

Clima energia un sistema complesso

G. Turchetti

INFN Sezione di Bologna

Biosfera e cambiamenti climatici

Transizione energetica quale?

Ordine e caos

Sistemi con simmetrie (integrabili): moti **regolari predicibili**

Sistemi generici: moti regolari, caotici **predicibili statisticamente**

Sistemi complessi: auto-organizzazione

https://en.wikipedia.org/wiki/Stuart_Kauffman

regolare

caotico

complesso



Complessità

Sono complessi sistemi viventi e sistemi di vita artificiale

Unità elementare di vita artificiale. **Automa di Von Neumann** dotato di sensori, attuatori e capacità di **elaborare e memorizzare informazione**

Teorema: Possono esistere automi autoreplicanti (copia del progetto nel costruttore universale) e robusti anche con componenti suscettibili di guasti (ridondanza)

Gli automi si organizzano in reti con **proprietà emergenti** e **selezione evolutiva**

J. Von Neumann collected works Vol V Design of computers. Theory of automata



Clima e bilancio radiativo

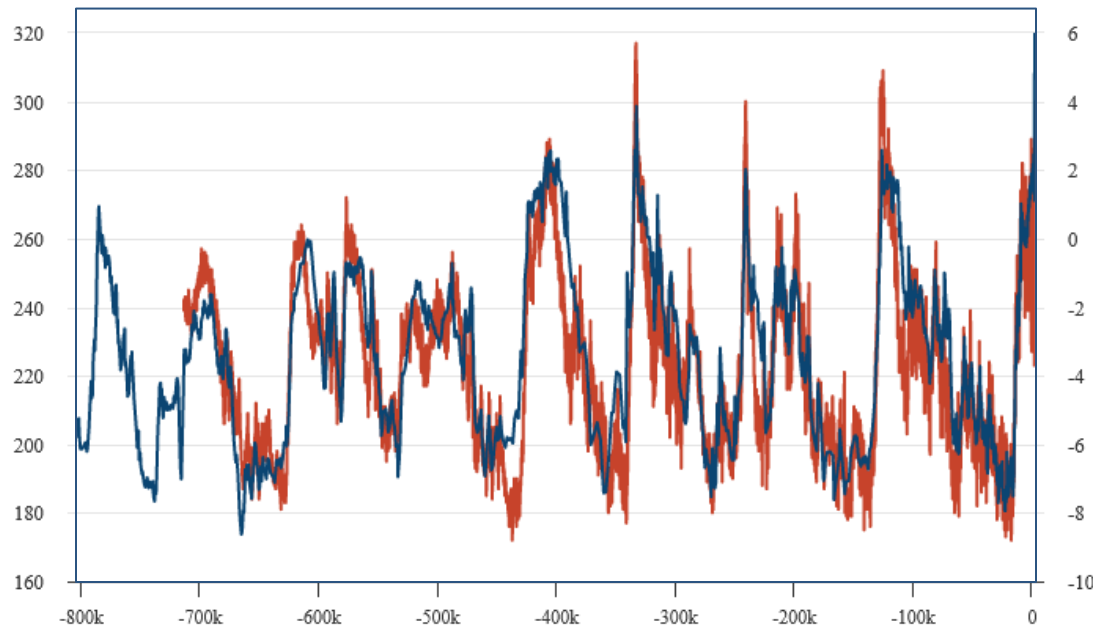
Il clima è definito da medie pluriennali dei parametri fisici quali temperatura T e precipitazioni sulla superficie terrestre.

T dipende dalla **distribuzione** della radiazione solare (varia con eccentricità orbita, inclinazione e precessione asse) che è in parte **assorbita** e dalla riflessione infrarossi da parte CO_2 la cui concentrazione dipende dalla **biosfera**.
Ciò rende il clima un sistema complesso.

<https://www.carbonbrief.org/explainer-how-the-rise-and-fall-of-co2-levels-influenced-the-ice-ages/>

CO_2
ppm

Carotaggi
Antartide



ΔT

Celsius

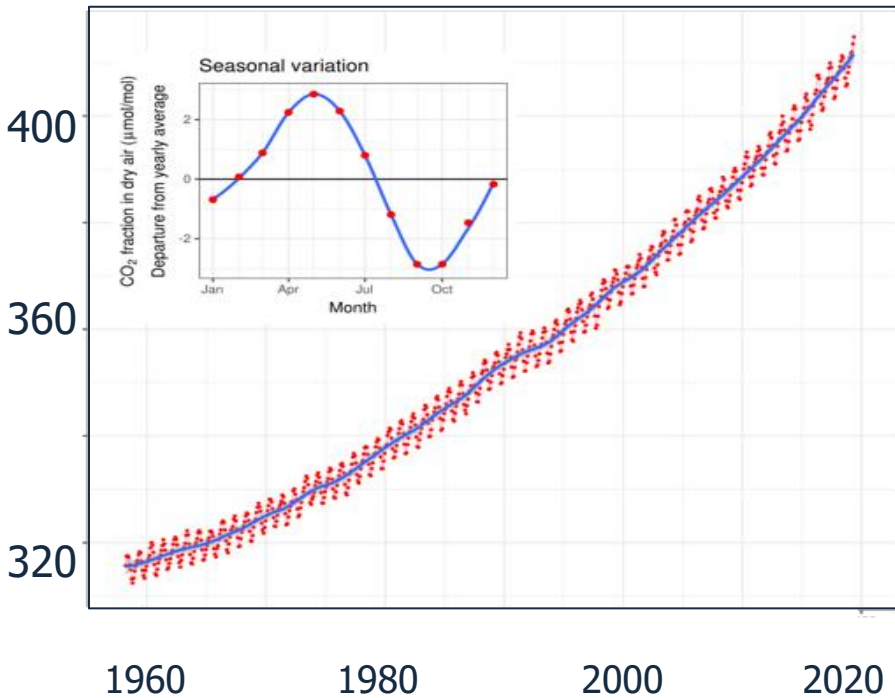
Eccentricità
1-4 10^5 anni

Asse 2-4
 10^4 anni

Cambiamenti climatici recenti

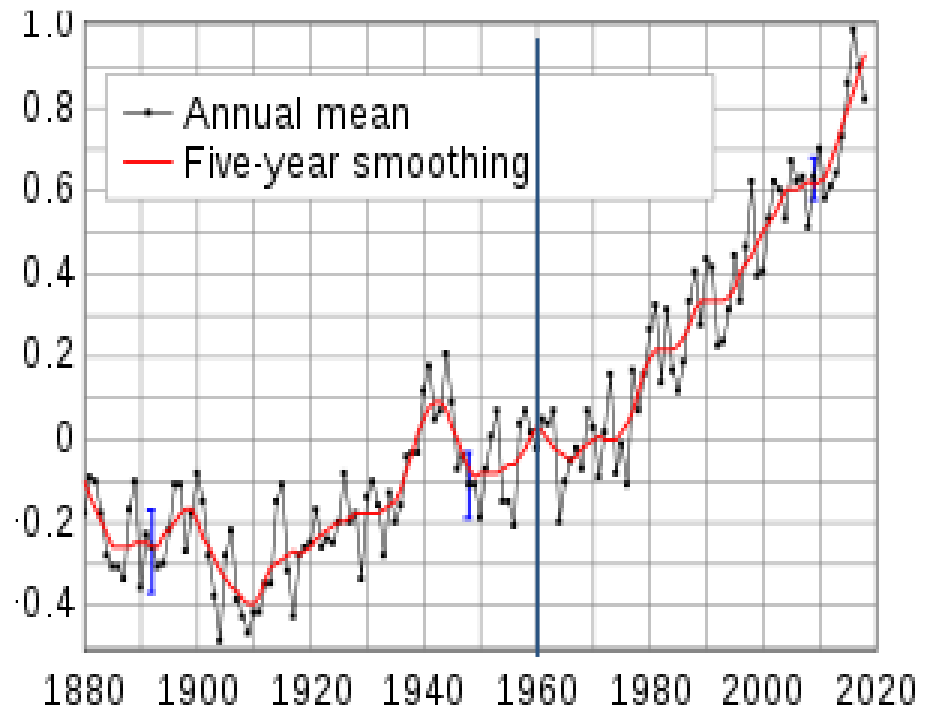
Il contributo **antropico** nel XX secolo, con emissioni di gas serra (CO_2 , CH_4) causate da combustibili fossili, agricoltura e allevamenti, ha prodotto una rapida variazione

Concentrazione CO_2 ppm



<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>

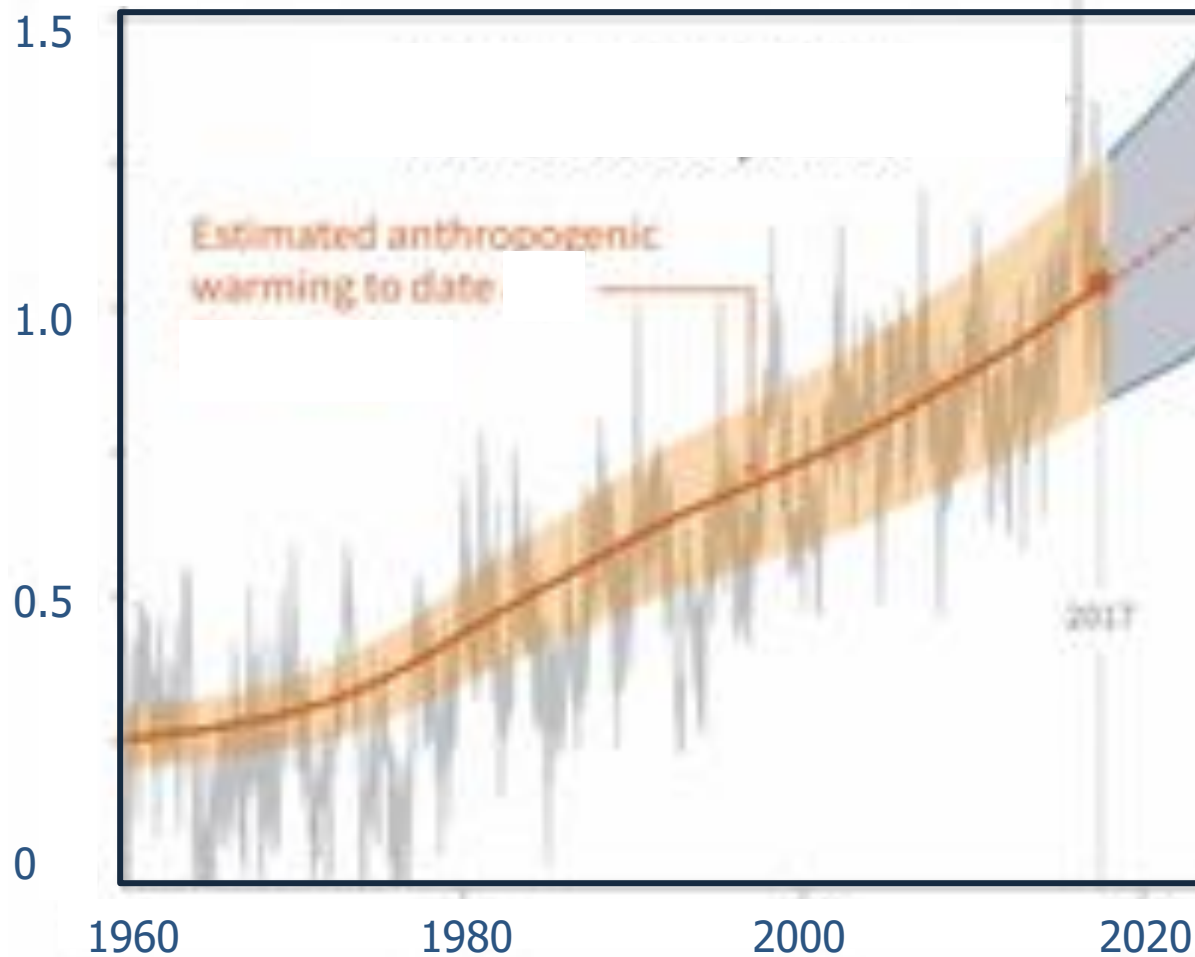
Variazione di temperatura media



https://it.wikipedia.org/wiki/Riscaldamento_globale

Variazione della temperatura media dal 1960 al 2020 è di 0.8° dati IPCC.
I dati precedenti forniscono stessa variazione e 1.2° dal 1900 al 2002

<https://www.ipcc.ch/sr15/graphics/>



Fonti di energia e demografia

Preistoria **biomasse**. Consumo diario pro capite $E_d=3$ KWh circa 1-1.5 volte consumo alimentare, annuo $E_a=1\ 100$ KWh ~ 0.1 Tep

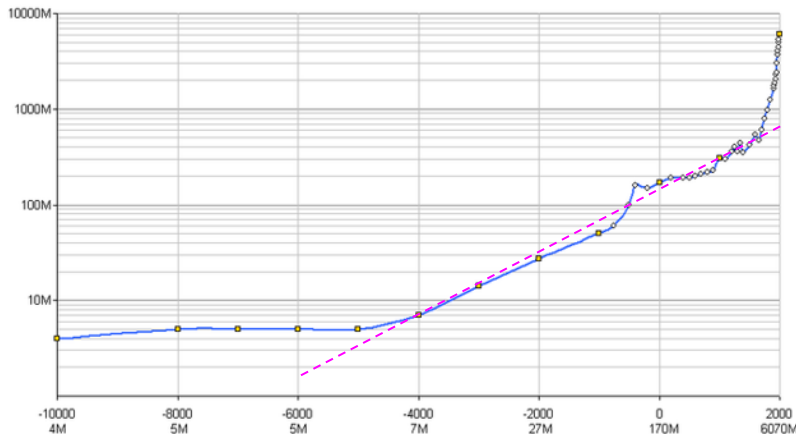
popolazione **10 milioni** consumo annuo $E=1$ Mtep

Storia (- 4000 , 1800) **biomasse , eolico**. Crescita esponenziale. Inizio 1800 popolazione **1 miliardo** consumo annuo $E=1$ Gtep

Presente (1800, 2022) **fossili, rinnovabili, nucleare** consumo $E=15$ Gtep

https://en.m.wikipedia.org/wiki/File:World_population_growth_%28lin-log_scale%29.png

Crescita demografica



<https://astrolabio.amicidellaterra.it/node/2908>

Anno 2022

	mondo	EU
N	8 mld	0.45 Mld
E	15 Gtep	1.5 Gtep
E/N	1.9 Tep	3.3 Tep

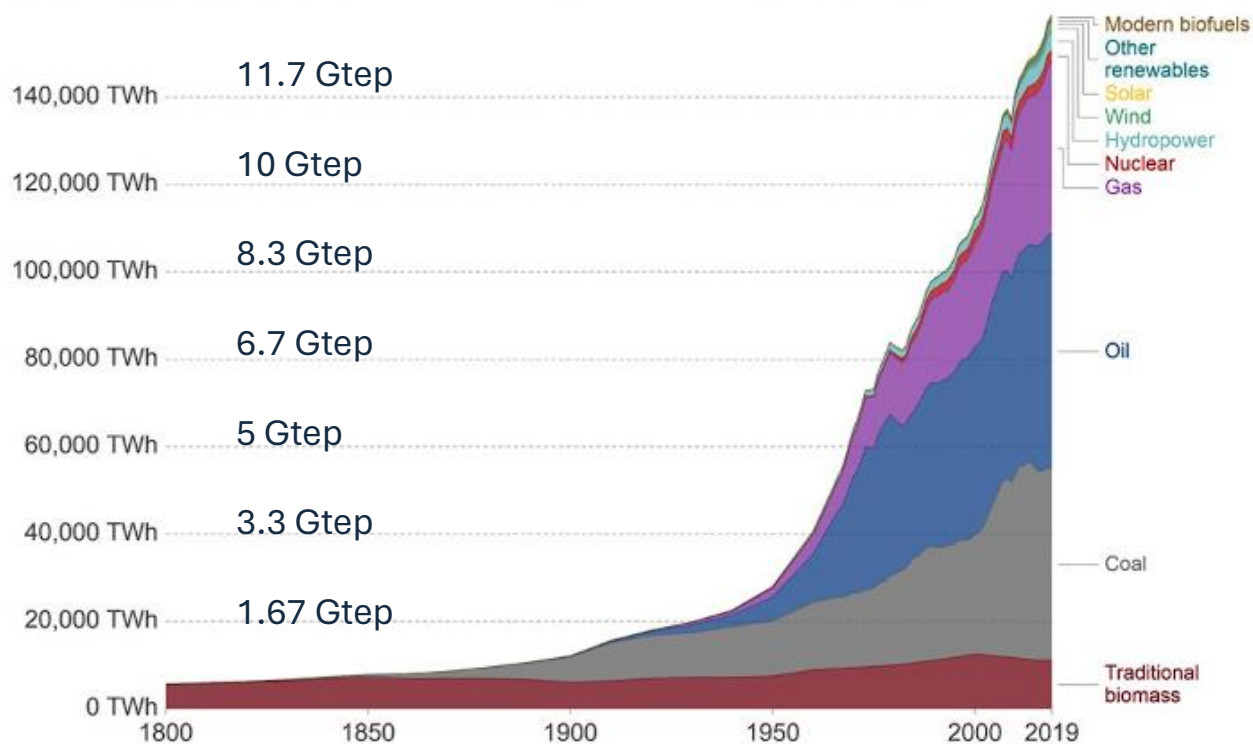
Consumi energetici

Energia primaria 2020: fossili 83%, idroel. è 7%
biomasse + altre rinnovabili 6%, nucleare 4%.

Energia elettrica : fossili 64%, idroel. 19%, altre rinn. 7%, nucleare 10%

<https://www.settimananews.it/societa/fonti-energetiche/>

Global direct primary energy consumption



Source: Vaclav Smil (2017) and BP Statistical Review of World Energy

OurWorldInData.org/energy • CC BY

Aumento concentrazione gas serra

Combustibili fossili e deforestazione: CO_2

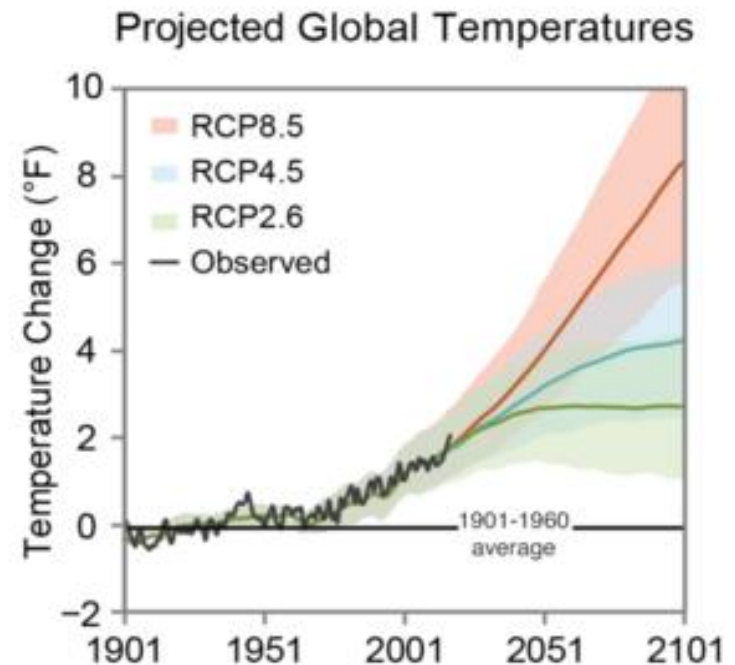
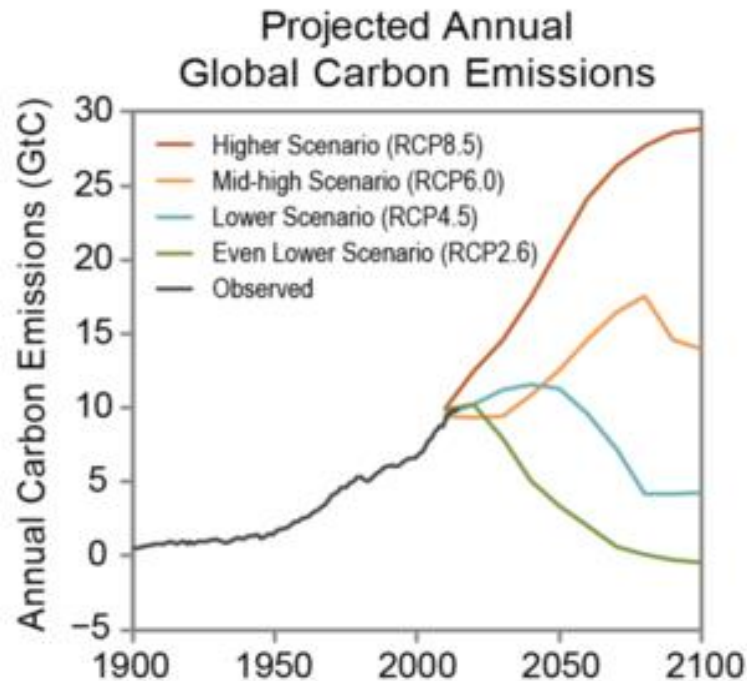
Agricoltura + allevamenti : CH_4

Variazione temperatura $\Delta T = 1.2^\circ$

Previsioni IPCC aumento da 2.5° e a 4°

<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>

<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/data.html>



Potere calorico densità di energia

Energia di reazione rilasciata come calore per unità di massa

$$1 \text{ KWh} = 3.6 \text{ MJ}$$

$$1000 \text{ Kcal} = 1.2 \text{ KWh}$$

$$1 \text{ Kep} = 12 \text{ KWh}$$

$$1 \text{ Tep} = 12 \text{ MWh}$$

$$1 \text{ GTep} = 12\,000 \text{ TWh}$$

<https://www.ingdemurtas.it/tabelle/potere-calorifico/>

Potere calorico in KWh/Kg



4.7



8.2



12.3



14

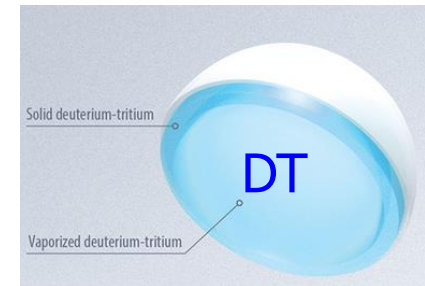


36



700 000

^{235}U
al 3%



(75 n) 90 000 000

reazioni nucleari

Consumi mondiali nel 2022

Energia primaria $E_p = 15$ Gtep di cui 83% fossili

Energia elettrica $E_e = 25.500$ TWh = 2.1 Gtep di cui 64% da fossili pari a 2.7 Gtep energia primaria con $\eta = 50\%$

Italia nel 2022

Energia primaria $E_p = 157$ Mtep (40% sopra la media)

Energia elettrica $E_e = 306$ TWh = 25.5 Mtep (per fonti 2023)

<https://www.terna.it/it/media/comunicati-stampa/dettaglio/consumi-elettrici-ottobre-2023>

Fossili 45.9%

Nucleare importato 18,5%

Idro+biomasse+geo= 19.5%

Eol +fotov 16.1 %

Consumo di suolo

Energia chimica **concentrata** rispetto a energia solare ed eolica.
Parchi eolici e fotovoltaici elevato consumo di suolo

Energia nucleare **altissima** concentrazione. Rapporto **1 a 1 milione**
come tra energie di legame chimico **1 eV** e nucleare **1 MeV**

<https://www.rivistaenergia.it/2021/07/la-ciclica-corsa-alluranio/>

Centrale $W = 1 \text{ GW}$ potenza media $\langle W \rangle = 0.5 \text{ GW}$
consumo annuo: 1.1 ton carbone, 10 ton U arricchito 3%

Fumi CO₂



$W_{\text{peak}} = 200$ $\langle W \rangle = 40 \text{ W/m}^2$



termo-elettrica

Fumi H₂O



elettro-nucleare

Area 15- 20 Km² (Eolico 200 Km²)

Area 10-15 h



Impronta di CO₂ LCA

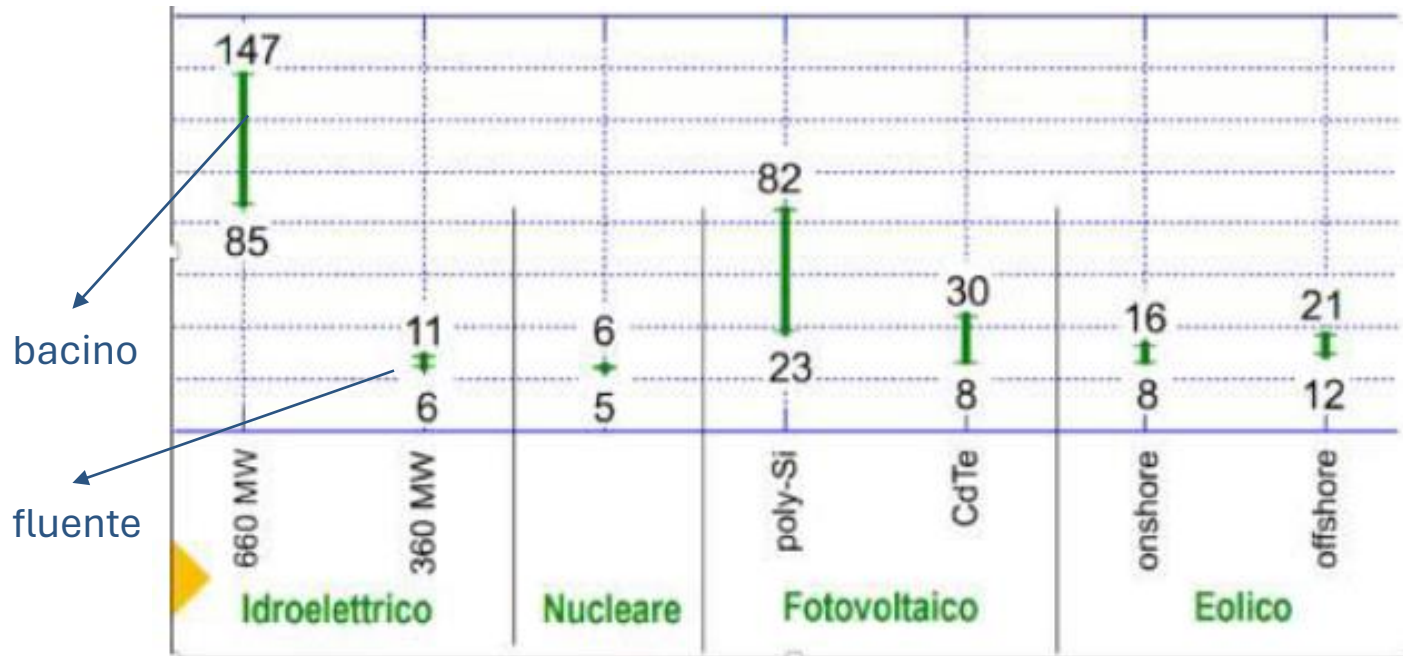
Il potere calorico di 1 Kg di metano è 14 kWh. Centrale elettrica con efficienza $\eta = 50\%$ emette 390 g di CO₂ per kWh

L'impronta della centrale nucleare è molto bassa perché il refueling è minimo

<https://astrolabio.amicidellaterra.it/node/3122>

L'impronta carbonica delle rinnovabili è piccola ma non trascurabile

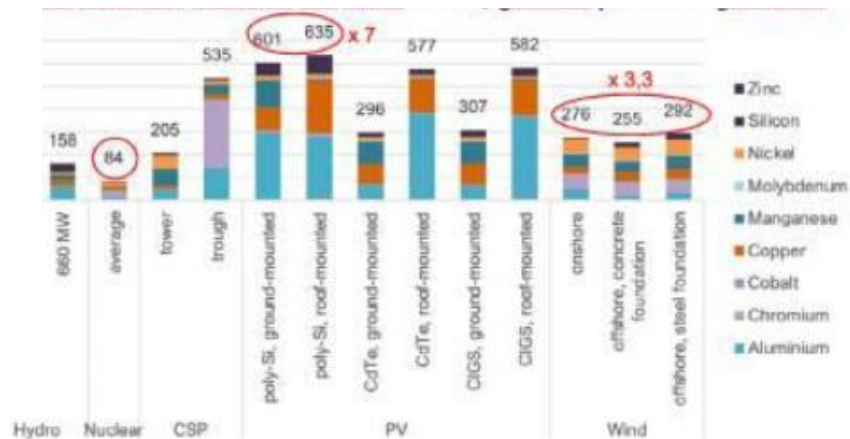
LCA analisi ciclo di vita: g CO₂ per kWh



Centrale a metano

390 g CO₂

Tonnellate di metalli per TWh generato



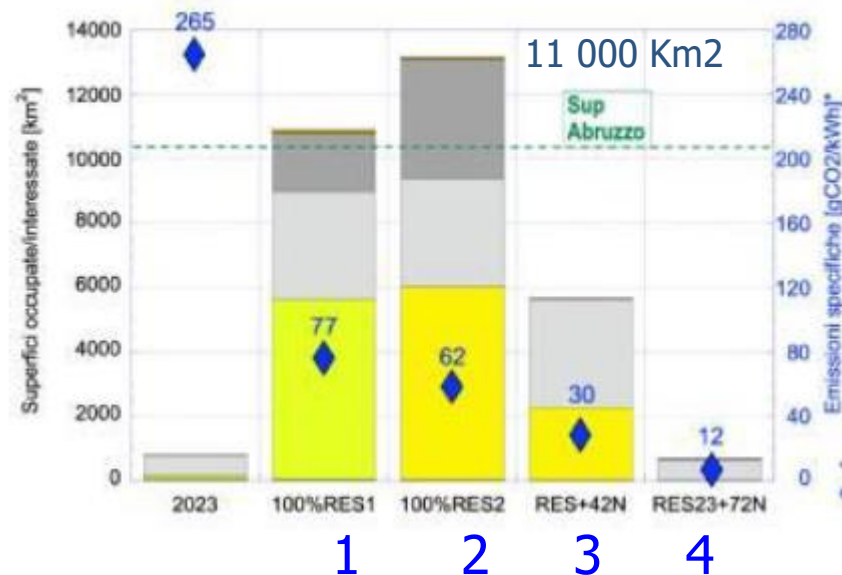
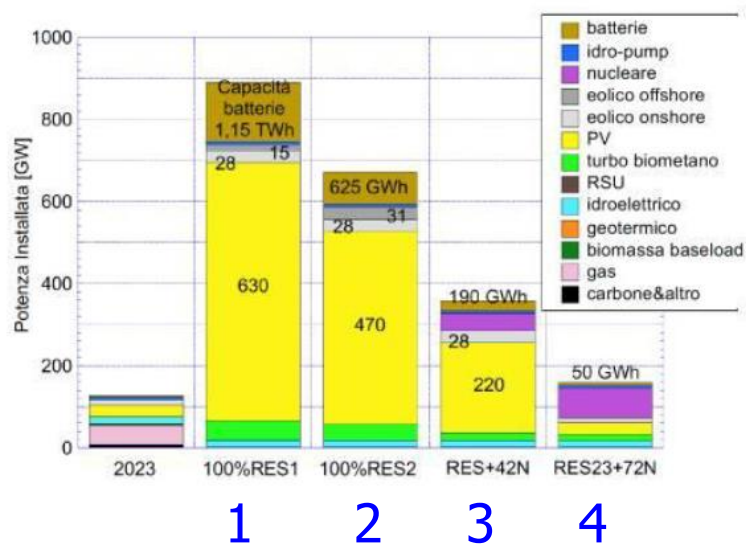
CSP solare a concentrazione

PV solare fotovoltaico

Confronto di suolo 4 scenari al 2050:

1 e 2 solo rinnovabili, 3 con 42 GW nucleare, 4 con 72 GW nucleare

<https://astrolabio.amicidellaterra.it/node/3122>

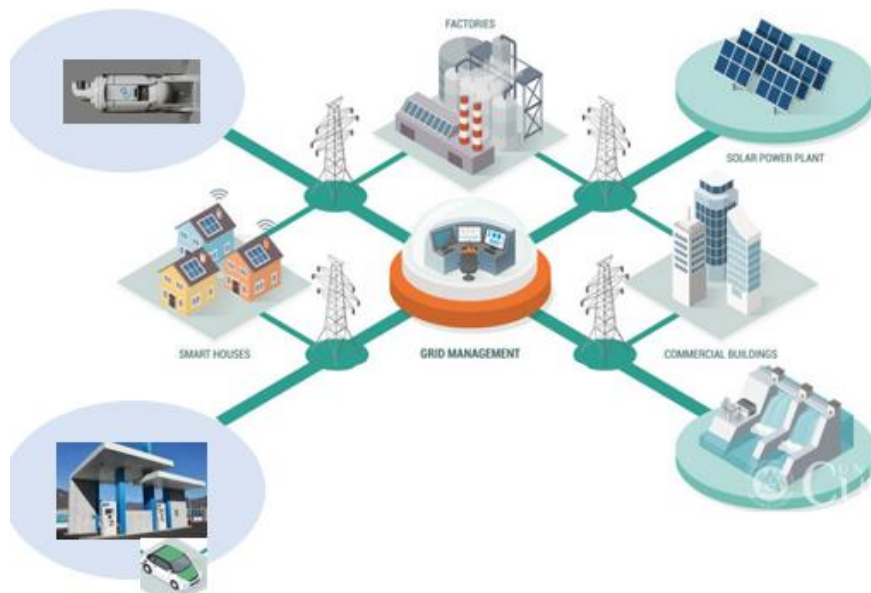


Comunità energetiche

Le piccole comunità energetiche potranno integrare rinnovabili e idrogeno, per mobilità e utilizzi industriali. Le medie e grandi comunità potrebbero avere **impianti nucleari** di minima e piccola taglia MMR, SMR.

L'idrogeno è leggero e molto reattivo ha elevato potere calorico. Ricavato per idrolisi con elevata efficienza 80%. La riconversione in elettricità tramite celle a combustibile ha efficienza 60%. Ottimo **vettore energetico**

Carico di base: eolico e fotovoltaico sono **intermittenti**. Sistemi di **accumulo** necessari per carico di base. Efficienza: $H_2 \eta=50\%$, batterie al litio $\eta=95\%$



comunità
smart grid

Rischi delle filiere energetiche

I dati sono cumulativi riguardo costruzione, incidenti (rottura diga, fusione nocciolo), processi di estrazione e raffinazione.

Il nucleare negli impianti di Giappone, EU, UK e USA non ha avuto morti nonostante Three Miles Island e Fukushima.

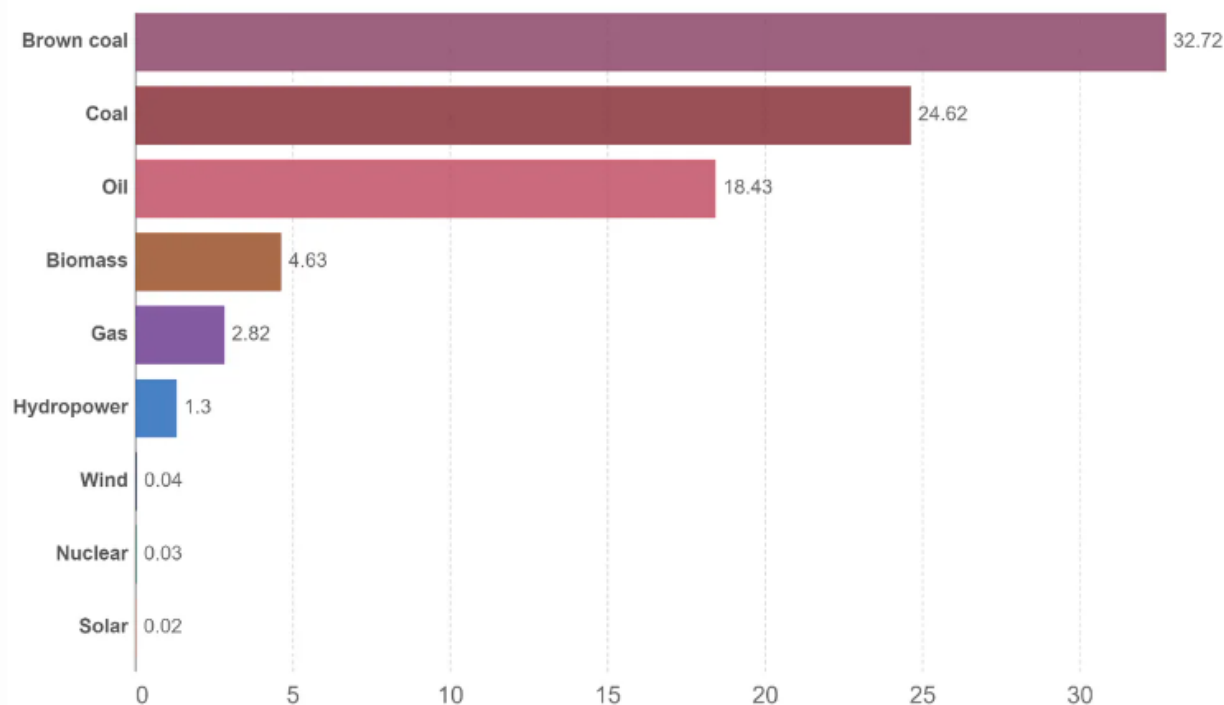
Incidenti gravi avvenuti in impianti nucleari di tipo militare come Chernobyl

<https://www.morningstar.it/it/news/243169/revival-del-nucleare-il-vincitore-%C3%A8-luranio.aspx>

Death rates per unit of electricity production

Death rates are measured based on deaths from accidents and air pollution per terawatt-hour (TWh) of electricity.

Our World
in Data



La transizione richiede scelte non ideologiche

Dibattito su energia con vertici di *ENI, ENEL, TERNA*

<https://www.radioradicale.it/scheda/721746/9-edizione-della-scuola-di-formazione-politica-della-lega>

Docufilm *Nuclear now* di Oliver Stone

<https://www.la7.it/oliver-stone-nuclear-now/rivedila7/nuclear-now-6122023-07-12-2023-517545>

Per i più giovani *Il nucleare i dubbi più grossi*

<https://www.youtube.com/watch?v=Sm5kFXpJc9k>

Relazione commissione Assemblée Nationale Jean Marc Jancovic

<https://www.youtube.com/watch?v=oweVFXFFh04>

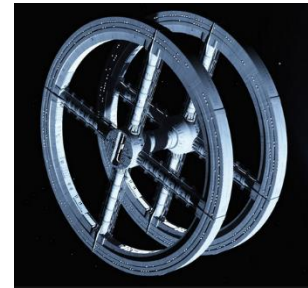
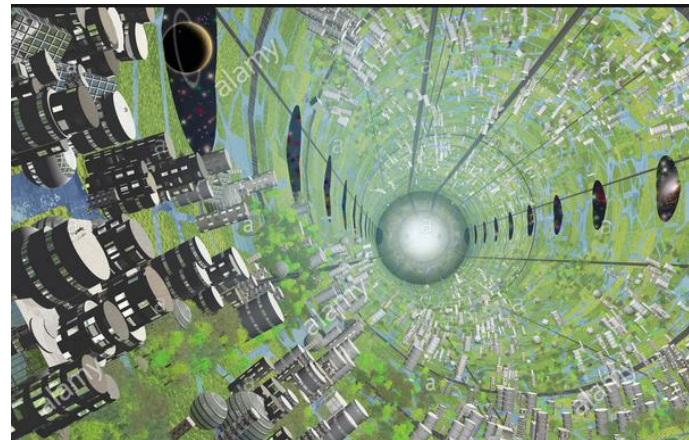
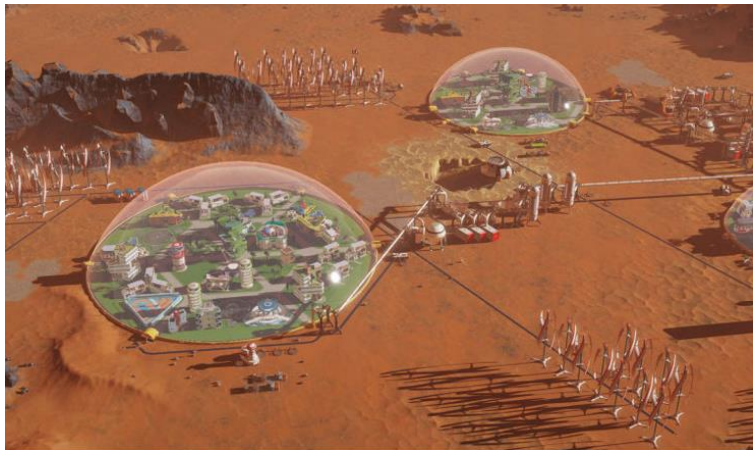
Per i più giovani *Il mondo senza fine* graphic novel di J.M. Jancovici



Espansione o estinzione?

Consumi di **fossili** e materie prime incompatibili con ecosistema
Riduzione crescita e consumi, **transizione** a rinnovabili e nucleare
Espansione nel sistema solare nei **prossimi secoli** (fissione)
forse negli esopianeti vicini nei **prossimi millenni** (fusione)
se non ci estinguiamo prima o regrediamo drasticamente.

S. Hawking: i viaggi nello spazio potrebbero essere un'assicurazione sulla vita per la nostra specie in futuro



Grazie

per la vostra attenzione

Il nucleare italiano

Dopo i referendum è stata interrotta o quasi la ricerca sui reattori nucleari. Occorre ripristinare il **consenso sociale** su tale fonte, trovare un deposito per le scorie e cambiare la normativa per rilanciare ricerca e impianti in Italia.

La società Newcleo fondata da Stefano Buono sta collaborando con ENEA a un SMR di IV generazione da 300 MW raffreddato al piombo, il prototipo sarà realizzato in Francia. Westinghouse e Ansaldo hanno un progetto simile.

Westinghouse ha anche sviluppato un MMR da 5 MW eVinci e la Ultrasafe Nuclear di Francesco Veneri sta completando un MMR analogo in Canada.

<https://newcleo.com/> <https://www.usnc.com/usnc-power/>

<https://www.westinghousenuclear.com/energy-systems/evinci-microreactor/>



Costo KWh nei 4 scenari 2050

1 e 2 solo rinnovabili, 3 con 42 GW nucleare, 4 con 72 GW nucleare

<https://astrolabio.amicidellaterra.it/node/3122>

Costo livellato LCOTE
c€/KWh

