



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

# **Scenari del sistema energetico italiano 100% rinnovabile**

## **Sinergie tra fotovoltaico, eolico, sistemi di accumulo**

Livio de Santoli, Sapienza Università di Roma

[livio.desantoli@uniroma1.it](mailto:livio.desantoli@uniroma1.it)

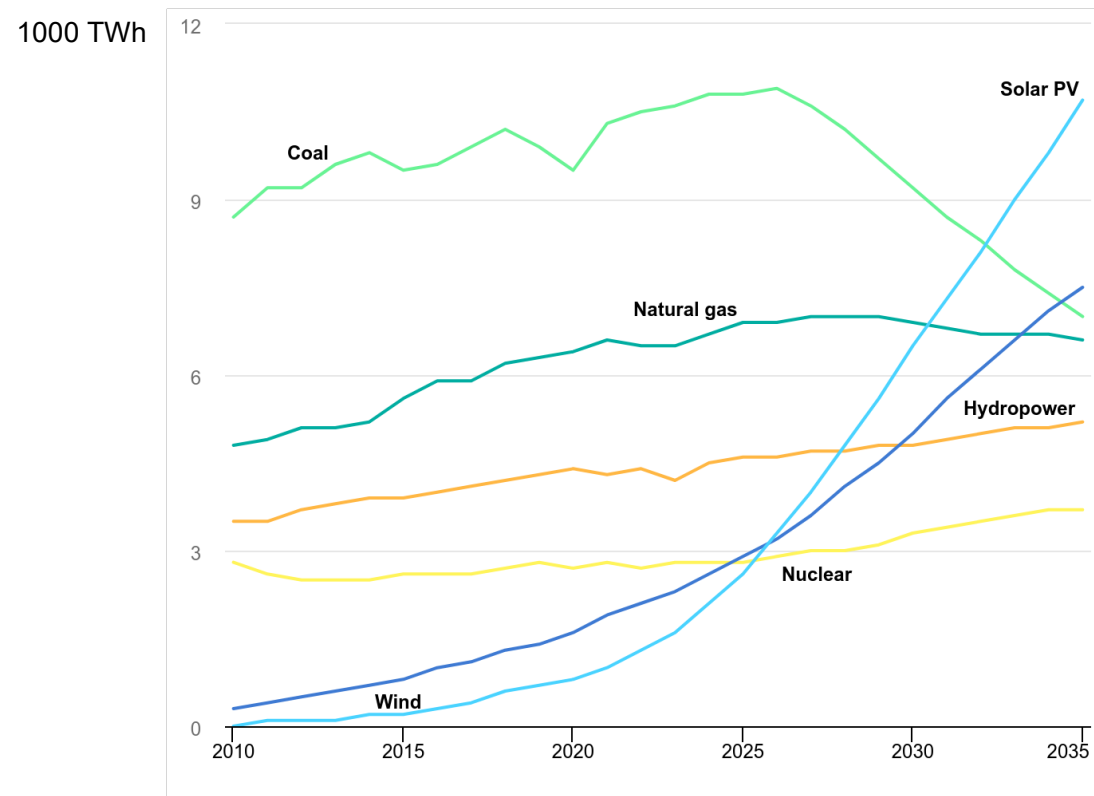
# World electricity generation in IEA STatedEnergyPolicyScenario

**Nel 2023:**  
**18.000 TWh/anno (60%) fossile**  
**9.000 TWh/anno (30%) RES**  
**3.000 TWh/anno (10%) nucleare**

-----  
**30.000 TWh/anno**

**Nel 2030:**  
**17.000 TWh/anno (50%) RES**  
**14.000 TWh/anno (41%) fossile**  
**3.000 TWh/anno (9%) nucleare**

-----  
**34.000 TWh/anno**



IEA, WEO 2024

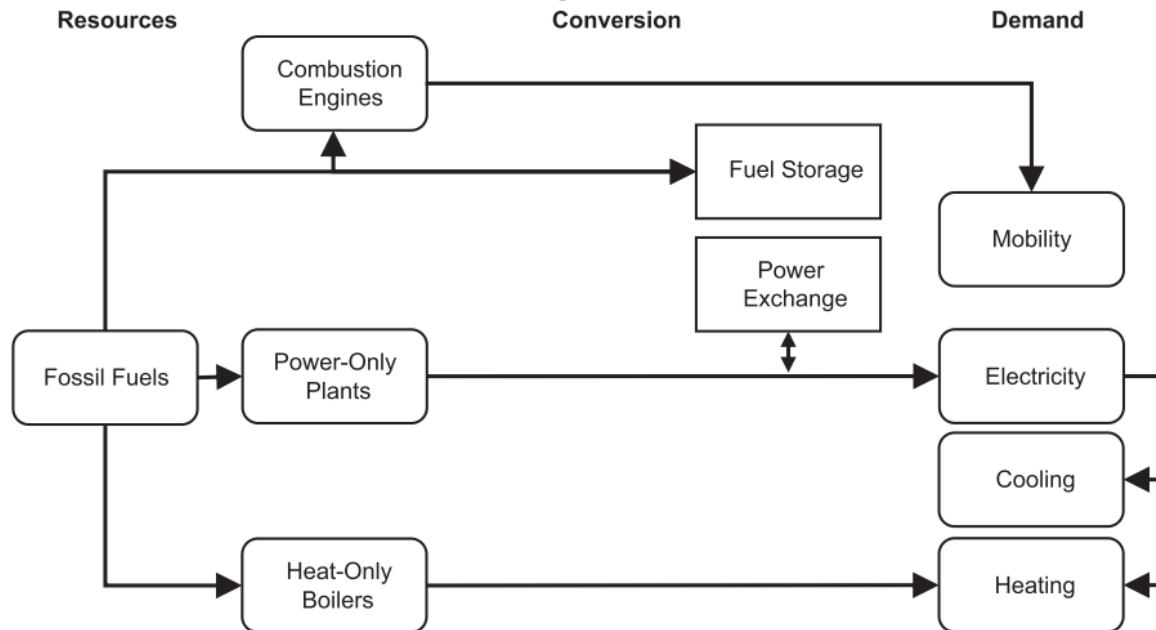
# La flessibilità del sistema energetico

La flessibilità dei sistemi energetici è storicamente fornita dalle fonti fossili in fase di generazione

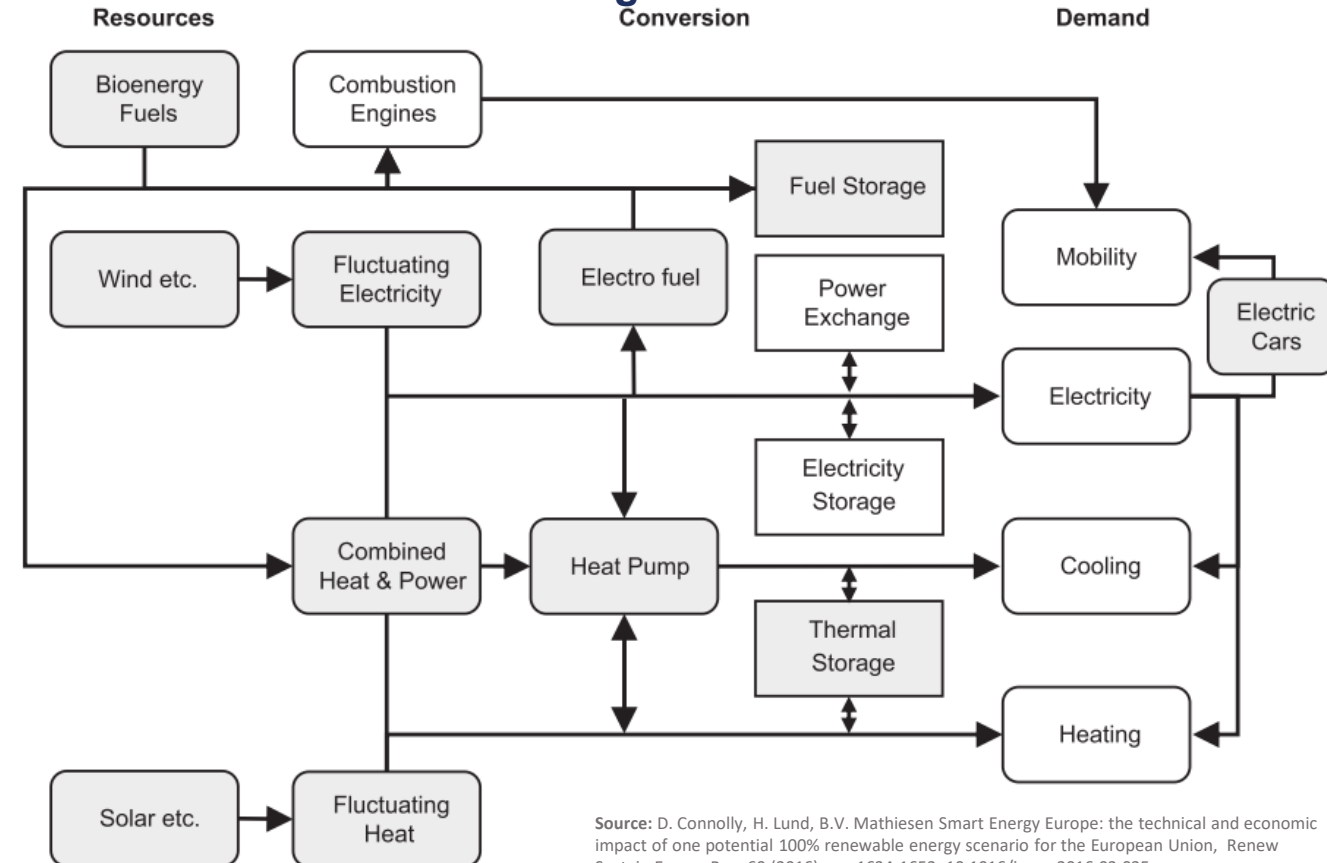
Nei sistemi energetici rinnovabili, la flessibilità non è presente nella sola fase di generazione, ma deve essere creata attraverso:

- Integrazione tra i settori
- Sistemi di storage
- Demand response (flessibilità della domanda)

## Sistema energetico fossile



## Sistema energetico rinnovabile



Source: D. Connolly, H. Lund, B.V. Mathiesen Smart Energy Europe: the technical and economic impact of one potential 100% renewable energy scenario for the European Union, Renew Sustain Energy Rev, 60 (2016), pp. 1634-1653, 10.1016/j.rser.2016.02.025

# Integrazione tra settori e sistemi di accumulo distribuito

## 1 Integrazione dei settori attraverso:

- Elettificazione diretta (veicoli elettrici, pompe di calore)
- Elettificazione indiretta (idrogeno, combustibili sintetici)

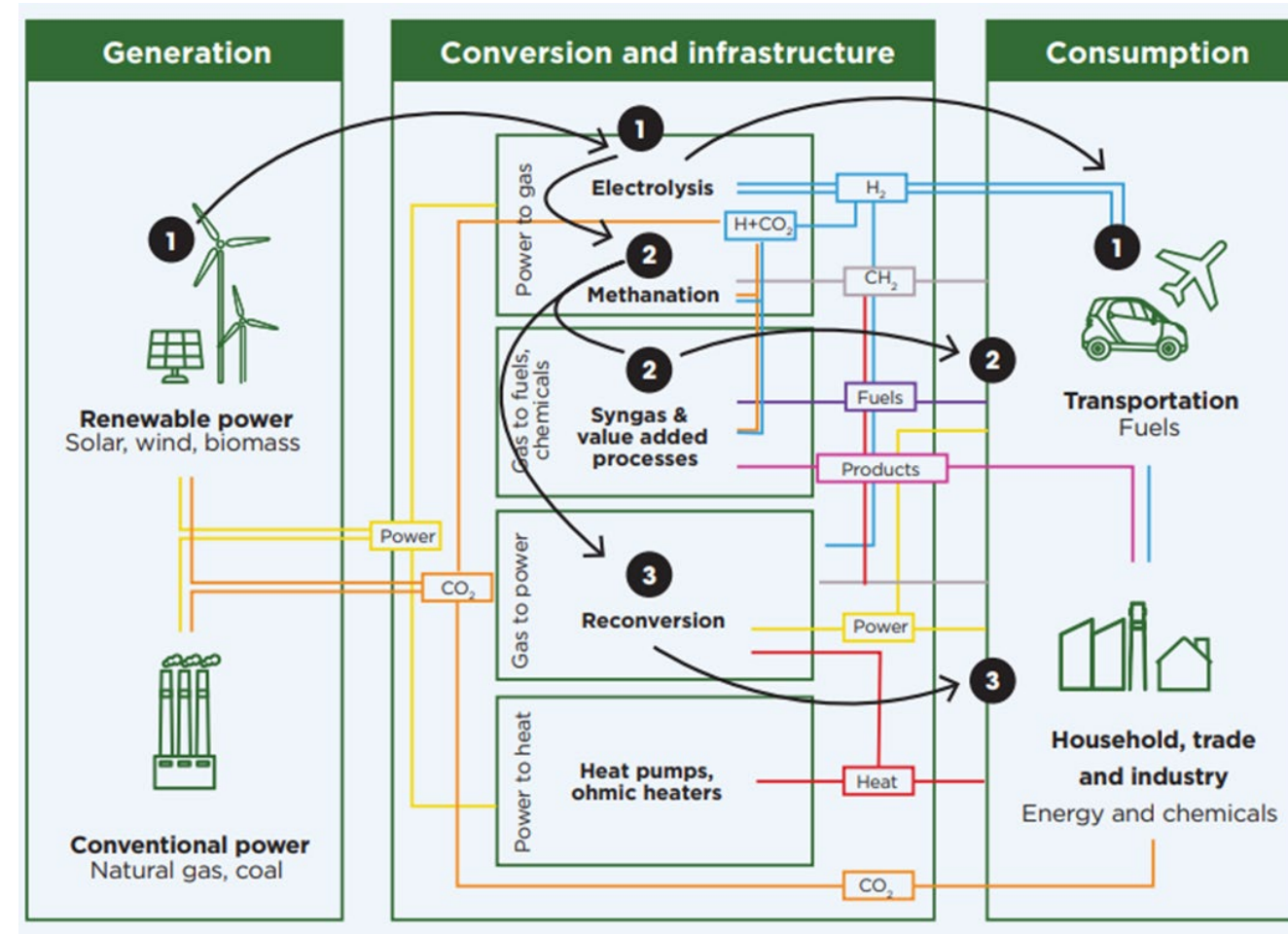
## 2 Importanza della domanda elettrica con sistemi Power-to-X:

- Power-to-Heat
- Power-to-Vehicle
- Power-to-Hydrogen

Converto l'elettricità in altri vettori che posso accumulare più semplicemente e a minor costo rispetto alle batterie elettrochimiche.

La finalità non è la riconversione in energia elettrica, ma l'utilizzo di quei vettori in altri settori energetici.

## 3 Importanza delle nuove forme di accumulo



Source: IRENA (2021), Sector coupling in facilitating integration of variable renewable energy in cities, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi

# Adeguamento delle reti all'aumentare delle rinnovabili

Le rinnovabili possono in realtà essere un ottimo baseload  
In Europa già oggi c'è sempre della generazione rinnovabile  
Ciò è vero a livello europeo, ma non a livello nazionale. **Quindi l'importanza dell'interconnessione.**  
Eolico e Fotovoltaico hanno andamenti stagionali generalmente opposti  
Integrazione fotovoltaico-eolico e **importanza dell'accumulo.**



**Source:** Wind energy in Europe: 2022 Statistics and the outlook for 2023-2027, Wind Europe  
Capacità installata eolico in EU 220 GW, Potenza media 45 GW, Potenza minima 20 GW

# Gestione dell'eccesso

Le ore non coperte in un sistema 100% rinnovabile sono poche

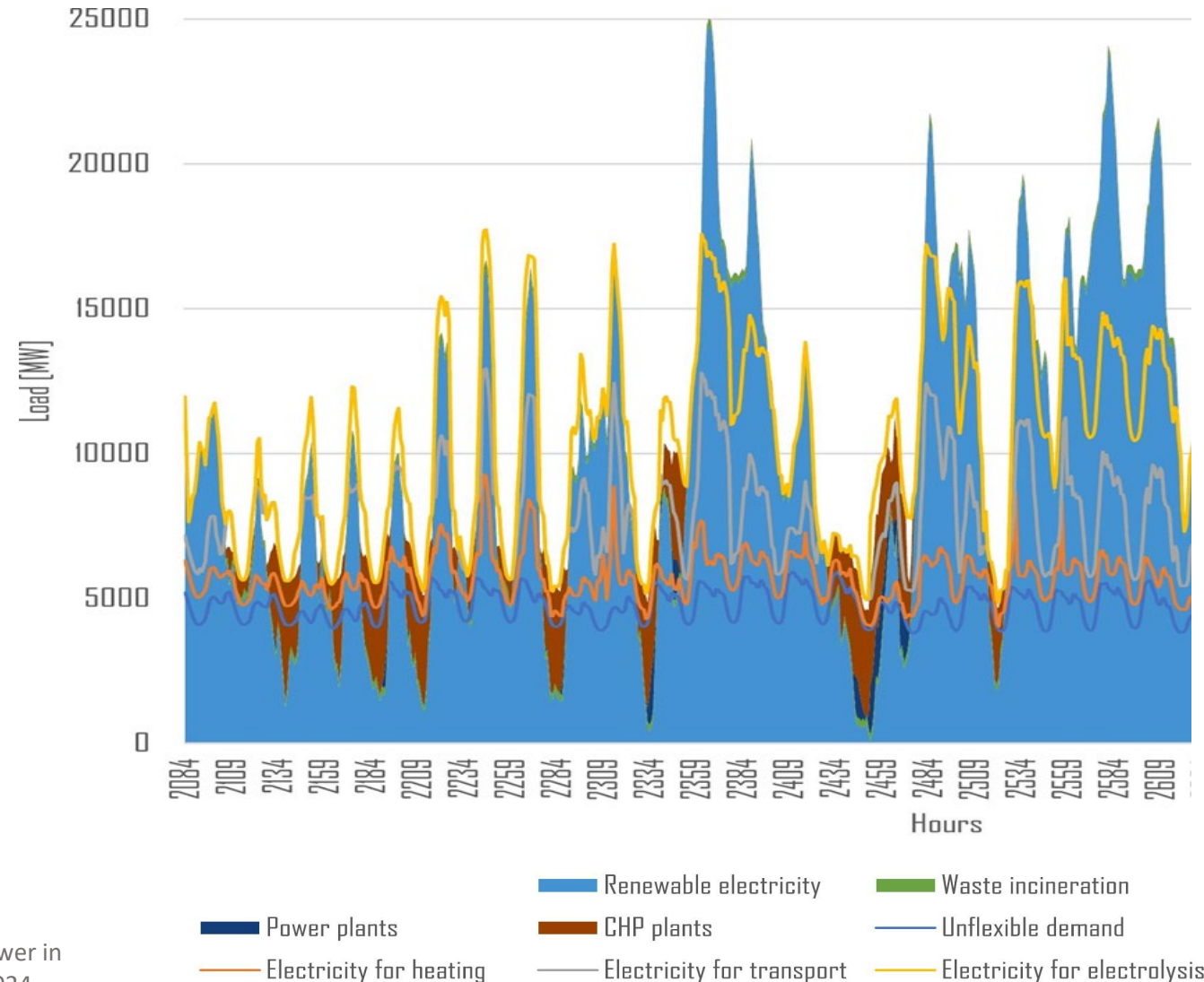
Sistemi di bilanciamento:

- Generazione rinnovabile programmabile (turbine idroelettriche, turbine a biogas, ...)
- Batterie elettriche
- Fuel cells (idrogeno)

**Metà della domanda elettrica futura si potrà adattare parzialmente alla generazione**

Grazie all'integrazione dei settori, l'accumulo di elettricità potrà essere in larga parte con vettori non elettrici, come l'energia termica o l'idrogeno

**Source:** Thellufsen et al. , Cost and system effects of nuclear power in carbon-neutral energy systems, Applied Energy, Volume 371, 2024, 123705, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123705>.



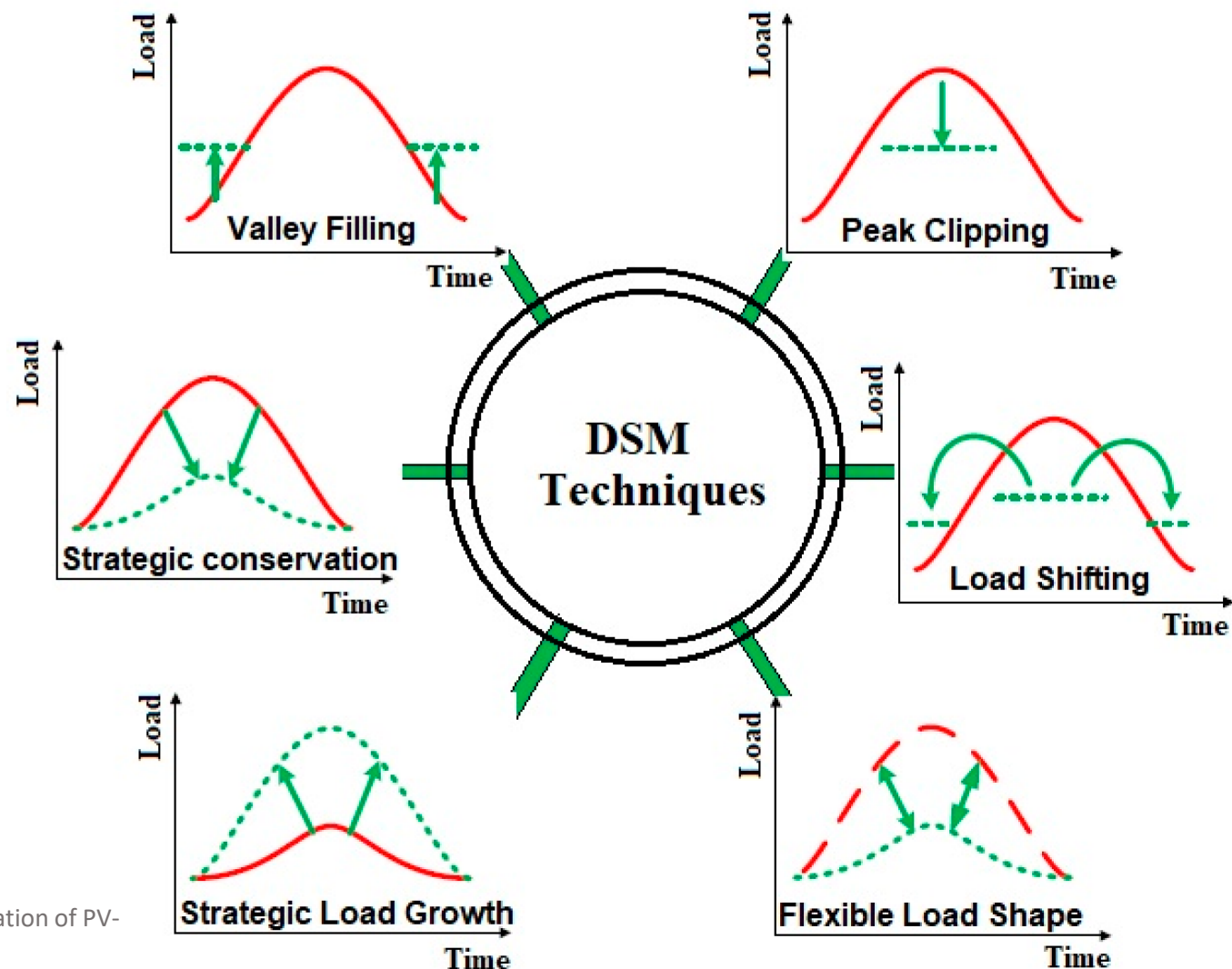


# Demand side management

È la domanda che si adatta alla generazione, non più il contrario.

Azioni chiave:

- Coordinare la domanda
- Aggregazione nei distretti e nelle comunità energetiche rinnovabili
- Sviluppo dell'infrastruttura energetica e informatica
- Sviluppo delle reti (elettrica, teleriscaldamento, gas)



**Source:** Sa'ed et al. Effect of Demand Side Management on the Operation of PV-Integrated Distribution Systems. Appl. Sci. 2020, 10, 7551.  
<https://doi.org/10.3390/app10217551>

# Italia 100% Rinnovabile (2050)

## 100% renewable energy Italy: A vision to achieve full energy system decarbonisation by 2050

Lorenzo Mario Pastore , Livio de Santoli

Department of Astronautical, Electrical and Energy Engineering, Sapienza University of Rome, Rome, Italy



### Heating

- Energy saving measures
- DH expansion and waste heat recovery
- HP for individual demand

### Transport

- Electrification of 90% of light-duty vehicles (cars and vans)
- E-fuels, hydrogen and biofuels for the remaining light-duty transport and heavy-duty transport

### Industry

- Energy saving measures
- Electrification of space heating and low-temperature process heating
- Conversion of current *grey hydrogen* demand in *green hydrogen*
- E-fuels, hydrogen and biofuels for the remaining fuel industry demand

### Flexibility measures and energy storage systems

- Electrolysers and hydrogen storage
- Stationary storage systems (lithium-ion batteries)
- Smart charging of EVs, Vehicle-to-Grid, flexible electricity demand

### Renewable energy sources

- PV, onshore and offshore Wind as main sources
- Hydro, geothermal and biomass as dispatchable electricity generation

Completa decarbonizzazione di tutti i settori energetici  
Solo fonti energetiche rinnovabili nazionali (no nucleare)

### Azioni:

- Efficienza energetica
- Elettrificazione diretta degli usi finali (ove possibile)
- Elettrificazione indiretta (ad es. idrogeno e combustibili sintetici) in settori hard-to-abate (industria e trasporto pesante)
- Uso sostenibile della biomassa
- Tecnologie Power-to-X e demand side management per fornire flessibilità al sistema
- Identificazione del mix di energie rinnovabili necessarie e della capacità dei sistemi di accumulo energetico

**Source:** Lorenzo Mario Pastore, Livio de Santoli, 100% renewable energy Italy: A vision to achieve full energy system decarbonisation by 2050, Energy, Volume 317, 2025, 134749, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134749>.

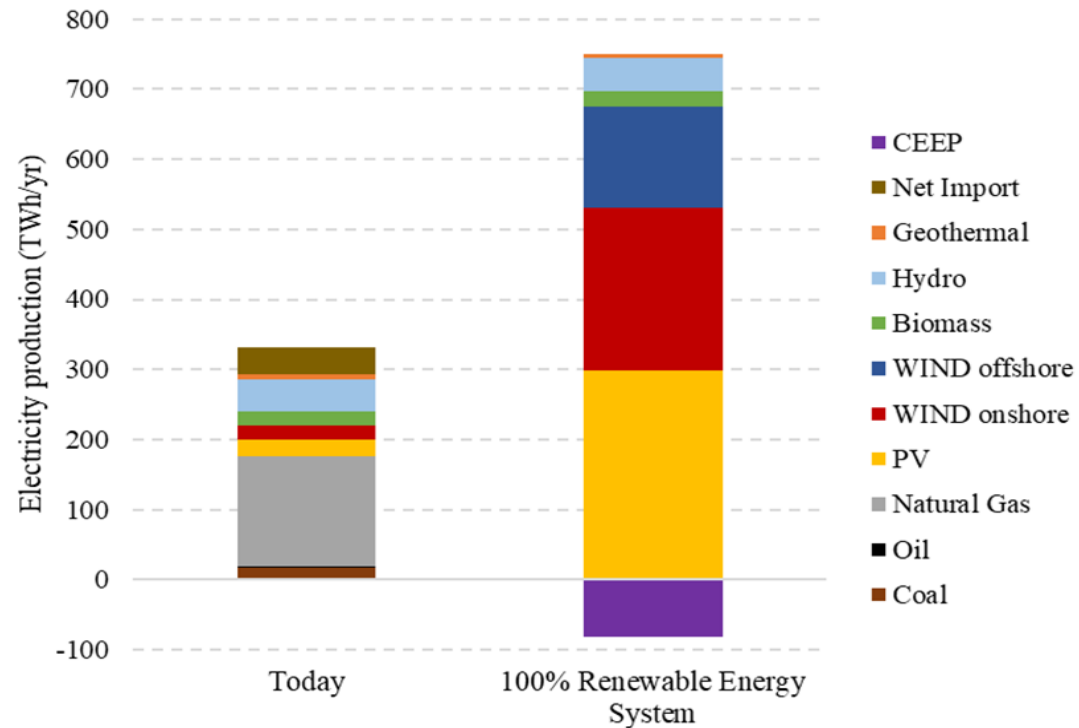


# Italia 100% Rinnovabile (2050)

Capacità di rinnovabili:

- PV: 210 GW
- Eolico onshore: 115 GW
- Eolico offshore: 56 GW

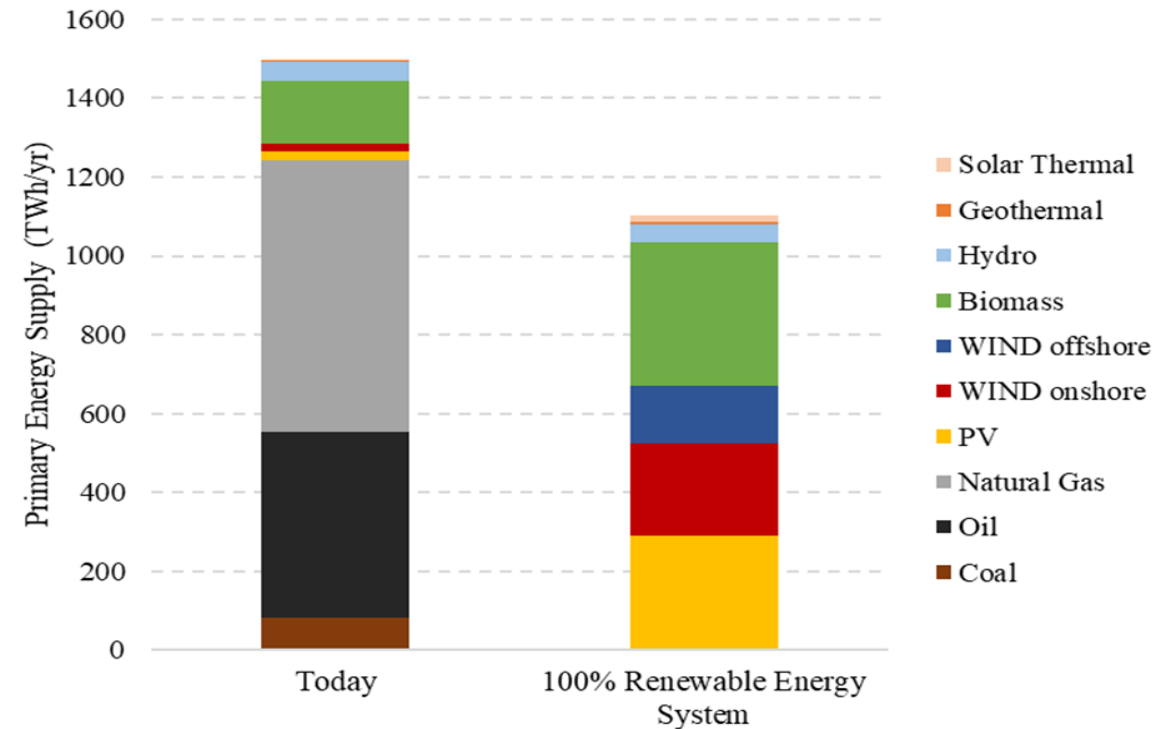
## Generazione di elettricità



Sistemi di flessibilità:

- Elettrolizzatori: 108 GW (7 Mton/a H<sub>2</sub>)
- Stoccaggio di H<sub>2</sub>: 3090 GWh
- Batterie al litio: 400 GWh
- Accumulo di energia termica
- Sistemi power-to-heat e vehicle-to-grid

## Energia Primaria



# Gli investimenti per la transizione energetica

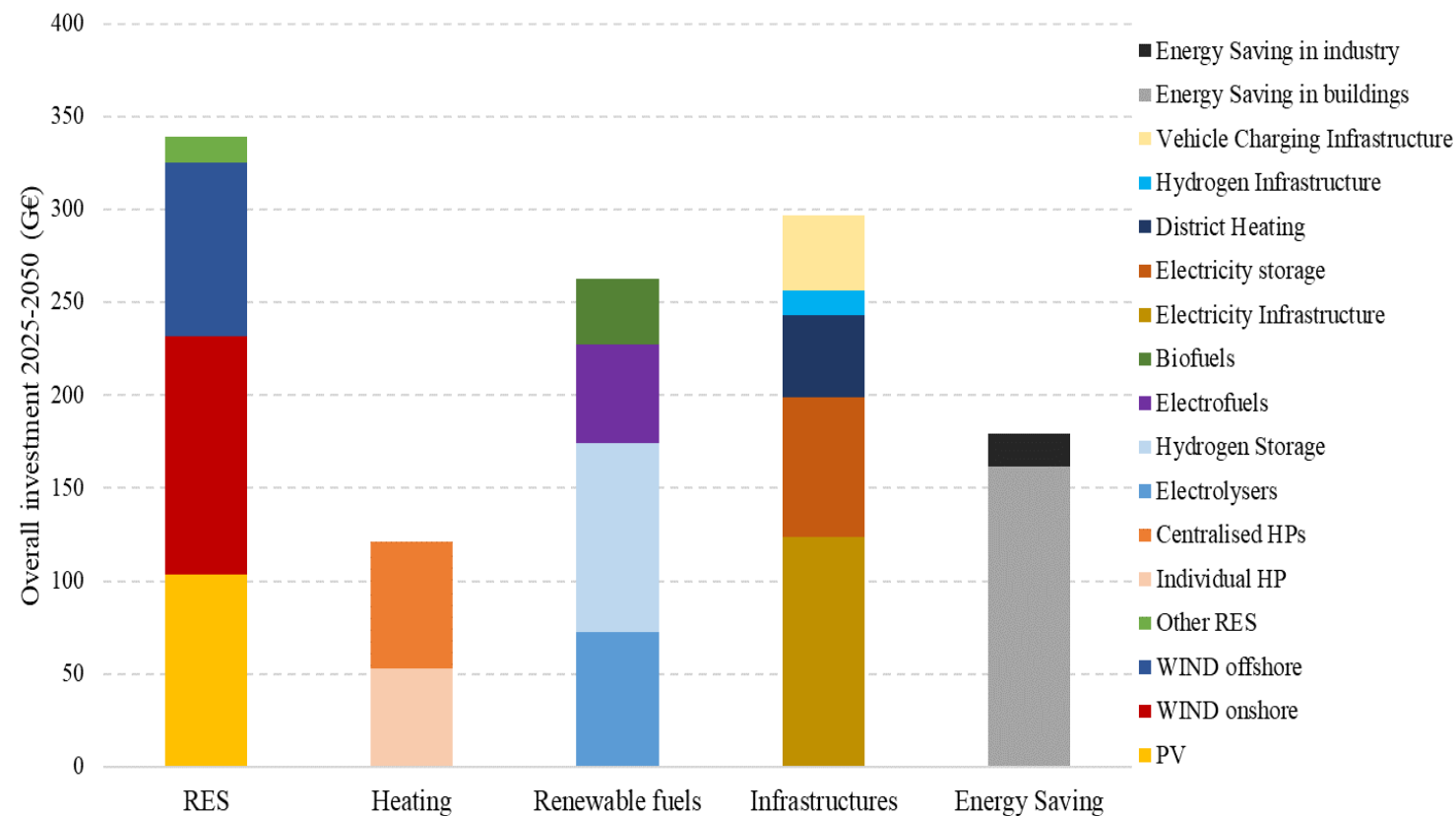
Circa 1200 miliardi di euro per l'intero periodo (2025 - 2050)

Approssimativamente 48 miliardi di euro all'anno (pari al 2,3% del PIL italiano)

Come finanziare la transizione energetica?

- Modello economico
- Spesa pubblica
- Deficit e vincolo di bilancio

## Investimenti complessivi per la transizione nel periodo 2025-2050

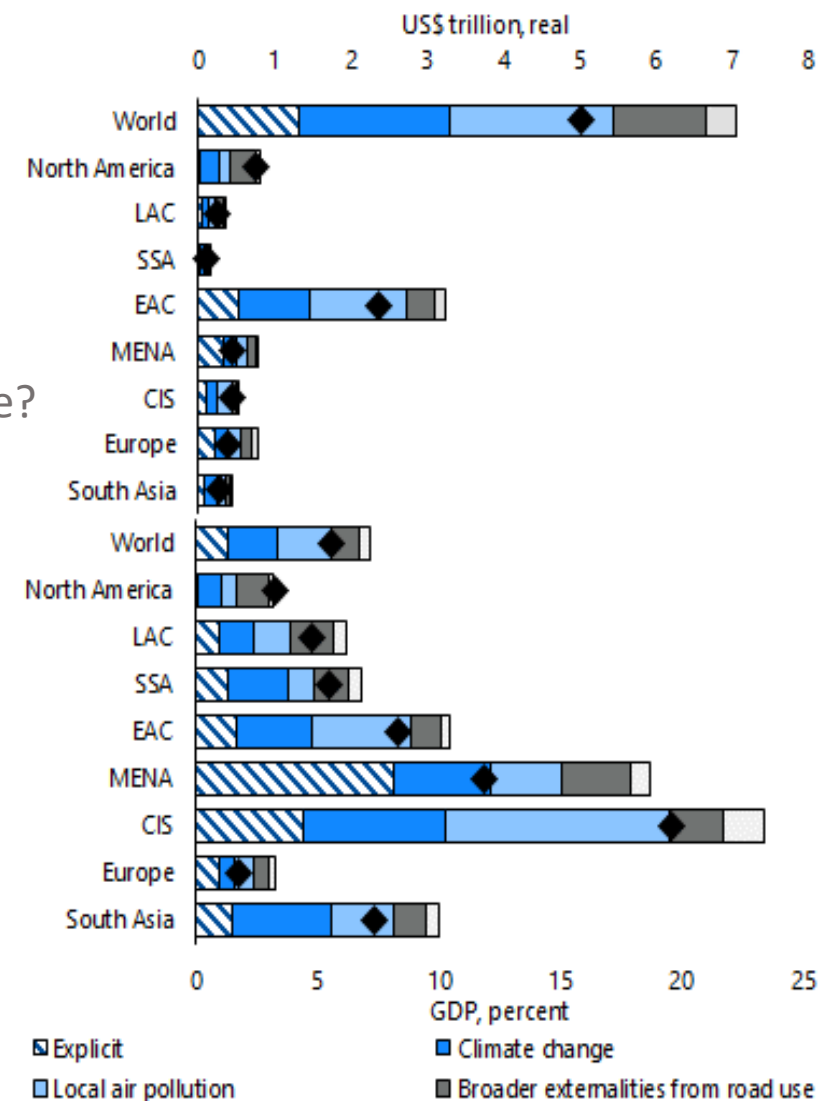
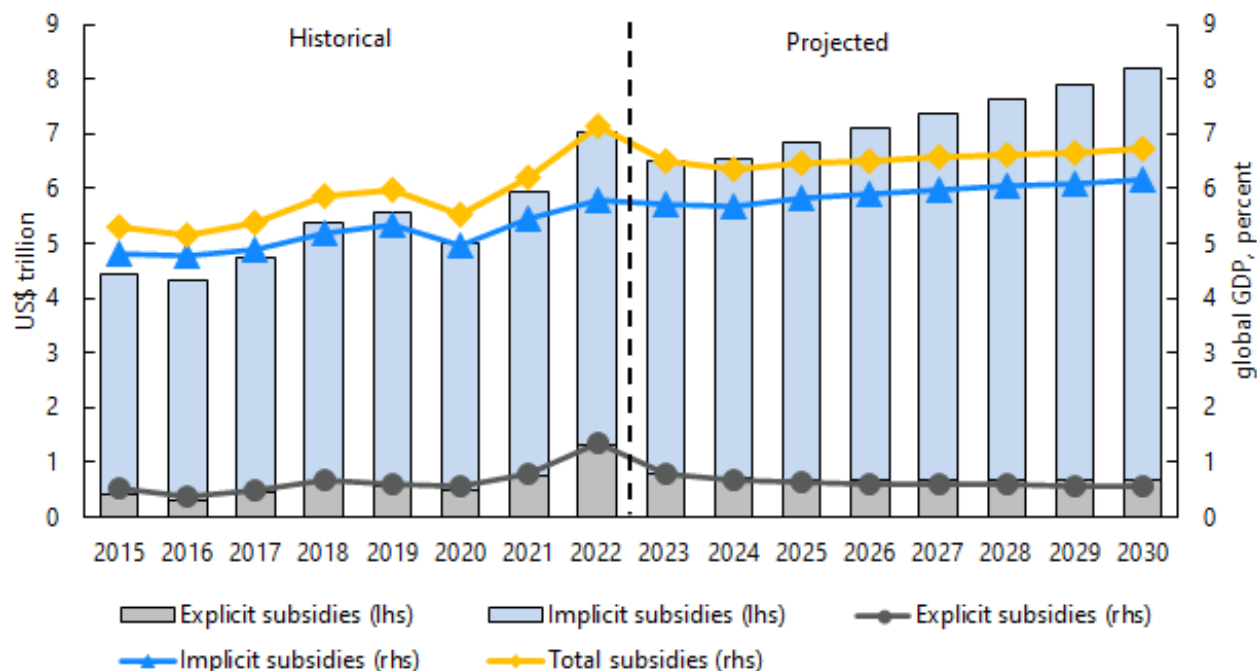


# Sussidi alle fonti fossili

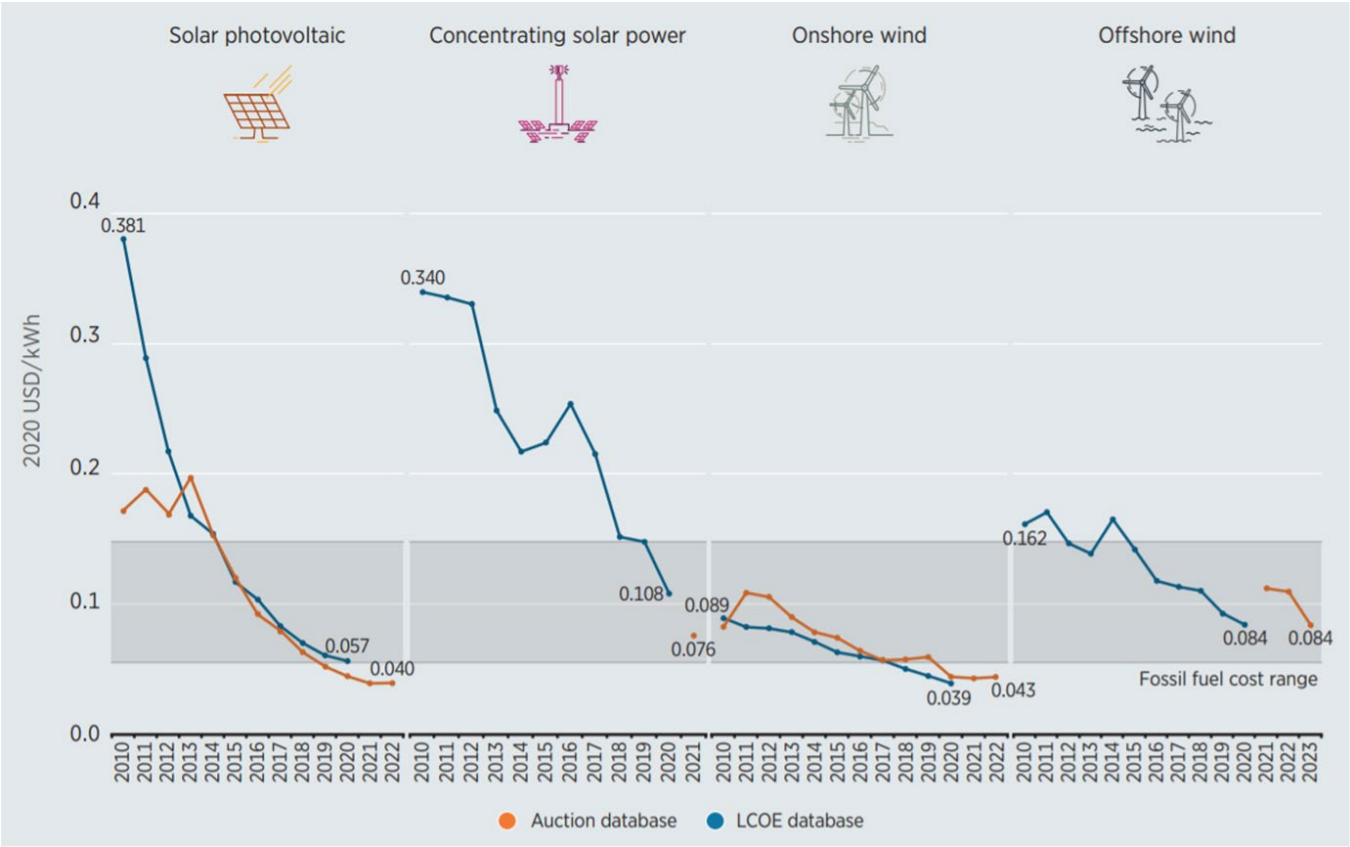
I sussidi ai combustibili fossili sono classificati in:

- espliciti (prezzi inferiori ai costi di fornitura)
- impliciti (mancata inclusione dei costi ambientali e sociali).

Eliminare i sussidi senza aumentare il costo dell'energia per le famiglie: è possibile?



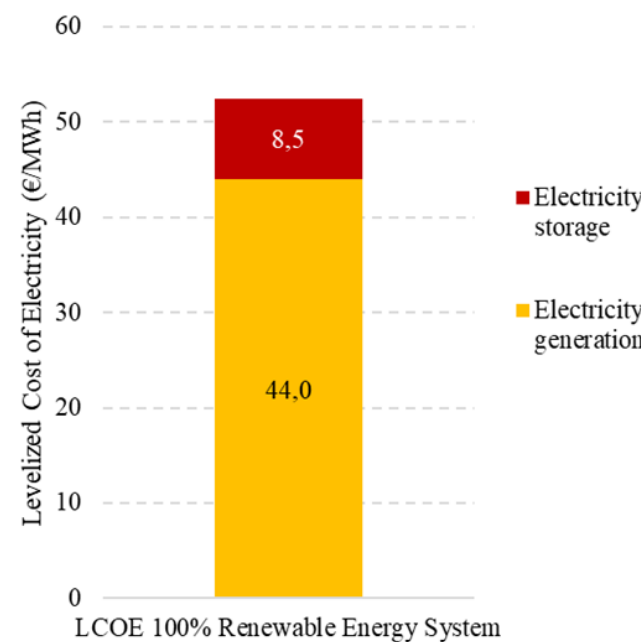
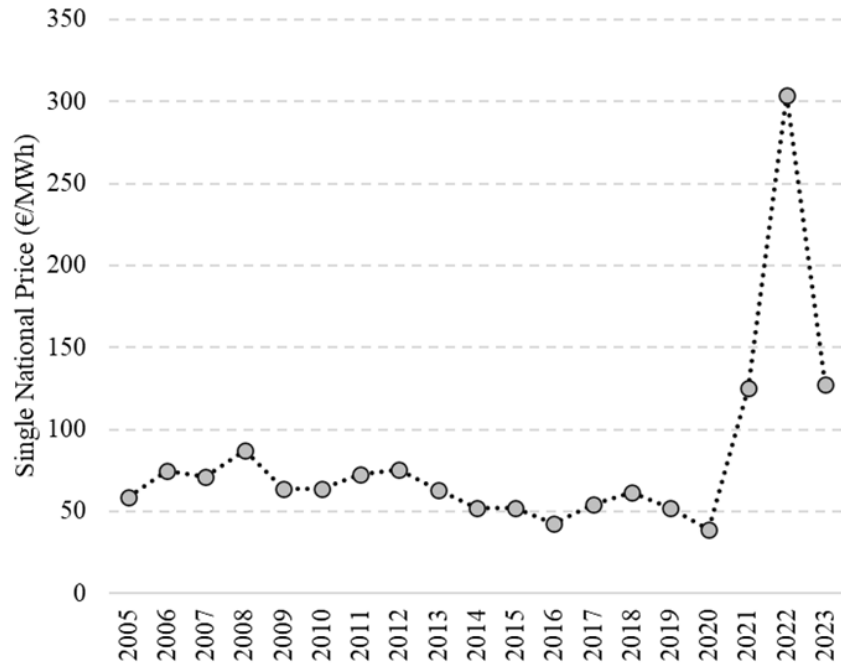
# Quanto costa l'elettricità da fonti rinnovabili?



	2010	2018	2030	2050	ON/OFF TRACK
LEVELIZED COST OF ELECTRICITY (LCOE)					
Solar PV (USD/kWh)	<div><div></div><div></div><div></div></div> 0.37	<div><div></div><div></div><div></div></div> 0.085	<div><div></div><div></div><div></div></div> 0.08–0.02	<div><div></div><div></div><div></div></div> 0.05–0.01	<div><div></div><div></div><div></div></div> On track
Onshore wind (USD/kWh)	<div><div></div><div></div><div></div></div> 0.08 (average)	<div><div></div><div></div><div></div></div> 0.06 (average)	<div><div></div><div></div><div></div></div> 0.03–0.05 (average range)	<div><div></div><div></div><div></div></div> 0.02–0.03 (average range)	<div><div></div><div></div><div></div></div> On track
Offshore wind (USD/kWh)	<div><div></div><div></div><div></div></div> 0.16 (average)	<div><div></div><div></div><div></div></div> 0.13 (average)	<div><div></div><div></div><div></div></div> 0.05–0.09 (average range)	<div><div></div><div></div><div></div></div> 0.03–0.07 (average range)	<div><div></div><div></div><div></div></div> Progress

**Sources:**  
IRENA (2019), Future of wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation paper), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.  
IRENA (2019), Future of Solar Photovoltaic: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation: paper), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.  
IRENA (2024), Renewable power generation costs in 2023, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi

# Il costo dell'energia elettrica



La completa decarbonizzazione consente di fornire elettricità a un costo totale di 52,5 €/MWh.

Una corretta pianificazione del sistema energetico decarbonizzato consente di limitare il costo medio dell'elettricità a un livello simile a quello del sistema attuale.

La capacità di stoccaggio elettrochimico è piuttosto bassa, grazie alle strategie Power-to-X.

Vantaggio occupazionale: Per ogni posto di lavoro perso, possono essere creati circa 3 nuovi posti di lavoro. Per ogni miliardo investito nella transizione, ci sono più di mille nuovi posti di lavoro.

L'impatto occupazionale stimato dipende dalla politica industriale del Paese.



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA

[livio.desantoli@uniroma1.it](mailto:livio.desantoli@uniroma1.it)