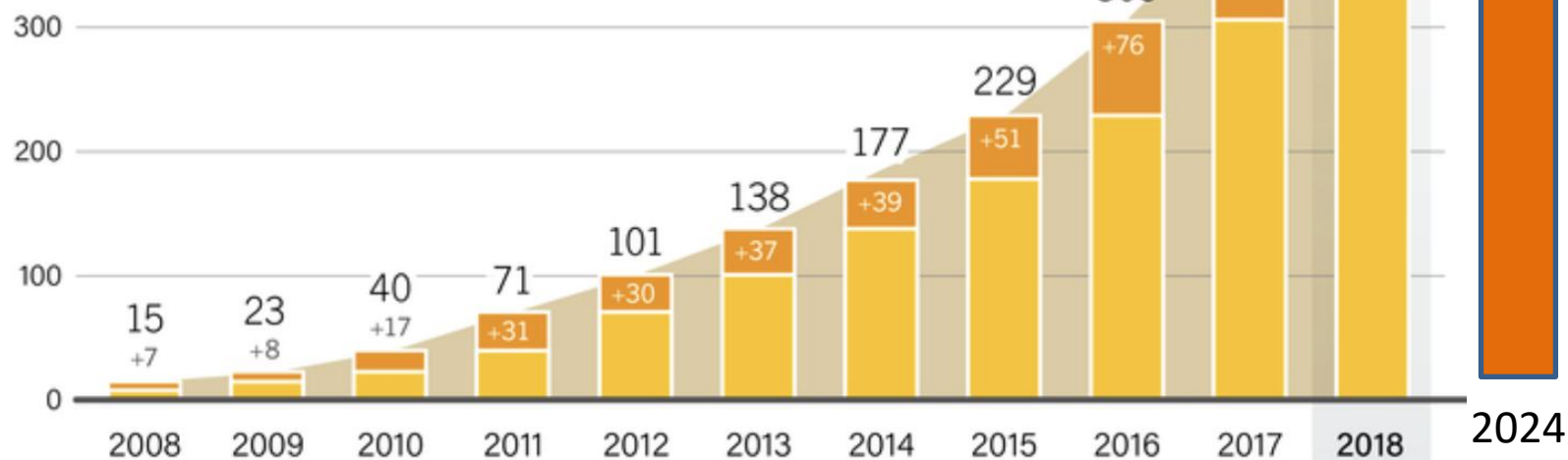
Sources: European Commission Materials Information System (MIS) Wind Energy, April 2016 and European Commission Raw Materials Scoreboard 2016.

The source does not specify the wind turbine on which the above information is based.



Energia fotovoltaica

2024 1050 GW



Nel 2024 ha generato energia pari a circa 1000 reattori nucleari

Prima Generazione (Silicio Cristallino)

Monocristallino (Mono-Si): Alta efficienza, colore scuro uniforme, ideale per spazi ridotti.

Policristallino (Poly-Si): Efficienza leggermente inferiore, costo più basso, colore azzurro-blu.

Seconda Generazione (Film Sottile)

Materiali: Silicio amorfo (a-Si), Tellururo di Cadmio (CdTe), CIGS (Rame, Indio, Gallio, Selenio).

Più leggeri, flessibili, meno efficienti

Terza Generazione e Tecnologie Avanzate

Bifacciali: Catturano luce da entrambi i lati (frontale e riflessa), aumentando la produzione del 5-30%.

Celle IBC (Interdigitated Back Contact): Contatti elettrici sul retro, massimizzano la superficie esposta.

Celle HJT (Heterojunction): Struttura a film sottile di silicio amorfo tra silicio cristallino, alta efficienza.

Celle TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact): Strato di ossido di tunnel per migliorare il contatto.

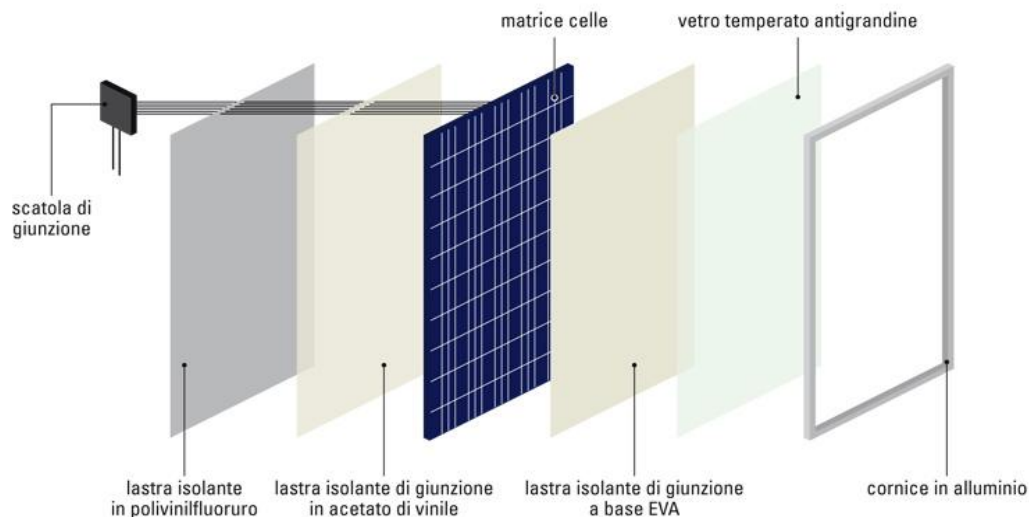
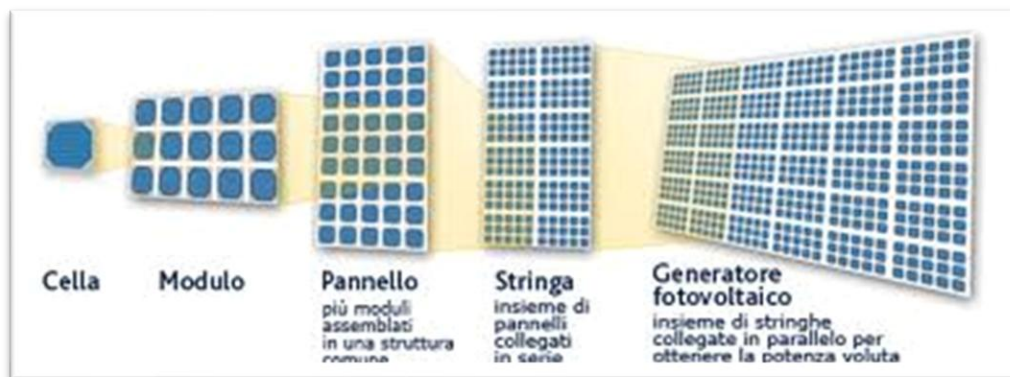
Tandem (Perovskite/Silicio): Combinano perovskiti con silicio per catturare più lunghezze d'onda, superando i limiti di efficienza.

Half-Cut Cells: Celle tagliate a metà per ridurre le perdite di potenza.

Tecnologie Ibride (ST+FV): Generano elettricità e acqua calda



Cadmio- tellurio





Il tetto della stazione del metro di Shanghai è fatto di pannelli fotovoltaici che forniscono energia ai treni



SANYO solar arc, Gifu (Japan), 315 m, 530.000 kWh/anno









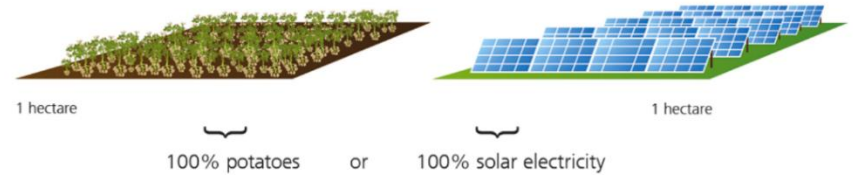
Agro-fotovoltaico





Fattoria fotovoltaica

Agro-fotovoltaico



Combined Land Use on 1 Hectare Cropland: 186% Land Use Efficiency

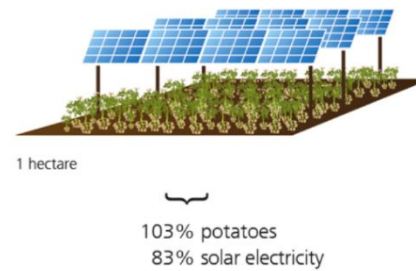


illustration potatoes © HappyPictures / shutterstock.com



<https://www.greenme.it/abitare/risparmio-energetico/11063>
-tetti-verdi-impianti-fotovoltaici#accept

un tetto verde garantisce ai pannelli fotovoltaici di non perdere di efficienza, rendendoli più efficienti e produttivi, contribuendo a una maggior redditività dell'impianto.

il grado di efficienza di un pannello fotovoltaico si riduce di 0.5% per ogni grado di surriscaldamento quando la sua temperatura supera i 25 gradi centigradi

Tetto grigio: fino a oltre 80 °C

Copertura verde: 35 °C

impianti ad energia del mare

In linea di principio è possibile convertire almeno cinque tipi di energia presenti nel mare:

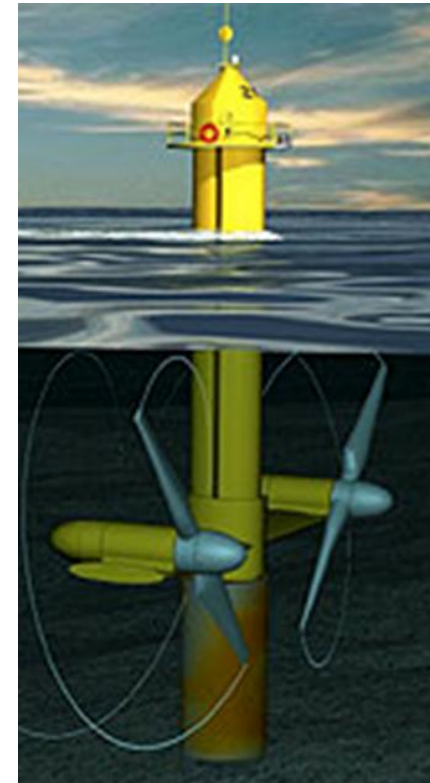
- delle correnti,
- delle onde,
- delle maree,
- delle correnti di marea
- del gradiente termico tra superficie e fondali



Francia, a Saint-Malo
(Normandia) potenza
installata di 240 MW,

Canada 16 MW

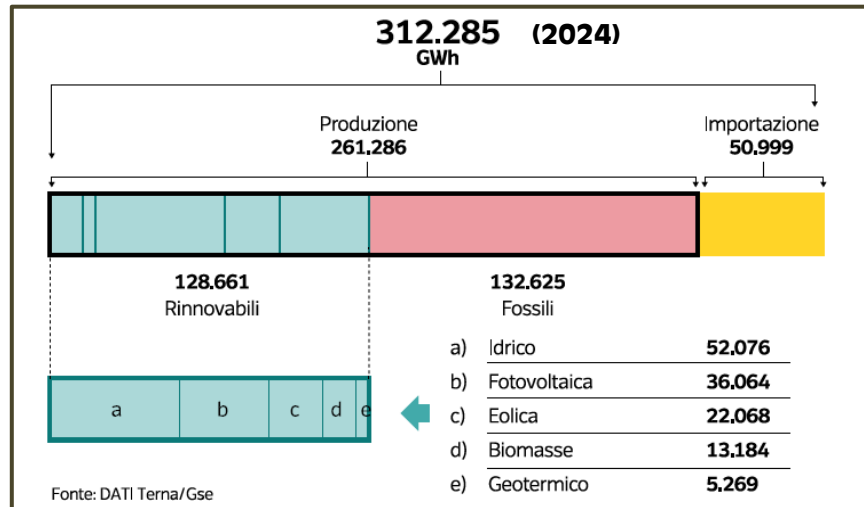
altri progetti simili
riguardano Inghilterra,
Nord America e
Australia per
complessivi 10000 MW



L'elettricità in Italia è la più cara d'Europa

Lo scorso anno il prezzo medio all'ingrosso (Pun) è stato di 108,5 euro per Mwh a fronte dei 78 euro della Germania e dei 58 euro della Francia.

Nell'area scandinava, con la Norvegia dove oltre il 95% dell'energia prodotta è green, invece il prezzo è crollato a 36 euro.



Nel 2024 in Italia abbiamo consumato 312.285 Gwh di elettricità, ne abbiamo importati 51mila, mentre il resto, 49%, da fonti rinnovabili, compresi 1.992.117 impianti fotovoltaici e 6.148 eolici. Quel che resta, arriva da fonti fossili.

Per arrivare alle emissioni-zero entro il 2050, il Pniec (Piano Nazionale per l'Energia e il Clima) stabilisce che **entro il 2030 le rinnovabili dovranno coprire il 63,4% dei consumi.**

Se guardiamo all'ultimo decennio la nostra capacità è aumentata del 44%, mentre in Francia è salita del 75%, in Spagna del 78%, e in Germania del 93%

Aree Idonee

Spetta alle Regioni individuare le aree di accelerazione (dove l'iter autorizzativo dovrebbe essere rapidissimo), quelle idonee, e quelle dove è meglio evitare gli impianti.

A maggio di quest'anno, il Tar ha bocciato il decreto perché lascia troppa discrezionalità alle Regioni.

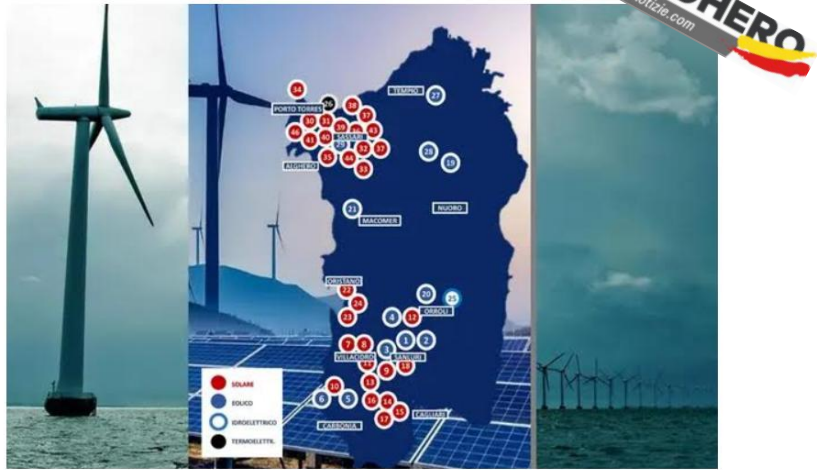
Nel frattempo le Regioni si sono mosse, in genere con un'interpretazione «restrittiva» così da prevenire il malcontento degli elettori. E si è scatenata una raffica di ricorsi.

La prima a fare la sua legge è stata la Sardegna bloccando anche impianti già autorizzati. Il governo la impugna, la Regione ne approva un'altra dove quasi tutta la regione è «non idonea» e il governo impugna anche quella. A luglio la Corte Costituzionale censura la Regione Calabria: un'area non idonea non equivale a divieto assoluto; a ottobre 2025 il Consiglio di Stato annulla due delibere del Piemonte che vietano il fotovoltaico a terra su aree agricole di elevato interesse economico.



L'INVASIONE DELLE LOBBY DELL'ENERGIA: LA SARDEGNA NON DEVE CEDERE

02 giu 2024 09:00 - Simone Arbus e Pasqualino Trubia



Domenica, 07 Dicembre

Ultimo aggiornamento alle 16:02

DIRETTA TV



Si legge in: 2 minuti

Cambia colore:



DAL CONSIGLIO

Una barriera contro l'eolico "selvaggio". La Regione mette (finalmente) i paletti

Rinnovabili, no della Consulta a divieti assoluti nelle aree "inidonee"

Redazione QualEnergia.it

29 Luglio 2025

3 min

PRO



L'opposizione alle rinnovabili

I sabotaggi

Luglio 2024	Mugello , cantiere per il parco eolico: asportate recinzioni e piantati chiodi sugli alberi per renderne pericoloso il taglio	
26 agosto	Mamoiada (Sardegna) — svitati i dadi alla base di una pala eolica	
30 agosto	Villacindro (Sardegna) — molotov contro i teli di protezione delle pale eoliche	
10 settembre	Tuili (Sardegna) — incendiati 2mila pannelli fotovoltaici	
3 luglio 2025	Mugello — 50 incappucciati entrano nel cantiere: aggrediscono boscaioli e ingegneri	
4 luglio	Mugello , danneggiati i mezzi del cantiere	
9 settembre	Viddalba (Sassari) — incendiati 5mila pannelli fotovoltaici	

In Italia ci sono 120 tra comitati e associazioni che organizzano cortei, convegni e petizioni per dire no all'eolico e al fotovoltaico a terra.

Alcuni violenti: negli ultimi sedici mesi si registrano sette tra incendi e sabotaggi.

Cantiere Agsm autorizzato alla costruzione di un parco eolico in **Mugello**: gli attivisti hanno asportato recinzioni e picchetti, piantato chiodi sugli alberi per renderne pericoloso il taglio, e a luglio hanno danneggiato i macchinari e aggredito ingegneri e boscaioli.

In **Sardegna**, dove si sospetta l'infiltrazione criminale nel business dell'eolico, hanno svitato i dadi alla base delle pale, incendiato pannelli fotovoltaici, e lanciato molotov contro i teli di protezione di un deposito.

L'iter per l'approvazione degli impianti non prevede la consultazione della popolazione locale, ma le proteste influenzano i politici locali secondo la logica del Nimtoo («Not in my terms of office», non durante il mio mandato elettorale).

Le accuse alle rinnovabili

«Rovinano il paesaggio, rubano spazio all'agricoltura».

L'Italia ha spazio per estendere le rinnovabili

Si parla di **210 km² quadrati di aree dismesse** (ex cave, ex discariche, ex industrie) adatte a ospitare fotovoltaico. **E fino a 490 km quadrati² per il fotovoltaico a terra** (attualmente ne sono stati occupati 177), si ricaverebbero usando appena il 4% delle zone agricole inutilizzate.



«ROVINANO IL PAESAGGIO»

La realtà

C'è lo spazio per installare impianti senza rovinare gli scorci più belli



210 kmq

di aree dismesse
(ex cave, ex discariche,
ex industrie)



490 kmq

zone agricole
inutilizzate

Fonti: Politecnico di Milano; International Energy Agency; Irena

uno studio del 2021 di Carbon Tracker –“The Sky's the Limit” – stima che basti occupare lo 0,3 per cento della superficie terrestre (terraferma) con pannelli solari per soddisfare l'attuale richiesta energetica globale.

Questo dato è sorprendentemente modesto se paragonato all'attuale ingombro territoriale necessario per infrastrutture fossili. Secondo lo stesso studio, l'energia “tecnica” disponibile da solare ed eolico sarebbe oggi superiore di oltre 100 volte la domanda mondiale.

In sostanza, i limiti principali non sono più tecnici, ma politici, normativi e strategici.

A livello di land use (uso del suolo), un rapporto elaborato da Princeton (Net-Zero America) mostra che l'impronta territoriale delle rinnovabili è in molti casi inferiore a quella richiesta dalle infrastrutture fossili, proprio perché queste ultime richiedono miniera, estrazione, trasporti, raffinerie, rete alimentata e così via. Più recentemente, uno studio del 2024 evidenzia come in alcuni paesi si usi più terreno per golf club che per impianti solari o eolici, suggerendo che ci sia ampio margine per riconfigurare le priorità dell'uso del suolo in favore delle rinnovabili.

Le accuse alle rinnovabili

«Le rinnovabili inquinano».

Ridurre gli inquinanti è l'unica soluzione per frenare il cambiamento climatico, e «ogni frazione di grado in più significa più fame, sfollamenti e perdite», ha spiegato il segretario dell'Onu Guterres. I dati dell'Agenzia internazionale per le energie rinnovabili (Irena) e dell'Università di Oxford dimostrano che per fabbricare un impianto da **un MW di fotovoltaico a terra servono 200 tonnellate di materiali, poi si alimenterà gratis per 30 anni.**

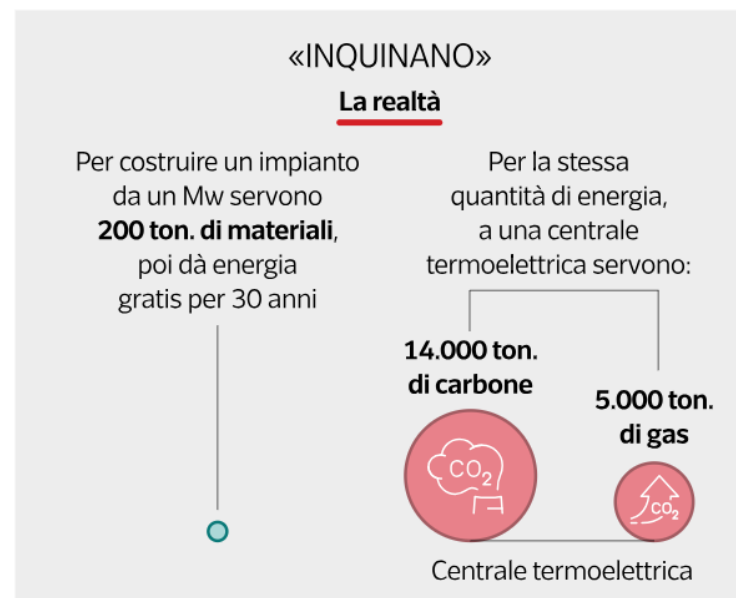
Per produrre la stessa elettricità, **a una centrale termoelettrica servono 14mila tonnellate di carbone e 5mila di gas.**

«Le rinnovabili sono più care»

analisi IEA e altre mostrano costi inferiori rispetto a fossili e nucleare.

«Le rinnovabili non sono affidabili»

Dubbi sulla stabilità della produzione intermittente, che spinge verso soluzioni di storage e smart grid.



«Non conviene».

Secondo il Politecnico di Torino un'infrastruttura a corrente alta a loro capacità massima, perché le soluzioni ci sono, a cominciare dall'implementare i sistemi di accumulo. Nel 2050, per l'Italia significa guadagnare come la Norvegia, ridurre le emissioni di CO2 di 3 volte e 3 volte meno del nucleare. Il costo è chiuso i bandi d'acquisto di energia all'ingrosso nel 2025, pagherà

Per gen



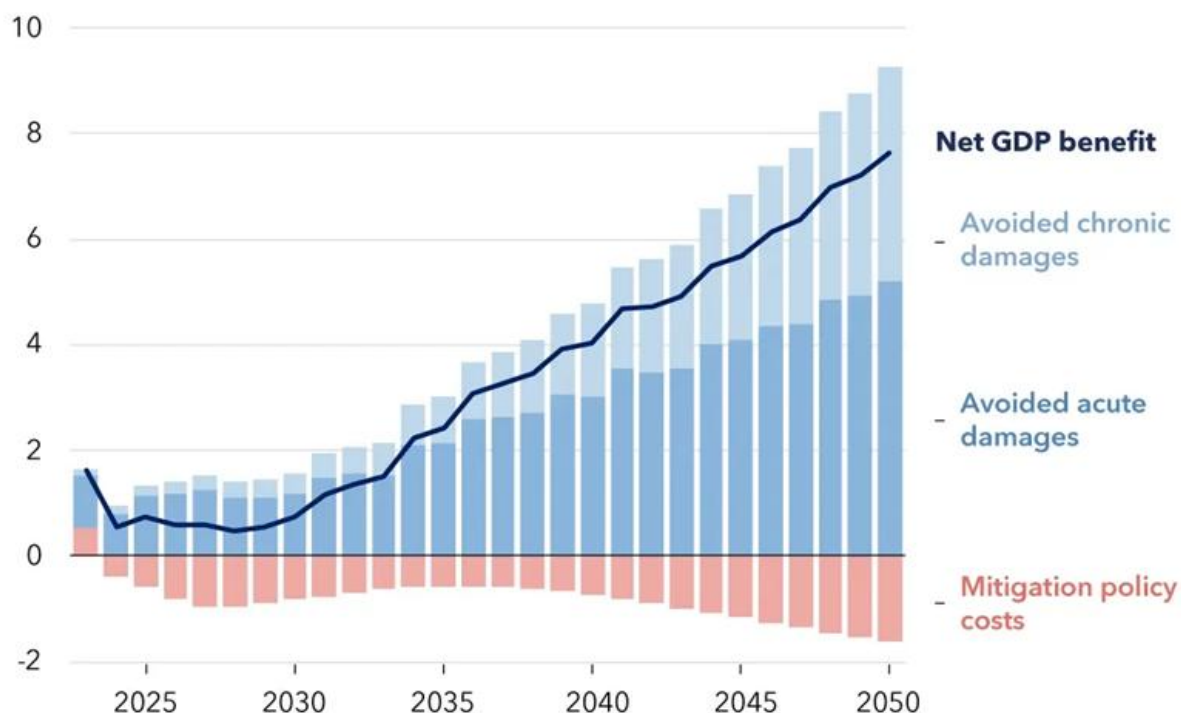
Fonte: International Energy Agency (IEA)

Green returns

The economic benefits of accelerating the transition to a low-carbon economy vastly outweigh its cost.

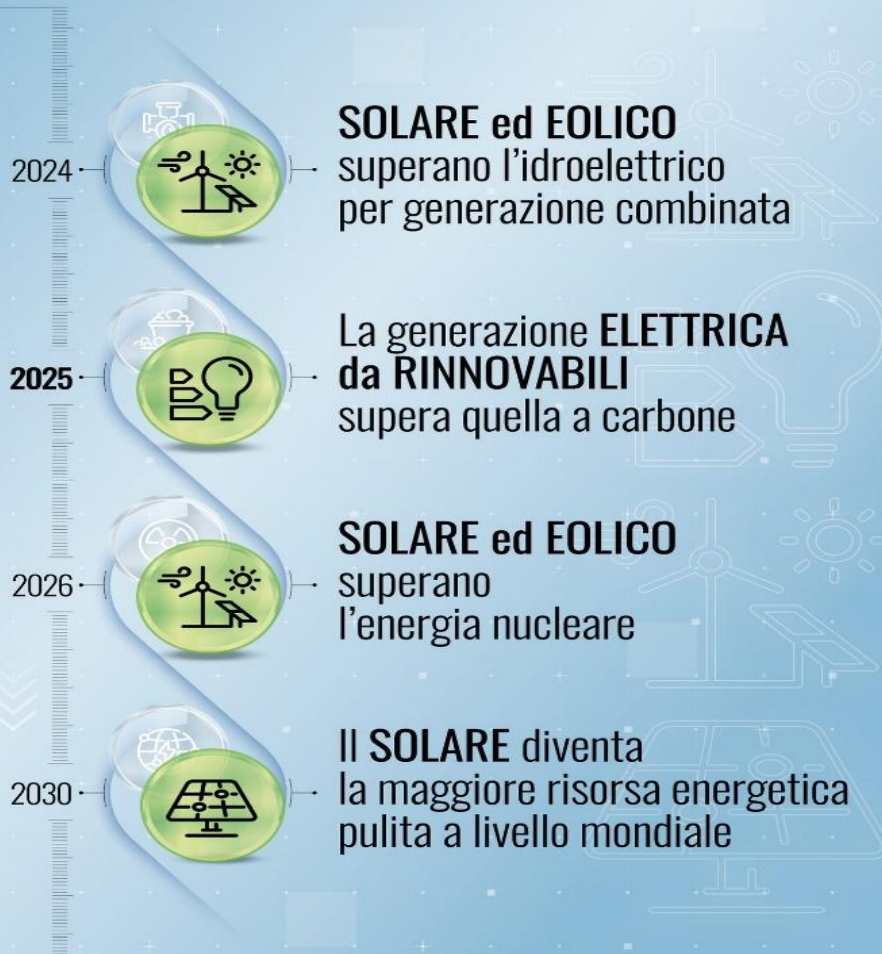
World potential GDP benefit under net zero carbon emissions by 2050

(percent deviation from reference scenario)



Sources: NGFS (2023), Scenarios Portal; IIASA (2023), NGFS Phase 4 Scenario Explorer; and IMF staff calculations. Note: NiGEM model with REMIND-MAGPIE inputs. The reference scenario is the Current Policies scenario with no transition but physical risk.

I QUATTRO SORPASSI



L'ITALIA DELLE RINNOVABILI

**QUOTA RINNOVABILI
SULLA DOMANDA
ELETTRICA NAZIONALE**



Performance delle singole fonti



RINNOVABILI: RADDOPPIO DELLA CAPACITÀ NEL 2030

Fonte:
Agenzia Internazionale
dell'Energia (IEA 2025)

iea

CAPACITÀ COMPLESSIVA

(2024-2030)



+4.600 GW

pari alla somma di
Unione Europea,
Cina e Giappone
messe insieme

QUOTA NEL RISCALDAMENTO



dall'attuale 14%
al 18%

QUOTA NEI TRASPORTI



dall'attuale 4%
al 6%

SOLARE IN PRIMO PIANO

Fonte:
Agenzia Internazionale
dell'Energia (IEA 2025)

iea

IL FOTOVOLTAICO
RAPPRESENTERÀ
CIRCA L'80%
DELL'AUMENTO GLOBALE
DELLA CAPACITÀ ELETTRICA
RINNOVABILE
NEI PROSSIMI 5 ANNI

46%

LE FONTI RINNOVABILI
GENERERANNO
QUASI LA METÀ (46%)
DELL'ELETTRICITÀ GLOBALE
ENTRO IL 2030

L'obiettivo è quello di uscire dal sistema, la cui principale inefficienza risiede nel fatto che, su 100 unità di combustibili fossili estratte, ne sprechiamo almeno due terzi in calore disperso nell'ambiente.

la soluzione principale da mettere in atto è elettrificare il più possibile i consumi finali.

I motori elettrici sono infatti più efficienti e abbiamo già le tecnologie rinnovabili per produrre elettricità senza bruciare nulla.



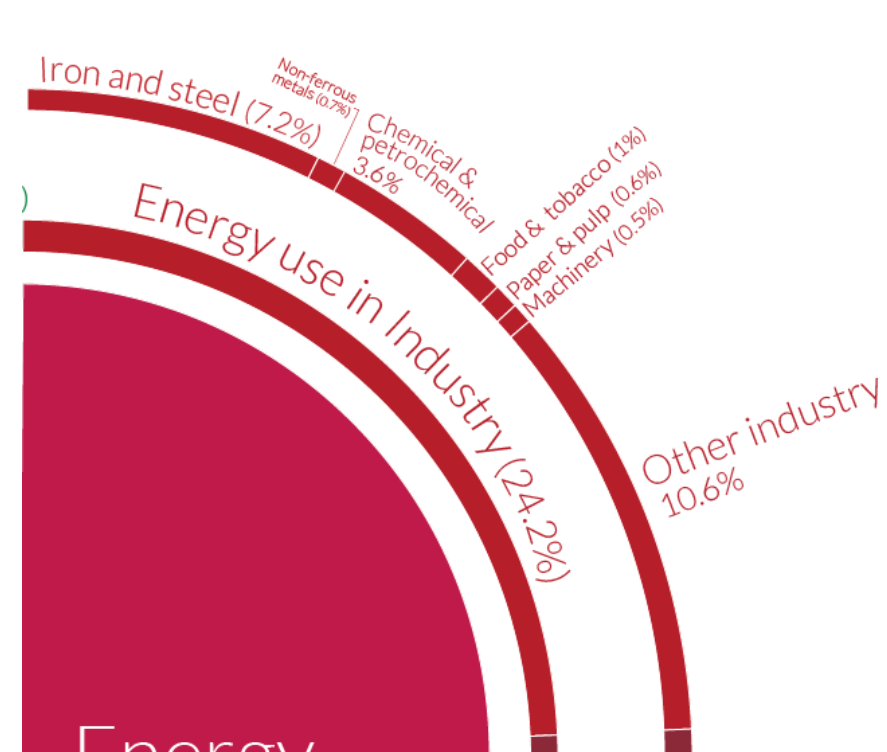
ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

grazie

alessandra.bonoli@unibo.it

DICAM

www.unibo.it



Consumo energetico nell'industria: 24,2%

Siderurgia (7,2%): emissioni legate all'energia per la produzione di ferro e acciaio.

Chimica e petrolchimica (3,6%): emissioni legate all'energia per la produzione di fertilizzanti, prodotti farmaceutici, refrigeranti, estrazione di petrolio e gas, ecc.

Alimenti e tabacco (1%): emissioni legate all'energia per la produzione di prodotti del tabacco e dalla trasformazione alimentare (la conversione delle materie prime agricole nei prodotti finali, come la trasformazione del grano in pane).

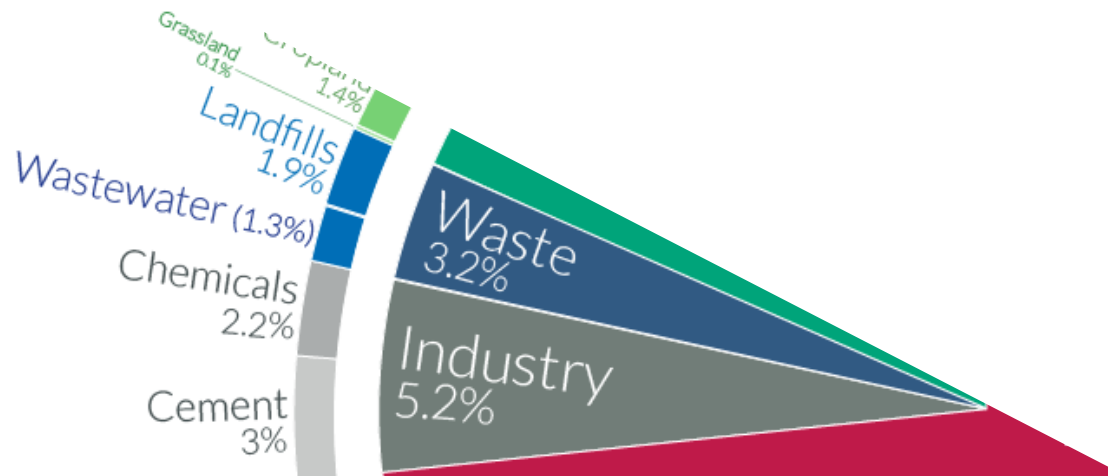
Metalli non ferrosi: 0,7%

Carta e cellulosa (0,6%)

Macchinari (0,5%)

Altri settori industriali (10,6%): emissioni legate all'energia per la produzione in altri settori, tra cui l'estrazione mineraria e cave, l'edilizia, il tessile, i prodotti in legno e i mezzi di trasporto (come la produzione di automobili).

Processi industriali diretti: 5,2%



Cemento (3%):

l'anidride carbonica viene prodotta come sottoprodotto nella produzione del clinker.

Prodotti chimici e petrolchimici (2,2%):

i gas serra possono essere prodotti come sottoprodotto dai processi chimici (ad esempio la CO_2 può essere emessa durante la produzione di ammoniaca)

Rifiuti: 3,2%

Acque reflue (1,3%)

Discariche (1,9%)

La decarbonizzazione nel settore industriale

riduzione o annullamento delle emissioni di gas serra derivanti dalle attività produttive e dai processi industriali.

Elettrificazione con energie rinnovabili, miglioramenti nell'efficienza energetica e tecnologie innovative.

1. Elettrificare i processi produttivi utilizzando energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili.
2. Ridurre i consumi energetici attraverso l'ottimizzazione dei processi produttivi, l'utilizzo di tecnologie più efficienti.
3. Adottare Tecnologie a Basso Carbonio, che riducano o eliminino le emissioni di CO₂, come la cattura, lo stoccaggio e l'utilizzo della CO₂
(CCS, Carbon Capture and Storage, e CCU, Carbon Capture and Utilization)
4. Economia Circolare, ridurre i rifiuti, riutilizzare prodotti e materiali e promuovere la sostenibilità dei processi di produzione.
5. Implementare sistemi di Ecodesign, Analisi Ciclo di Vita, Etichettatura e monitoraggio per valutare l'impronta di carbonio dei prodotti e delle attività industriali.

Elettrificazione degli usi termici industriali

Le tecnologie di elettrificazione diretta, che si prevede saranno pienamente disponibili entro il 2035, potrebbero soddisfare il 90% della domanda di energia non ancora elettrificata dall'industria europea.

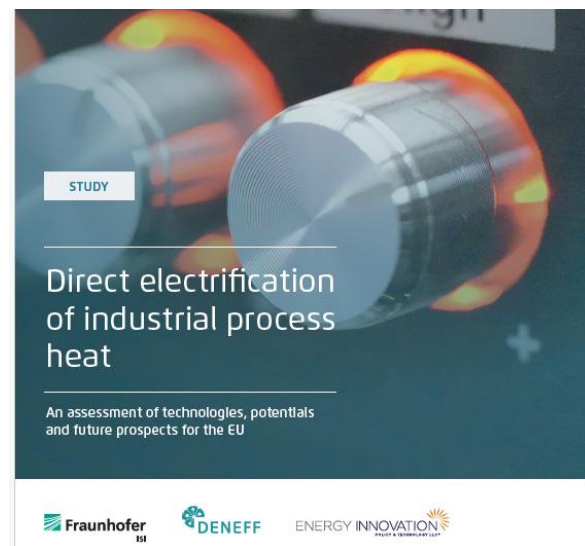
Le tecnologie oggi disponibili potrebbero già soddisfare oltre il 60% di questa domanda. E' fondamentale potenziare rapidamente le tecnologie per **l'elettrificazione diretta del calore di processo a tutti i livelli di temperatura.**

Esiste un'ampia gamma di tecnologie di elettrificazione per soddisfare specifiche esigenze di processo.

Le pompe di calore e le caldaie elettriche possono già generare fino a 200 e 500 °C per i processi chimici.

I forni ad arco elettrico sono ampiamente utilizzati per la produzione di acciaio a 1.800 °C.

Tecnologie come il riscaldamento a resistenza, il riscaldamento a induzione e i cracking elettrici a vapore saranno disponibili nei prossimi anni e copriranno tutti gli intervalli, da 100 a 2.500 °C.



Le caldaie elettriche e le pompe di calore sono adatte all'elettificazione in applicazioni a bassa e media temperatura in cui sono necessari acqua calda o vapore.

Le tecnologie sono mature e collaudate nell'uso industriale.

Le pompe di calore, soprattutto se utilizzate a temperature adeguate, offrono significativi incrementi di efficienza **nell'industria cartaria, alimentare e chimica**.

Il riscaldamento a resistenza

è una tecnologia versatile che può essere applicata a molti processi

Un'importante limitazione è la densità energetica necessaria, che potrebbe richiedere ampie superfici. La tecnologia in corso di sviluppo mira a superare le sfide nelle applicazioni ad alta capacità e alta temperatura (fino a 2.000 °C), come la **sinterizzazione del cemento e la laminazione a caldo dell'acciaio**.

Il riscaldamento a induzione ha un potenziale nella **lavorazione dei metalli**, dove è già utilizzato in applicazioni specifiche.

La tecnologia al plasma si sta affermando come una promettente alternativa per i processi ad alta temperatura (fino a 3.000 °C) grazie alla sua facilità di integrazione nei forni esistenti. Le attuali restrizioni, come la ridotta durata delle torce al plasma e la minore efficienza rispetto ai forni a gas, limitano l'applicabilità a breve termine di questa tecnologia.

Nuove tecnologie, come il **riscaldamento a onde d'urto** hanno anche il potenziale per aumentare l'attrattività e l'applicabilità dell'elettificazione diretta, soprattutto nei processi ad alta capacità e alta temperatura.

È probabile che queste e altre tecnologie migliorino nel prossimo decennio e possano ampliare i campi di elettificazione anche in aree complesse.

Modifiche ad alcuni processi produttivi possono contribuire a superare i limiti tecnologici e consentire l'elettrificazione diretta.

Ad esempio, elettrificando direttamente le fasi di produzione del clinker a temperatura più bassa o utilizzando macchine per l'essiccazione più lenta nella produzione della carta, è possibile ridurre la temperatura richiesta, facilitando l'uso di tecnologie di riscaldamento elettrico diretto.

In generale, **le tecnologie di riscaldamento elettrico diretto offrono una maggiore efficienza rispetto alle tecnologie basate su combustibile**, con l'eccezione delle torce al plasma, sebbene queste richiedano ulteriori sviluppi e la loro efficienza sia determinata dalle proprietà specifiche dell'applicazione.

Soluzioni più efficienti dal punto di vista energetico sono spesso più difficili da integrare nei processi esistenti rispetto a opzioni meno efficienti (ad esempio, pompa di calore rispetto a caldaia elettrica).

Come regola generale, **più bassa è la temperatura di processo, maggiori saranno i potenziali di efficienza che si possono raggiungere passando all'elettrificazione diretta.**