



**ITALIA
SOLARE**

Il fotovoltaico è di tutti



Forum



Consiglio Nazionale delle Ricerche

FOTOVOLTAICO: IL TRIONFATORE DELLA TRANSIZIONE

Nicola Armaroli

CNR-ISOF

nicola.armaroli@cnr.it | www.isof.cnr.it/armaroli_nicola


Consumo mondiale di energia primaria, 2022

32.0%, PETROLIO

26.6%, CARBONE

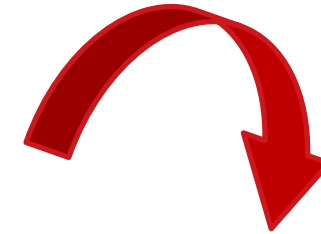
23.5%, GAS

7.5%, RINNOV. NON IDRO 

6.7 %, IDRO 

4.0 %, NUCLEARE 

82.1%



34.3 miliardi
di ton CO₂ l'anno

**Benissimo che vada,
la situazione climatica
sarà comunque peggiore**

Data from: EI, 2023 and Our World in Data, 2023

Il nocciolo del problema energetico: bruciamo troppo

IERI



OGGI, LA NOSTRA CIVILTÀ MODERNA(?)



Muoverci



Scaldarci



Produrre
elettricità

Consumi gas Italia 2021:
70 miliardi di m³, di cui
Prod. Elettrica: 30 mld.
Riscald. Edifici: 20 mld.

USI EVITABILI

La via di uscita principale: elettrificazione

Dalle molecole (es. idrocarburi come metano e benzina) agli elettroni

Energy & Environmental Science

Cite this: *Energy Environ. Sci.*, 2011, **4**, 3193

www.rsc.org/ees

Towards an electricity-powered world

Nicola Armaroli^{*a} and Vincenzo Balzani^{*b}

Received 2nd March 2011, Accepted 21st April 2011
DOI: 10.1039/c1ee01249e

- I motori elettrici sono molto più **EFFICIENTI** dei motori a combustione
- Abbiamo già le **TECNOLOGIE** elettriche rinnovabili sul mercato. E sono le più **COMPETITIVE** sotto ogni aspetto (costi, tempi, ...)



ESEMPIO: AUTO A BATTERIA

- Consuma 4 volte meno di un'auto a benzina
- Il costo è già competitivo

Il fulcro della transizione: Tecnologie rinnovabili elettriche



A che punto siamo con le rinnovabili?



Elettricità: dove vanno gli investimenti?

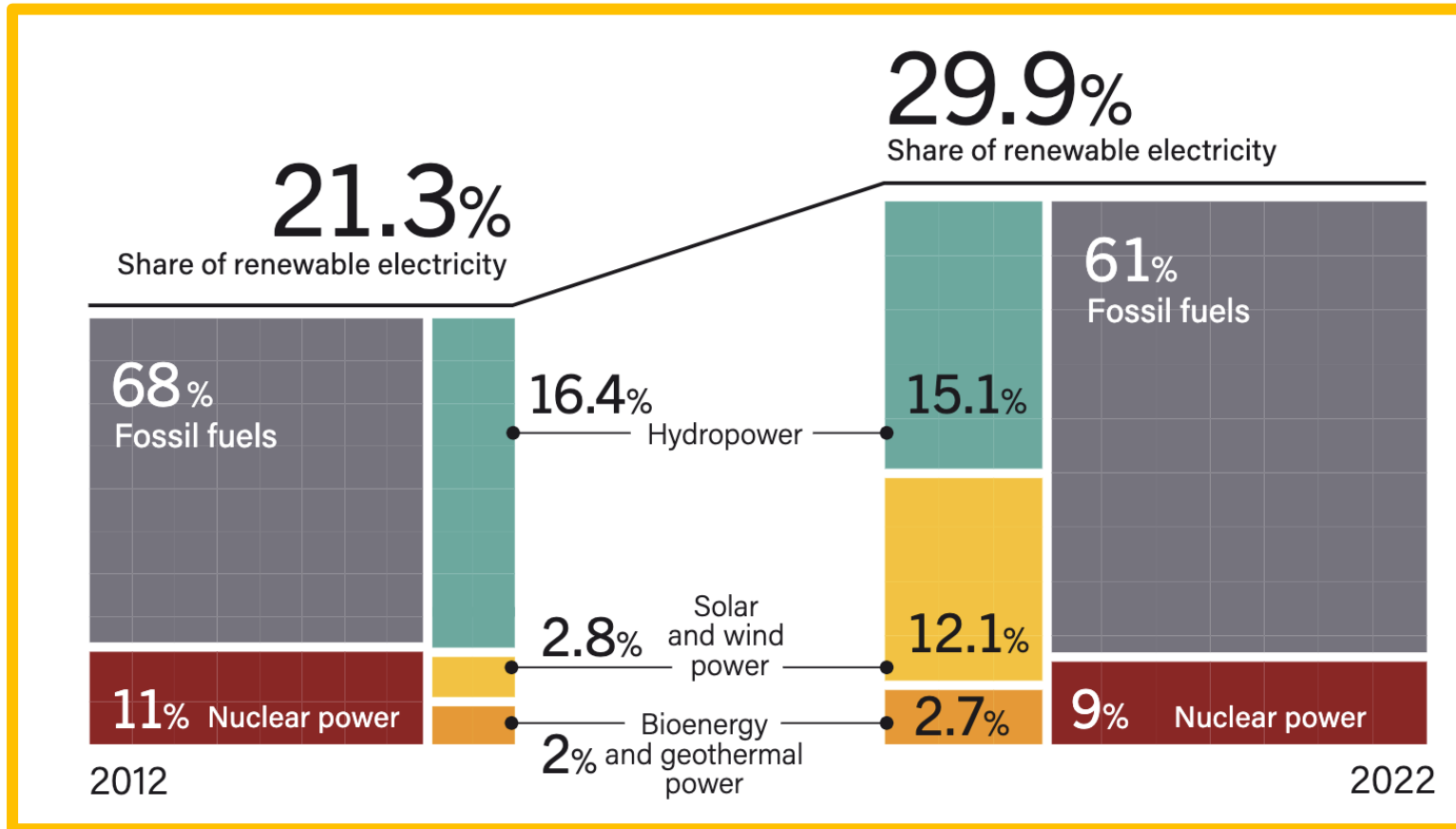


NUOVI IMPIANTI DI PRODUZIONE ELETTRICA, MONDO 2012-2021

Bloomberg NEF
Nov. 2022

Produzione elettrica: trend 2012-2022

2012



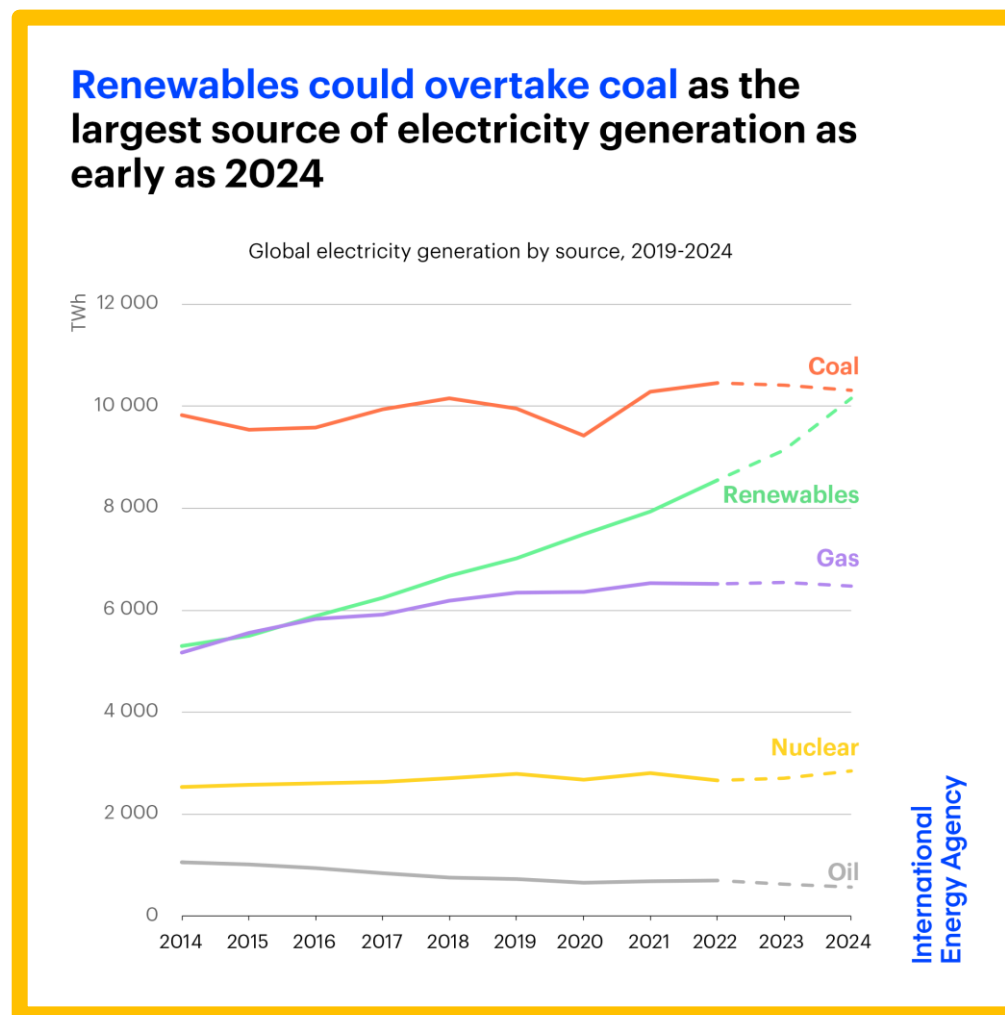
2022

22,8 PWh

29,8 PWh

+ 30,7%

Leggende : le rinnovabili non contano



IEA
Settembre 2023

I DUE DOMINATORI



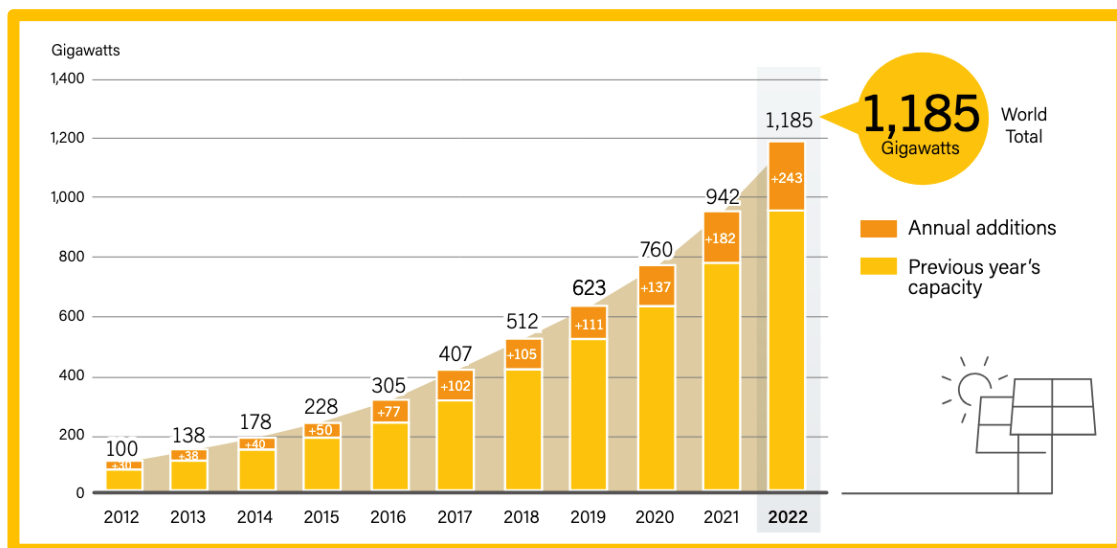
FOTOVOLTAICO



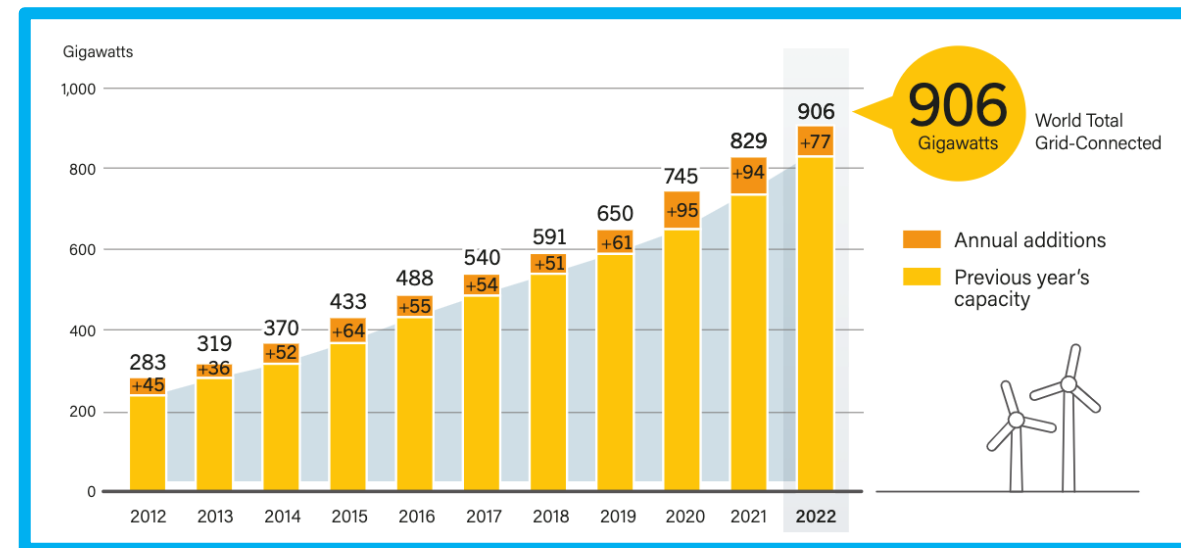
EOLICO

Trend fotovoltaico ed eolico, 2012-2022

FOTOVOLTAICO



EOLICO



REN 21, Global Status Report, 2023

VENTO + FOTOVOLTAICO 2022 (MONDO)
HANNO PRODOTTO L'EQUIVALENTE DI
OLTRE 600 CENTRALI NUCLEARI O A CARBONE DA 1 GW

Italia 2009-2011: parole

24 febbraio 2009 • 00:00

ACCORDO ENEL-EDF PER LO SVILUPPO DEL NUCLEARE IN ITALIA



[Home](#) / [News](#) / [Ambiente](#) / [A gennaio i siti delle centrali nucleari](#)

A gennaio i siti delle centrali nucleari

A gennaio 2011, quando arriveranno le prime domande per la costruzione delle centrali nucleari, si conosceranno anche i siti, almeno i primi due, dove saranno realizzate.

 02 Settembre 2010

1054 letture

ENEL ACCENDE IL NUCLEARE - ECCO IL PIANO SEGRETO DI CONTI PER LE NUOVE CENTRALI - "NUCLEARIZZATE" LE SPIAGGE VIP DI CAPALBIO E SABAUDIA

in Articoli e studi



- 4 IMPIANTI EPR da **1,6 GW**
- PROD. ATTESA: **50 TWh/anno**
- PROD. EFFETTIVA: **0 kWh**

Italia 2023: fatti concreti



2022: 28,2 TWh
ca. 10% della produzione nazionale

2023: 30 GW → **35 TWh/anno**



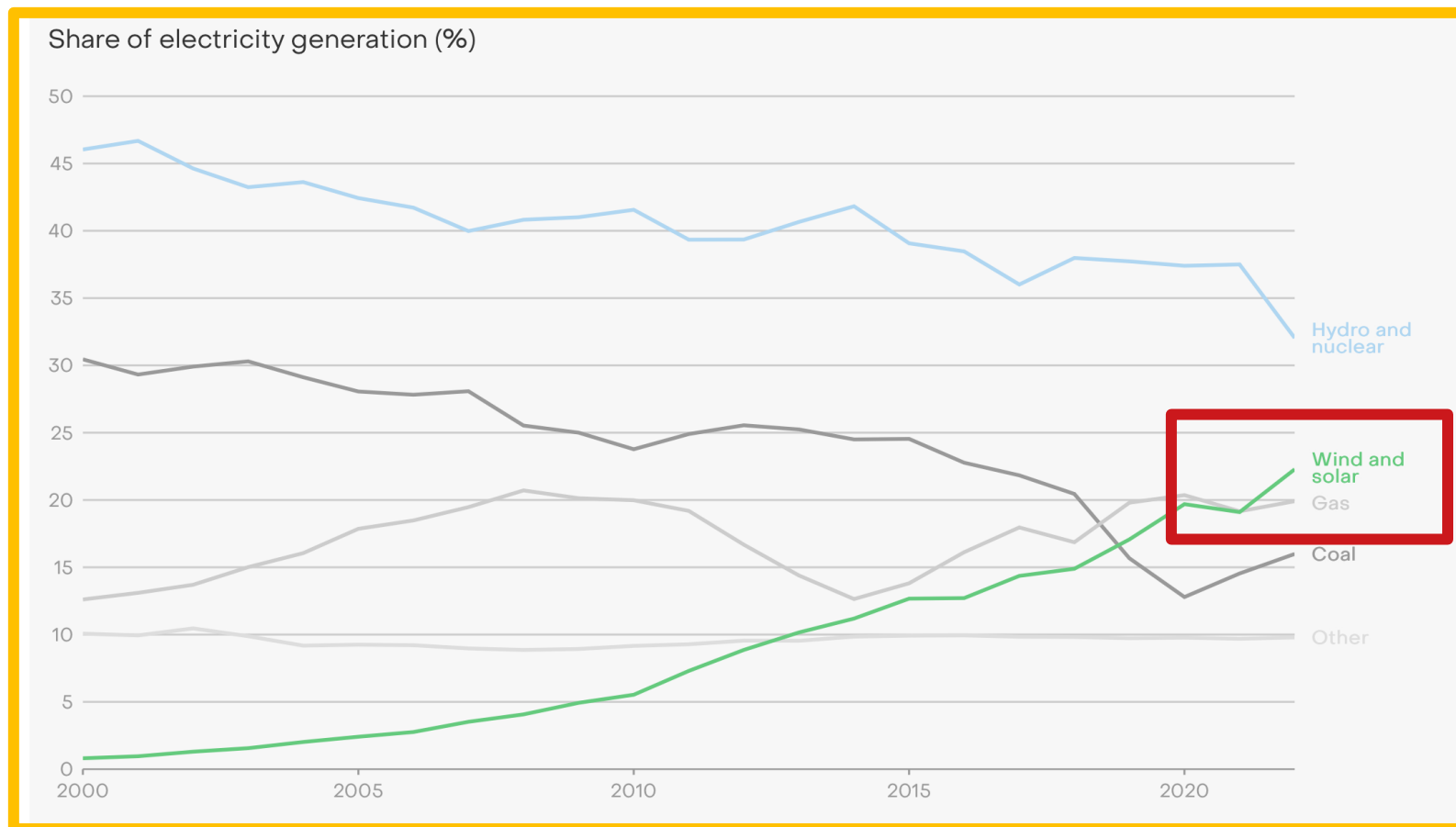
2023: 12,5 GW



21 TWh

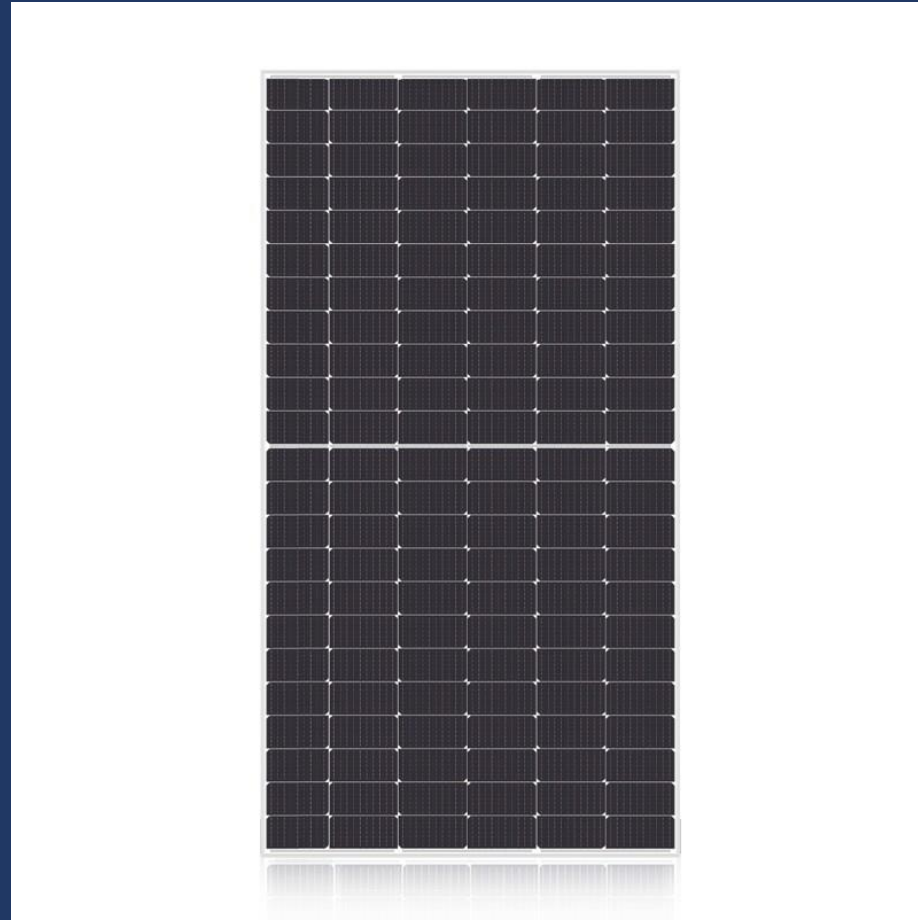
Sole e vento, 2023
35 + 21 = 56 TWh
Più del piano nucleare
2009-2011

Europa, 2022: la produzione di FV + eolico supera quella da gas!

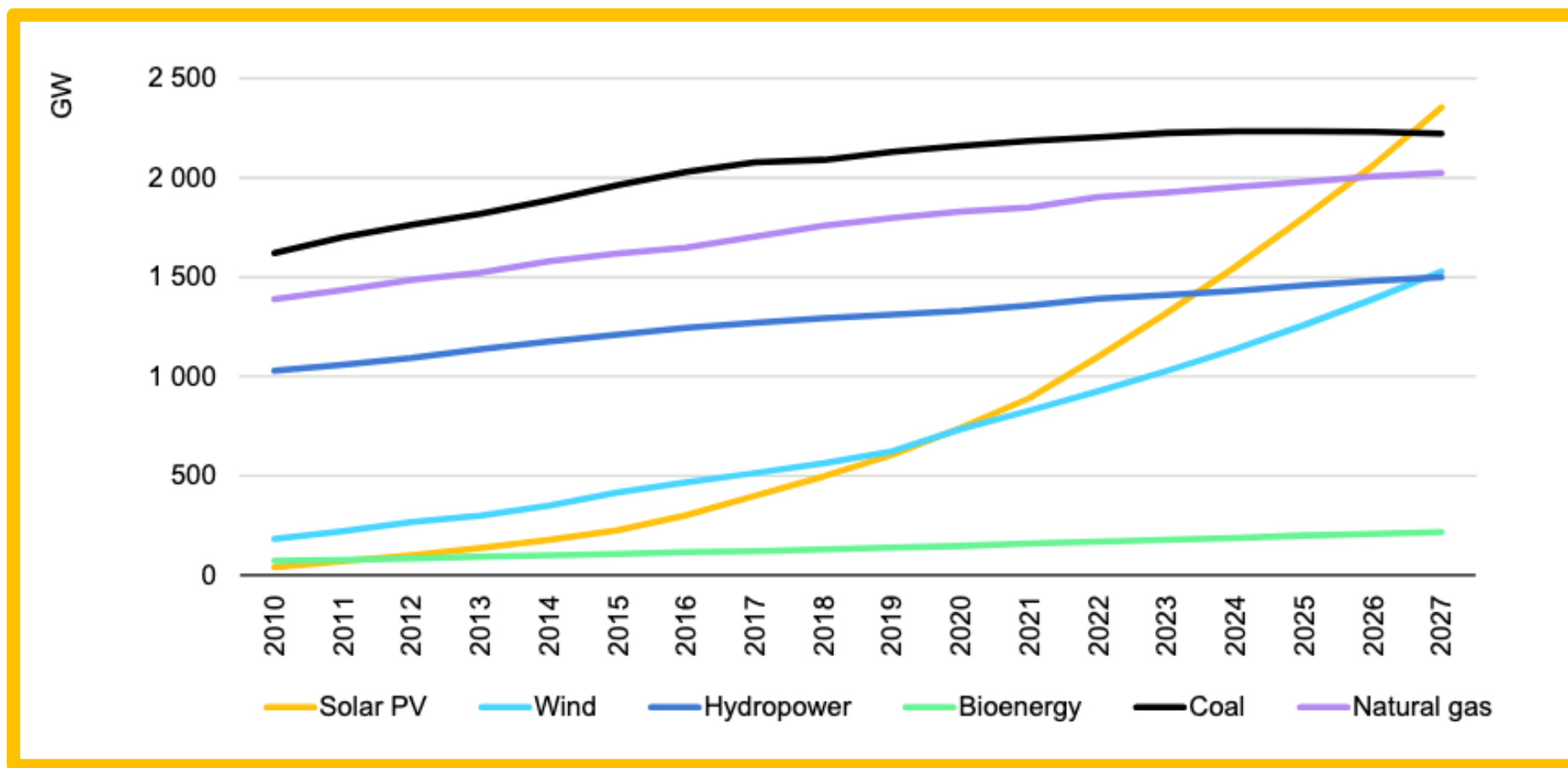


EMBER, 2023

IL TRIONFATORE



2027: il fotovoltaico sarà la tecnologia elettrica più installata al mondo



IEA, 2022

Perché il fotovoltaico stravinca?

EDITORIALE 5

Il trionfatore della transizione

Nicola Armaroli



Il 26 aprile 1954 il *New York Times* pubblicò in prima pagina, taglio basso, una notizia stravagante. I Laboratori Bell avevano messo a punto una «batteria» fatta di un «ingrediente della sabbia» che poteva realizzare uno dei grandi sogni dell'umanità: alimentare la civiltà umana con l'energia senza limiti del Sole». Forse persino l'ignoto redattore era scettico su quanto scrisse con tanta enfasi, denominando erroneamente «batteria» la prima cella fotovoltaica al silicio, un dispositivo che convertiva direttamente luce solare in elettricità con sorprendente efficienza.

Dopo quasi 70 anni, quella curiosità scientifica sta ridefinendo il sistema elettrico mondiale. Nel 2022 il fotovoltaico (FV) ha prodotto elettricità pari a oltre 150 grandi reattori nucleari, e più del 95% degli impianti fotovoltaici sono basati sulla tecnologia al silicio introdotta, appunto, nel 1954. Oggi in Italia il fotovoltaico copre oltre il 10% della produzione elettrica nazionale. L'Agenzia Internazionale per l'Energia stima che entro il 2027 la potenza fotovoltaica installata nel mondo supererà quella di tutte le altre tecnologie elettriche, carbone compreso. La Cina ha anticipato la rivoluzione, concentrando nelle sue fabbriche il 75% della produzione mondiale. Lo ha fatto anche con pratiche commerciali scorrette (produzione sottocosto, la differenza la pagano gli Stati) che comunque hanno contribuito a far crollare i prezzi, rendendo il fotovoltaico accessibile alle tasche di milioni di persone. Europa e Stati Uniti oggi tentano di colmare il gap industriale, ma non sarà facile.

La produzione di un impianto fotovoltaico varia enormemente nel corso del giorno e delle stagioni e può sorprendere che questo tallone di Achille non ne mini la galoppata. Il problema dell'intermittenza giornaliera in impianti residenziali è oggi superabile grazie all'accoppiamento con batterie. Scrivo a metà maggio e il mio impianto fotovoltaico ha coperto il 76% del consumo domestico da inizio anno, con una percentuale perfettamente ripartita al 38% tra consumo diurno diretto e accumulato da batteria. Il fatto che questi mesi includano l'intero inverno

e che io abiti nella grigia Pianura Padana spiega le praterie di autoproduzione, risparmio economico e sicurezza energetica che si stanno aprendo, in un Paese soleggiato come l'Italia. A fine anno la mia casa neogas avrà prodotto molta più energia di quella che consumo, incluso riscaldamento, raffrescamento e ricarica dell'auto per oltre 8 mesi, immettendo l'eccesso in rete. Per i condomini e le imprese (capannoni) si ottengono autocostruzioni inferiori, ma comunque significative. La crescita del fotovoltaico richiede un adeguamento progressivo della rete elettrica, che è chiamata a gestire un numero crescente di autoproduttori. Il progresso continua anche in questo ambito.

Il settore è circondato da leggende metropolitane che non fanno neanche più ridere: un pannello non produce l'energia necessaria per fabbricarlo (ne produce almeno 25 volte tanto, non è riciclabile (occupiamo benissimo come farlo), occupa suolo agricolo (in Italia oggi abbiamo 160 km² di FV a terra, una quota irrisoria su un Paese di 300.000 km² che produce già il 10% da FV).

Ma il vero motivo del trionfo del fotovoltaico è dato dalla sua impareggiabile semplicità, modularità e versatilità rispetto a tutti i concorrenti, convenzionali e rinnovabili. La produzione e il riciclo sono standardizzati: i pannelli sono di fatto tutti uguali. È possibile fare impianti minuscoli da 2 kilowatt sul garage o immensi da 3 gigawatt nel deserto usando sempre lo stesso identico «pezzo», moltiplicato al bisogno. Un pannello può essere caricato facilmente su ogni mezza di trasporto, dalla nave container al cammello, e recapitato in ogni angolo del mondo. Quasi sempre le piattaforme di installazione sono già disponibili: i tetti degli edifici e dei capannoni. Può essere collocato su un parcheggio a Milano o su una baracca sperduta nella savana. Non richiede manodopera specializzata per l'installazione. Non ha parti in movimento, il che gli garantisce una durata impareggiabile e una manutenzione bassissima. Ha sbaragliato e sarà il dominatore. Il 26 aprile è l'anniversario di «Cernobyl», anche il destino sembra voler dire la sua.

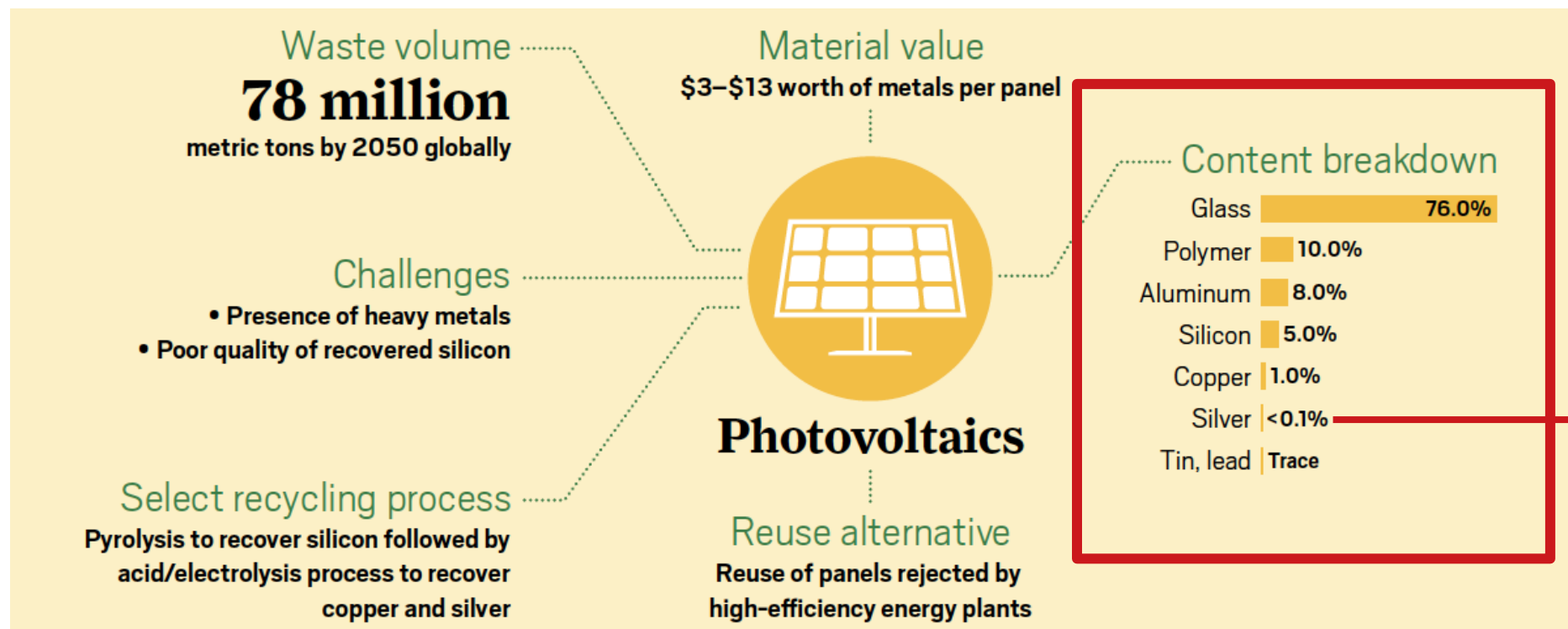
Sapere, giugno 2023



- Produzione e riciclo standardizzati: i pannelli sono tutti uguali
- Modularità: stesso "pezzo" per 2 kW, 2MW, 2 GW
- Bassissima criticità dei materiali impiegati
- Costo in calo costante: accessibile a milioni di tasche
- Trasporto: caricabile ovunque, dal megacargo al cammello
- Installabile ovunque: dalla megalopoli al villaggio
- Piattaforme di installazione già pronte: tetti e superfici
- Non richiede manodopera ultraspecializzata
- Non ha parti in movimento: lunga durata, bassa manutenzione
- Accoppiabile con batterie (altra tecnologia modulare)
- Elevata accettabilità sociale

Criticità dei materiali per il fotovoltaico

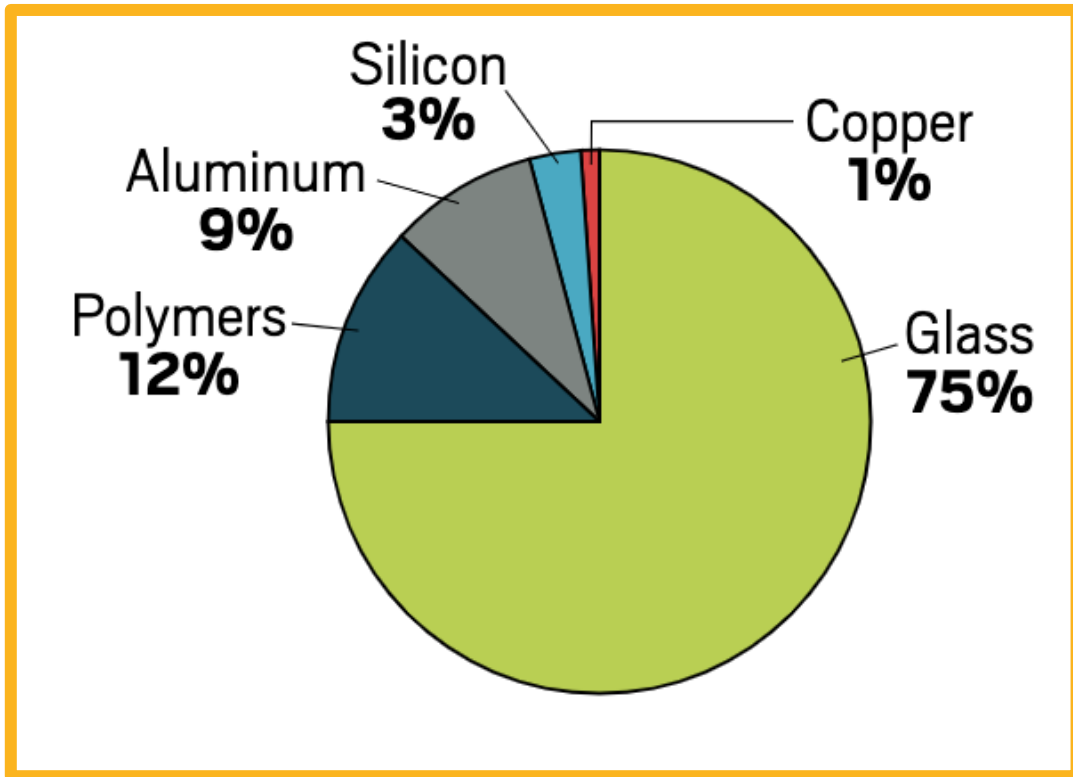
Guardiamo in fondo alla filiera



ARGENTO
è l'unico
materiale critico
rilevante

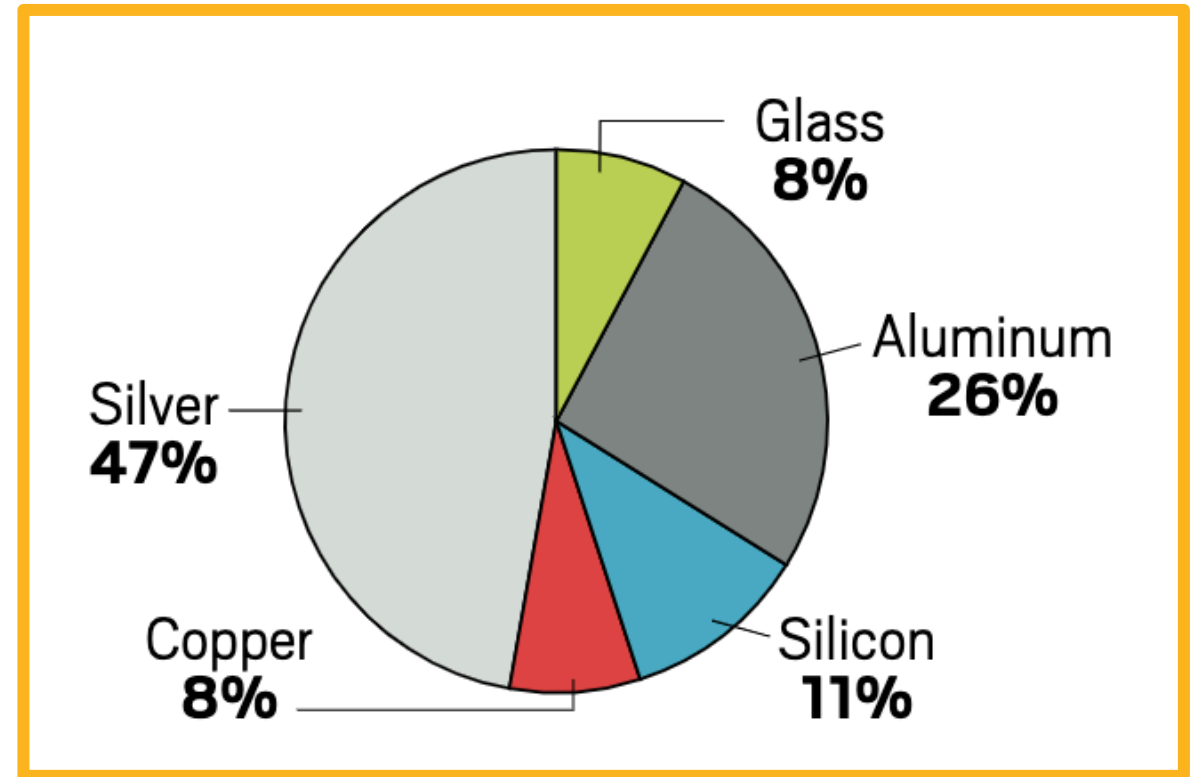
Riciclo: Peso vs. Valore

PESO



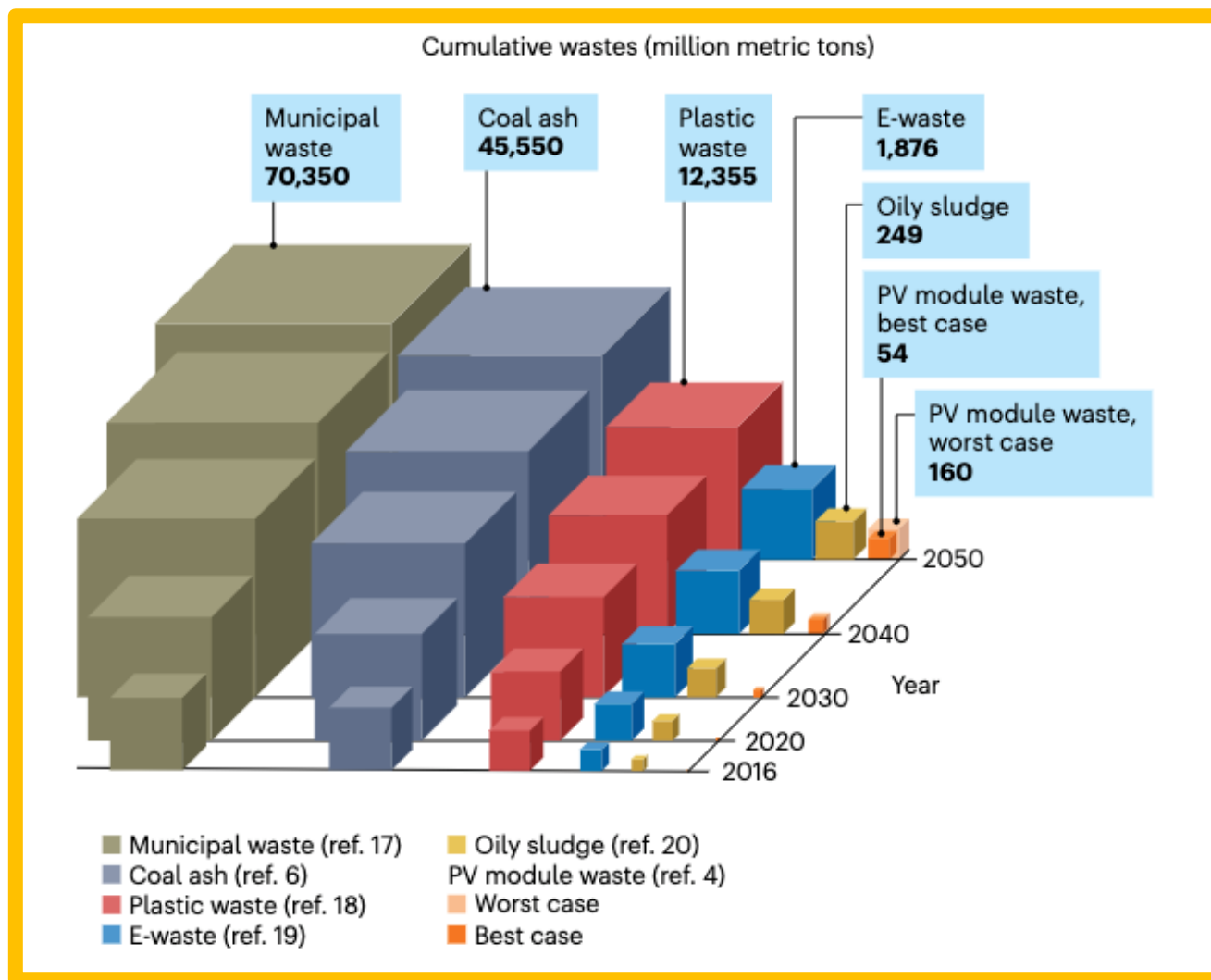
Argento < 1% in peso

VALORE ECONOMICO



Chem. Eng. News, May 23, 2022

NON saremo sepolti dai pannelli FV dismessi



Mirletz et al.
Nature Physics, 2023, 19, 1376

Processo chiave: Produzione polysilicon purissimo

Making polysilicon

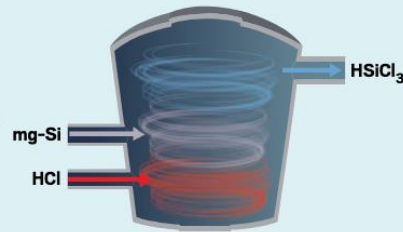
To create the polysilicon—a crystallized form of nearly pure silicon—needed for solar panels, manufacturers begin with quartzite gravel, a compound that contains silicon dioxide. The multistep process results in 99.9999% silicon.



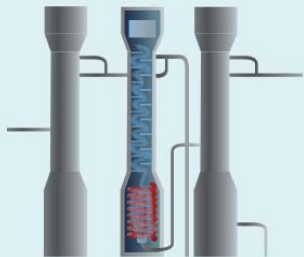
► **Step 1:** Quartzite gravel containing silicon dioxide is the starting material for polysilicon.



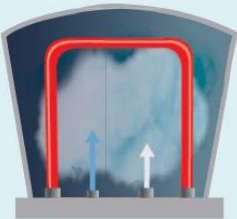
► **Step 2:** The quartz is melted down to silicon metal, which is at least 98% pure silicon.



► **Step 3:** Silicon metal is combined with hydrogen chloride to form liquid trichlorosilane.



► **Step 4:** Impurities are removed by distilling the trichlorosilane.



► **Step 5:** Trichlorosilane is pumped into horseshoe-shaped chambers that contain a thin filament of polysilicon. Electricity runs through the filament, heating it to 1,000 °C.



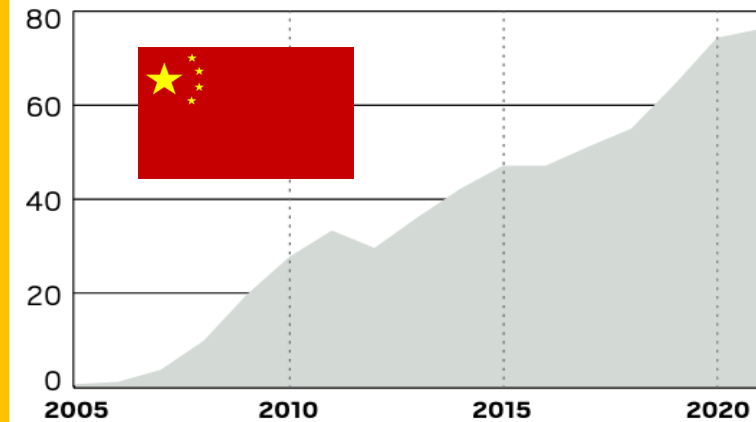
► **Step 6:** The silicon deposits onto the filament, turning it into a thick rod that is at least 99.9999% silicon.



► **Step 7:** The rods are broken into chunks and sold to companies that make silicon wafers for solar panels.

Source: Adapted from Wacker Chemie.

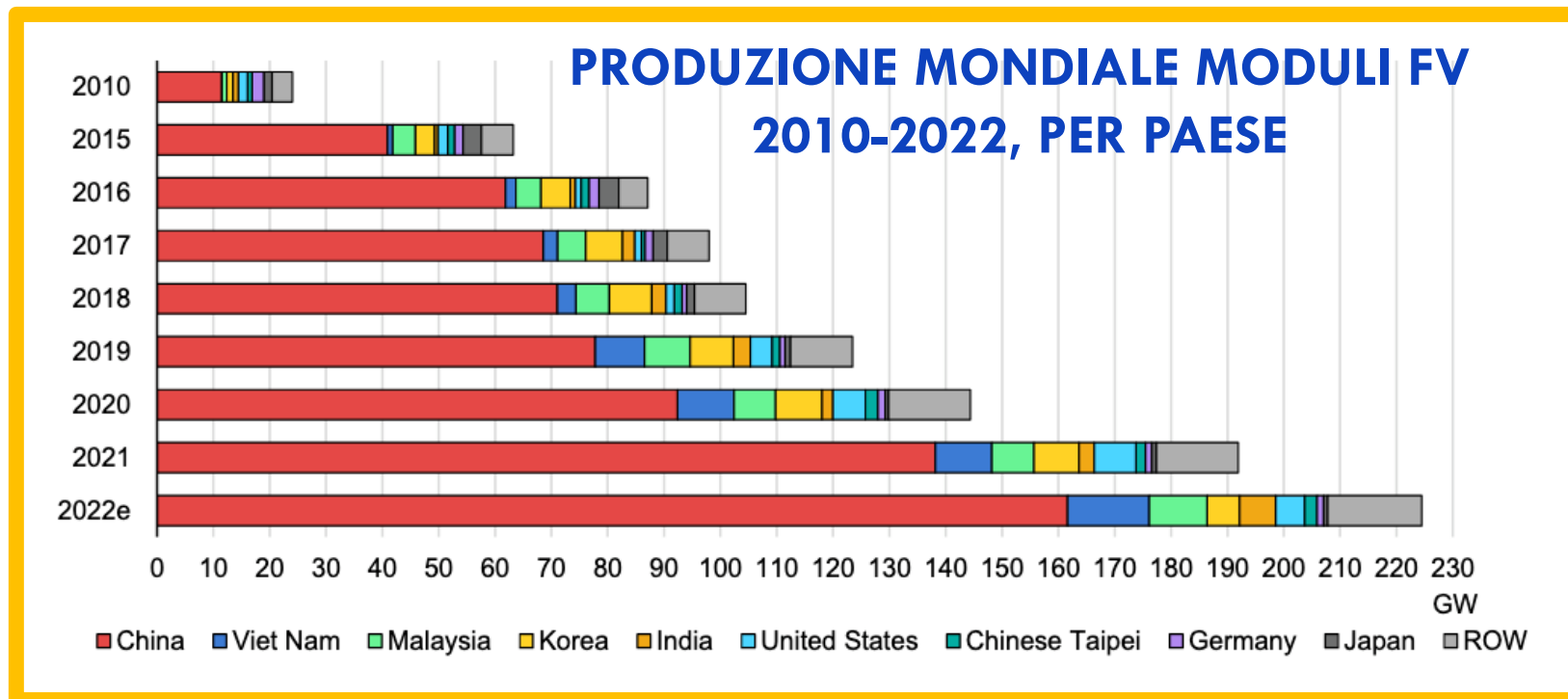
China's share of global polysilicon production, %



SICUREZZA ENERGETICA



Ci consegniamo nelle mani della Cina?



**PROBLEMA O
OPPORTUNITÀ?**

**NON È COME CON
PETROLIO, GAS
E CARBONE...**

CREDIT: Special Report on Solar PV Global Supply Chains, IEA, 2022

Materiali: rinnovabili vs. convenzionali

**GRANDE IMPIANTO
FOTOVOLTAICO A TERRA
1 MEGAWATT**



**200 tonnellate
di materiali**

**QUANTO CARBONE SERVE
PER PRODURRE LA STESSA
ELETTRICITÀ IN 30 ANNI?**



14.000 tonnellate

Due materialità radicalmente diverse



I materiali sono rilevanti per il
CONVERTITORE

Debbo assicurarmeli
UNA VOLTA



I materiali sono rilevanti per la
MATERIA PRIMA ENERGETICA

Debbo assicurarmela
PER SEMPRE

Cambia radicalmente il concetto di (IN)DIPENDENZA ENERGETICA

Due modelli economici e ambientali radicalmente diversi



CIRCOLARE

SOSTENIBILE

Riciclando posso promuovere
l'INDIPENDENZA

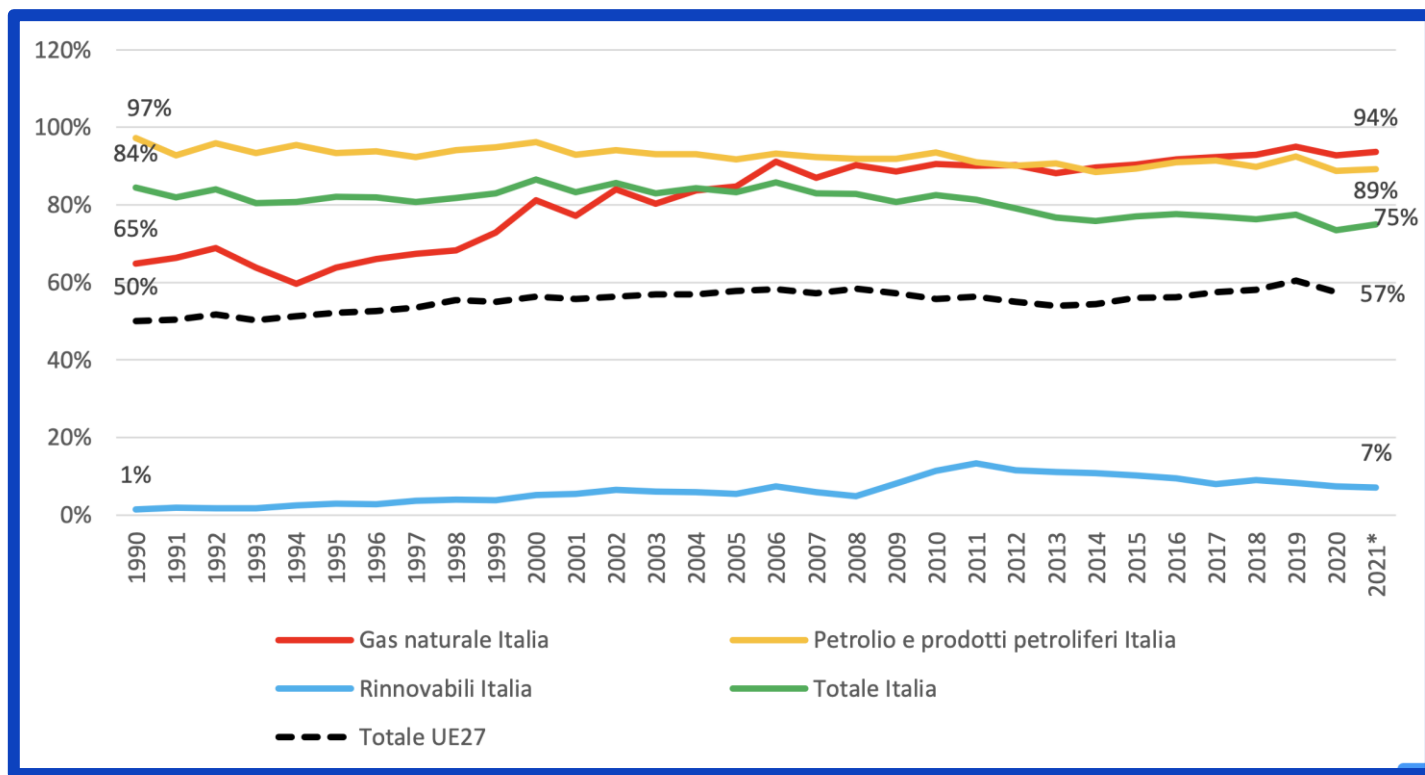


LINEARE

Intrinsecamente
INSOSTENIBILE

Mi vincola per sempre a un
modello di **DIPENDENZA**

Indice di dipendenza energetica dell'Italia



GAS: 94%

PETROLIO: 89%

RINNOVABILI: 7%

TOTALE: 75%

La situazione energetica nazionale nel 2021, MASE 2022

La quota di importazioni nette rispetto alla disponibilità energetica lorda, un indicatore del grado di dipendenza del Paese dall'estero, è aumentata: dal 73,5% del 2021 al 79,7% del 2022.

La situazione energetica nazionale nel 2022, MASE 2023

Nucleare: sicurezza e indipendenza?

PRODUZIONE MINERARIA DI URANIO

Country	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Kazakhstan	22,451	23,127	23,607	24,689	23,321	21,705	22,808	19,477	21,819	21,227
Canada	9331	9124	13,325	14,039	13,116	7001	6938	3885	4693	7351
Namibia	4323	3255	2993	3654	4224	5525	5476	5413	5753	5613
Australia	6350	5001	5654	6315	5882	6517	6613	6203	4192	4553
Uzbekistan (est.)	2400	2400	2385	3325	3400	3450	3500	3500	3520	3300
Russia	3135	2990	3055	3004	2917	2904	2911	2846	2635	2508
Niger	4518	4057	4116	3479	3449	2911	2983	2991	2248	2020

World Nuclear Association, 2023

43% produzione mondiale dal Kazakistan

Of the 31 reactors that began construction since the beginning of 2017, all but 4 are of Russian or Chinese design.

IEA, *Nuclear Power and Secure Energy Transition*, 2023



Bloomberg, 2023

Decoupling atomico | Nelle sanzioni europee alla Russia resta una grave lacuna: il settore nucleare

1k di Matteo Fabbri

Mosca si occupa della manutenzione di molte centrali costruite dall'Urss e resta la terza fornitrice di uranio del continente. Il colosso Rosatom ha un cda pieno di alti funzionari dei Servizi e sostiene la guerra di Putin con componenti, tecnologia e materie prime per il carburante dei missili

Linkiesta, 2023

LA TRANSIZIONE ENERGETICA NEGLI EDIFICI



**2020: settore residenziale, 27,4%
del consumo finale di energia**
Eurostat, 2023

Caso Reale: un edificio completamente elettrico (con solare termico ...)

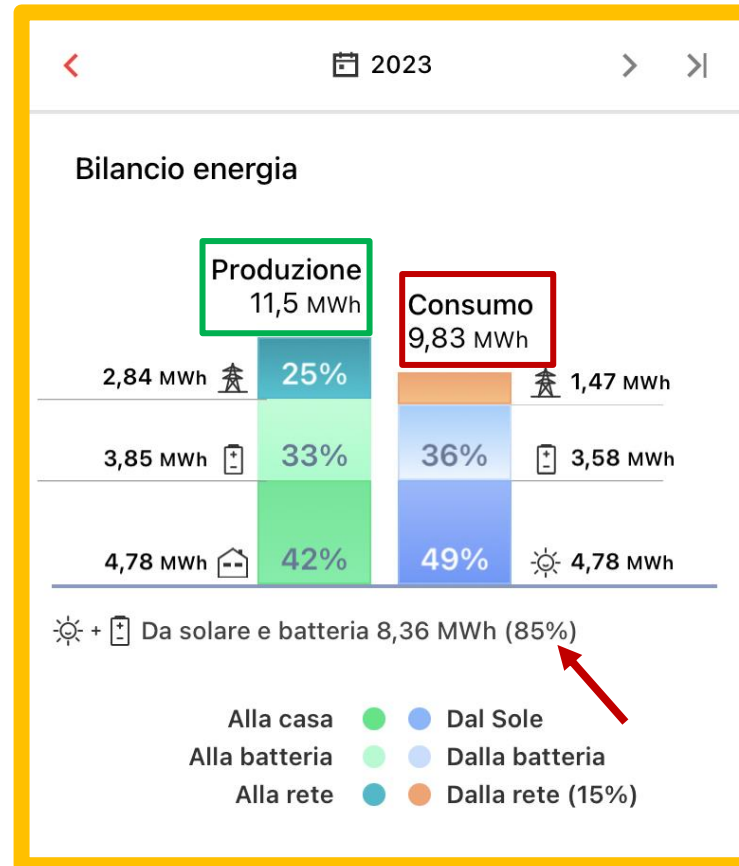


Batteria



Pompa di calore geotermica

Bilancio energetico 2023 al 30 Novembre



AUTOCONSUMO: 85%

Incluso 1130 kWh ricarica auto (15 Febbraio - 15 Novembre)

GRIGIA PIANURA PADANA

Si aprono spazi enormi di **autoproduzione e condivisione**

UTENZE IN BASSA TENSIONE
99.7% del totale

52% del prelievo elettrico in rete

45% degli italiani vivono in edifici indipendenti o semindipendenti

Convenienza economica

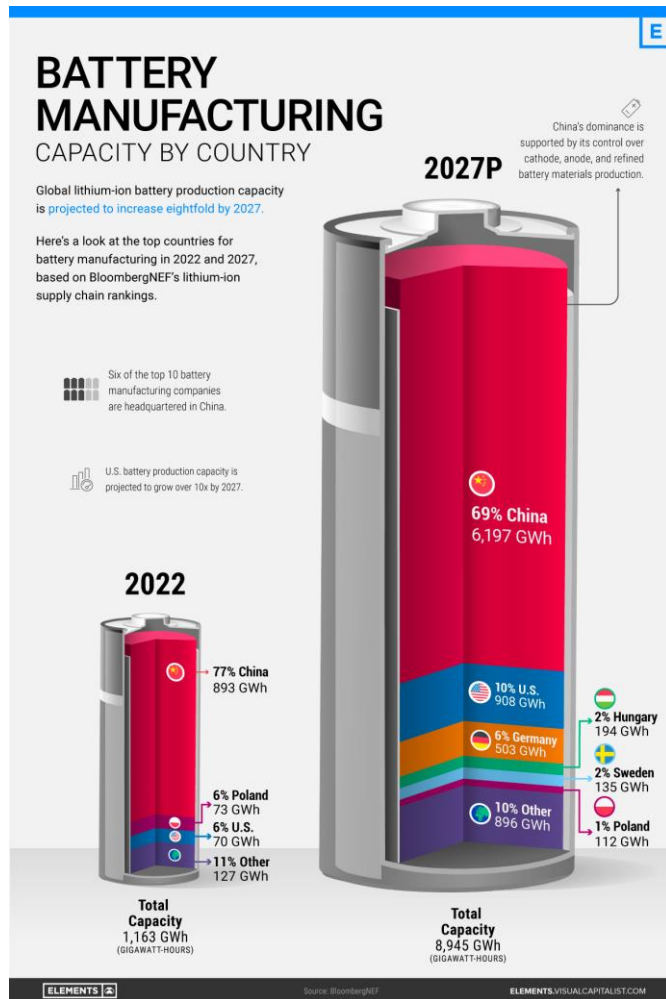
- **AUTOCONSUMO EDIFICIO 85%**
- **Incluso 1130 kWh per ricarica auto, a km ZERO (8000 km)**
- **Incassati con RID: 460 €, con cui pago esattamente i restanti 10000 km di percorrenza auto**
- **Acqua calda gratis 9 mesi l'anno**
- **Tempo di ritorno stimato degli investimenti ...?**

WHAT ELSE?

IL PARTNER DEL FOTOVOLTAICO: BATTERIE



Produzione globale di batterie al litio



Capacità
anno 2022
1,16 TWh



48 milioni di batterie
come nella mia casa
23 milioni di batterie
come nella mia auto

Proiezione 2027
~ 9 TWh

PROSPETTIVE

- Aumentare estrazione Li
- Oltre Li (Sodio? Potassio?)
- Espandere capacità globale

OLTRE LE BATTERIE

- Revamping idroelettrico
- Nuovi approcci e tech
(es. H₂ da surplus rinnovabili)

Six terawatt hours of grid-scale energy storage by 2050

To reach the 6 TWh of energy storage needed to clean the grid by 2050, we need to grow grid-scale energy storage by 98.4 times. Panelists in a recent Reuters webinar said that the path requires facing critical challenges as well as continued technology innovation, public-private partnerships, regulatory reforms, and more.



CREDIT: www.visualcapitalist.com

PV magazine, July 2023

Abbiamo litio a sufficienza per auto/furgoni?



Dalla miniera (es. Australia)



Dalle saline (es. Sudamerica)

Risorse stimate 2013: **23 Mton**

Risorse stimate 2023: **98 Mton**

Attualmente sfruttabili (**Riserve**): **26 Mton**



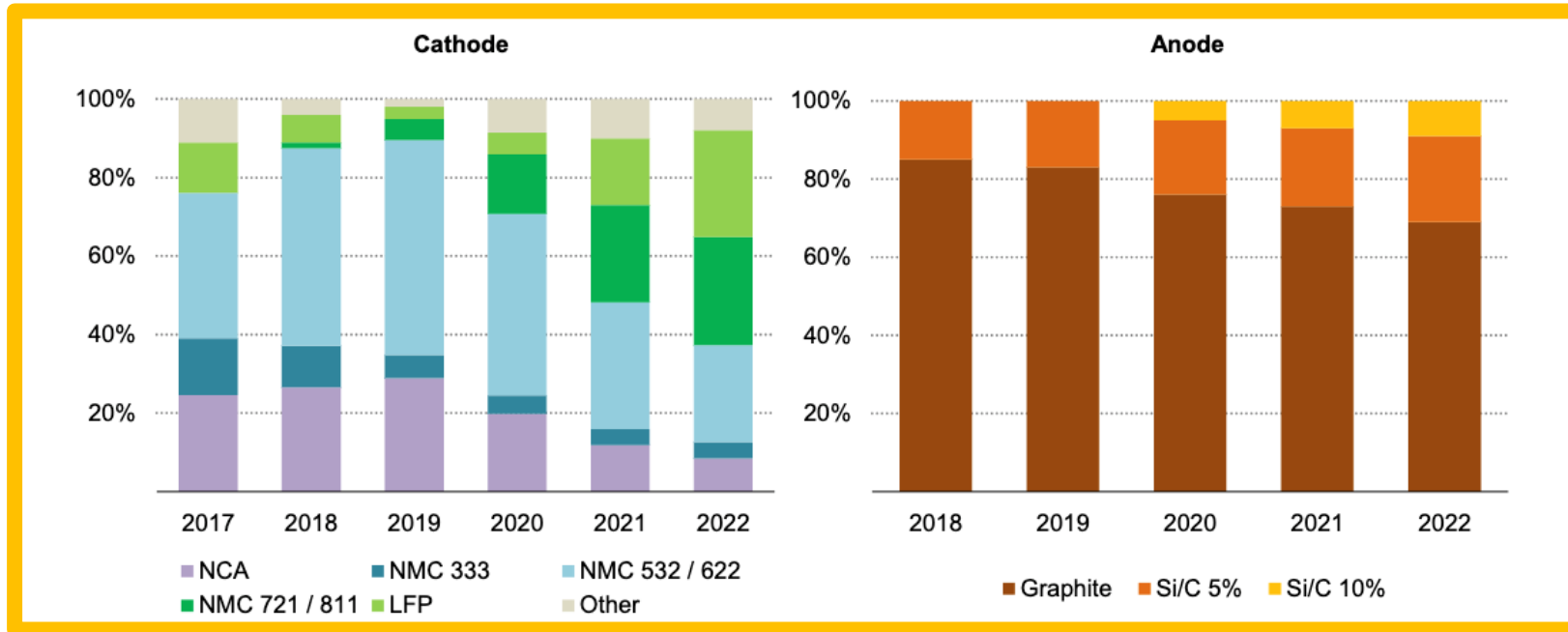
8 kg/auto

Auto a batteria fabbricabili:
3,2 miliardi (oggi 1,4)

FATTIBILE? COME?
Dipende da tanti fattori ...

FONTE: US Geological Survey, 2023

Esistono diversi tipi di batterie al litio!



CREDIT: Critical Minerals Market Review 2023, IEA

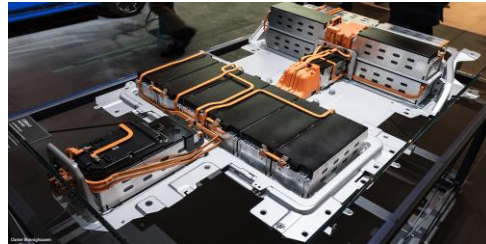
NMC
Nichel Manganese Cobalto
Market Share: 60%

LFP
Litio Ferro Fosfate
Market Share 30% (on the rise)

NCA
Nichel Cobalt Aluminum
Market Share: 8%

LFP (senza cobalto!) sono più robuste e più economiche, ma con una minore densità di energia. Dominano nel settore dei veicoli pesanti.

Batterie: confronto pratico



**50 kWh
(NMC 523)**



50 kWh (LFP)

	50 kWh Ni-Mn-Co 523	50 kWh Litio Ferro Fosfato
	Kg	Kg
Litio	5,5	4,9
Cobalto	9,5	/
Nickel	23,5	/
Grafite	44,0	59,4
Manganese	13,5	/
Rame	17,0	23,2
Alluminio	29,0	39,4
Ferro	/	37,3
Fosforo	/	20,7
TOTALE	142,0	208,1

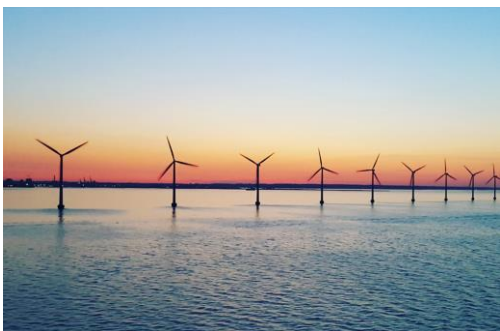
UNA TRANSIZIONE COMPLESSA CON MOLTI OSTACOLI E DIVERSE SOLUZIONI PRONTE



Quali fonti e tecnologie per la transizione?



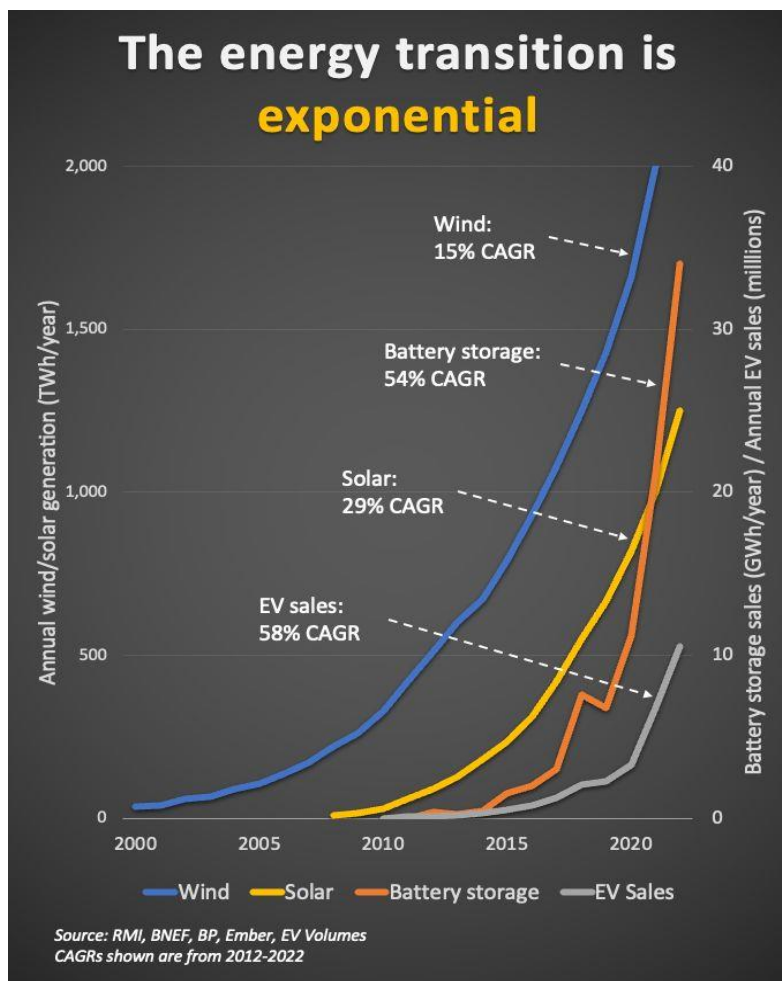
Le soluzioni
al 90% esistono
già e sono
SEMPLICI



Il resto sono ricerca
scientifica e tempi
lunghi
(che non abbiamo...)



Crescita esponenziale di queste tecnologie: Le regole e gli schemi sono rovesciati



Che spazio potrà esserci
fra 10-20 anni per opzioni più

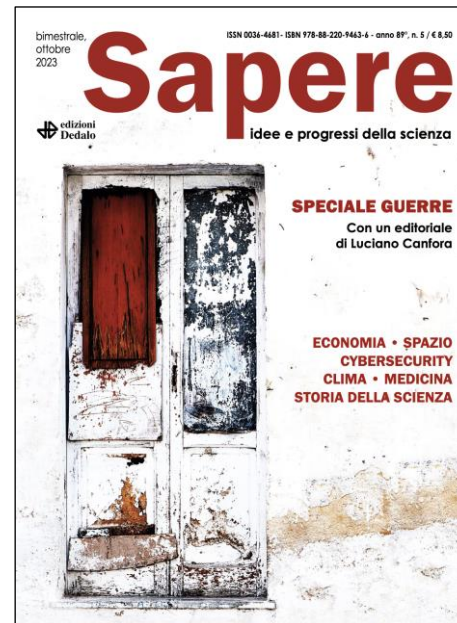
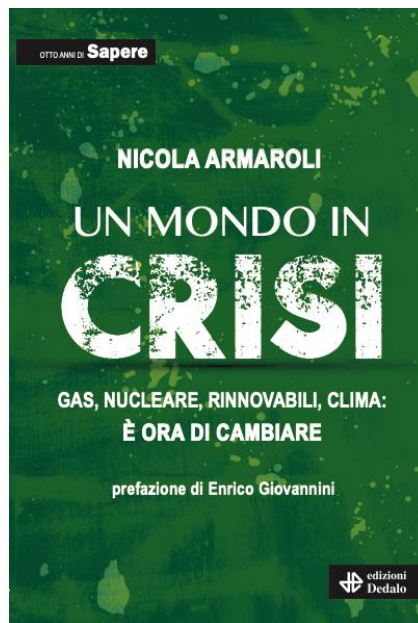
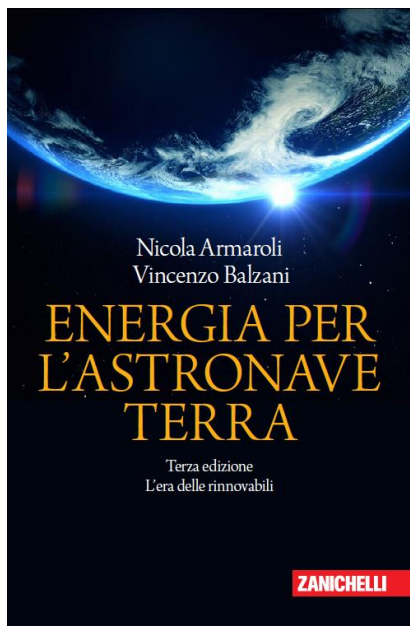
COSTOSE
INCERTE,
CONTROVERSE

??

LA RETE REGGERÀ?



Una domanda non nuova...



<https://www.isof.cnr.it/armaroli-web-media/>

*Il nostro compito non è prevedere il futuro,
ma renderlo possibile*

Antoine de Saint Exupéry



**ITALIA
SOLARE**

Il fotovoltaico è di tutti



Forum



Consiglio Nazionale delle Ricerche

GRAZIE

Nicola Armaroli

CNR-ISOF

nicola.armaroli@cnr.it | www.isof.cnr.it/armaroli_nicola