energiaperl'Italia

La transizione energetica in Italia

Settembre 2025

©Energia per l'Italia, settembre 2025

Rapporto a cura di Andrea Tilche con la collaborazione di Enrico Gagliano, Giulio Marchesini Reggiani, Vittorio Marletto e Renzo Valloni, e di Nicola Armaroli, Stefano Fracasso, Giacomo Grassi, Luigi Moccia e Piero Rosina come *reviewers*.

Energia per l'Italia ringrazia i relatori che hanno partecipato ai quattro incontri di studio sulla transizione energetica in Italia tenutisi nel mese di Maggio 2025 presso le Università di Bologna e Parma e che hanno fornito la gran parte del materiale poi elaborato nel presente Rapporto: (in ordine di partecipazione) Vincenzo Balzani, Andrea Tilche, Luigi Moccia, Piero Rosina, Giacomo Grassi, Margherita Venturi, Enrico Gagliano, Luigi Spedini, Marco Giusti, Leonardo Setti, Giulio Marchesini Reggiani, Alessandra Bonoli, Linda Zarai, Alberto Bertucco, Nicola Armaroli, Marica di Pierri, Francesca Bellisai, Elena Verdolini, Natalia Magnani, Osman Arrobbio, Attilio Piattelli.

Il presente Rapporto è scaricabile dal sito di Energia per l'Italia: *www.energiaperlitalia.it*

Formato consigliato per la citazione: Energia per l'Italia, 2025. La transizione energetica in Italia. A cura di Andrea Tilche. Pubblicazione elettronica, 43 p.
https://www.energiaperlitalia.it/wp-content/uploads/2025/10/La-Transizione-Energetica-in-Italia.pdf

Premessa

Energia per l'Italia, in collaborazione con il Centro di Etica Ambientale di Parma, con il patrocinio e l'ospitalità delle Università di Bologna e Parma e dei progetti "carbon-neutral@2030" delle due città, ha organizzato nel mese di maggio 2025 un ciclo di quattro incontri di studio sulla transizione energetica in Italia[1] con l'obiettivo di fare il punto sulla necessaria trasformazione della nostra società che non è soltanto il semplice adempimento degli obblighi che il nostro Paese ha assunto in ambito internazionale (Accordo di Parigi sul clima, obiettivi UE al 2030 e 2050, obiettivi G7), ma è anche un processo desiderabile e conveniente per raggiungere indipendenza energetica, abbassamento e stabilità dei costi dell'energia, nuovo sviluppo economico in settori ad alto valore aggiunto e abbattimento dell'inquinamento atmosferico e dei suoi impatti nefasti in campo ambientale, sociale e sanitario.

La transizione energetica è però un processo che nel dibattito pubblico rimane in secondo piano, che procede molto lentamente rispetto agli obiettivi temporali, con troppe difficoltà amministrative in un quadro regolatorio incerto che non favorisce gli investimenti, e senza una guida apparente.

Il ciclo di incontri di studio è quindi nato allo scopo di rinnovare le motivazioni e l'urgenza della transizione energetica, di indicare le scelte necessarie coi loro costi e benefici, oltre che mettere in evidenza le strade a fondo cieco che vengono spesso invocate dalla politica ma che servono soltanto a proteggere interessi acquisiti.

I quattro incontri, incentrati rispettivamente sugli aspetti di sistema, sulle tecnologie rinnovabili, sulla decarbonizzazione dei diversi settori, e sugli aspetti economici e sociali della transizione hanno coinvolto come relatori 22 tra i migliori esperti italiani delle problematiche affrontate che hanno potuto confrontarsi con più di 200 partecipanti registrati, in presenza o in remoto, che con i loro interventi e le loro domande hanno testimoniato la natura strategica dei temi trattati e la molteplicità di opinioni a confronto.

Questo Rapporto, elaborato da un gruppo di lavoro che ha riesaminato i materiali presentati alla discussione e la vasta letteratura scientifica sull'argomento, rappresenta il punto di vista di Energia per l'Italia sugli argomenti trattati, che non esauriscono la vastissima tematica della transizione energetica ma ne affrontano gli aspetti principali. Il testo, redatto sulla falsariga dei "Sommari per i decisori politici" dei rapporti dell'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), contiene una serie di proposte operative per guidare e portare a compimento con successo e in modo giusto la transizione energetica, con la consapevole partecipazione della collettività alle scelte necessarie. È indirizzato a decisori politici, amministratori locali, associazioni di cittadini e di imprese, ma potrà anche essere usato come materiale scolastico e - si spera - suscitare un dibattito aperto e non manicheo che aiuti a trovare nuove convergenze.

[1] https://www.energiaperlitalia.it/preannuncio-la-transizione-energetica-in-italia-save-the-dates/

Executive summary

Il riscaldamento globale, causato dall'accumulo di gas serra e in particolare dalla CO_2 fossile, è una sfida prioritaria per l'umanità. L'Accordo di Parigi impone di contenere l'aumento della temperatura entro +1,5 °C, ma il margine di emissioni disponibili è ormai quasi esaurito. L'UE, tra i principali responsabili storici, ha fissato obiettivi di -55% emissioni (rispetto al 1990) entro il 2030 e di zero emissioni nette al 2050. L'Italia, però, è in ritardo, con un percorso incoerente e frammentato che rischia di aggravare i costi futuri e scaricarli sulle nuove generazioni.

Il sistema energetico è ancora basato per l'80% sui combustibili fossili, estremamente inefficiente per le perdite di calore di scarto che ne riducono l'energia utile a meno della metà, e con forte dipendenza dall'estero. Le rinnovabili coprono quasi il 50% della produzione elettrica, ma l'eolico cresce lentamente per lentezze autorizzative e opposizioni locali. La riduzione delle emissioni finora ottenuta è stata più effetto di crisi industriali che di politiche strutturali.

Il futuro richiede un sistema 100% rinnovabile, basato su idroelettrico, solare, eolico, biomasse e geotermia, con reti intelligenti e potenziate, maggiori interconnessioni con l'estero e stoccaggi diffusi. Il nucleare non è una risposta utile per tempi molto lunghi rispetto alla necessità di decarbonizzare totalmente la produzione di elettricità nei prossimi 10 anni, e per costi e rischi, mentre foreste e assorbimenti naturali danno contributi limitati e incerti, anche a causa della progressione del riscaldamento globale.

Un nodo cruciale è il **costo dell'energia elettrica**. Prezzi più bassi sono indispensabili per la competitività delle imprese e la tenuta economica delle famiglie. Il calo non è più rinviabile: serve accelerare sulle rinnovabili per ridurre il contributo del gas, diffondere gli stoccaggi, riformare il mercato elettrico con nuove forme contrattuali, introdurre prezzi zonali e orari, ridurre gli oneri fiscali e para-fiscali in bolletta e superare le barriere burocratiche alle comunità energetiche consentendo una più semplice condivisione dell'energia autoprodotta. Politiche di questo tipo possono allineare l'Italia alla media UE e garantire vantaggi anche nella mobilità elettrica, oggi penalizzata da tariffe di ricarica troppo elevate.

Nei settori finali:

Edifici: il parco immobiliare è inefficiente e totalmente dipendente dal gas. Servono riqualificazione energetica, pompe di calore, accumuli e teleriscaldamento, sostenuti da incentivi stabili e proporzionati al ritorno economico degli investimenti.

Trasporti: incidono per quasi un terzo delle emissioni. L'elettrificazione è la via maestra, che va perseguita anche con politiche industriali, riservando biocarburanti sostenibili e futuri combustibili sintetici a navi e aerei. Politiche urbane devono favorire mobilità sostenibile, condivisa, trasporto pubblico e infrastrutture di ricarica a costi accessibili.

Industria: l'elettrificazione, con tecnologie disponibili e in fase di sviluppo, dovrebbe limitare a pochi punti percentuali al 2050 la necessità di vettori energetici gassosi o liquidi, come idrogeno verde e combustibili sintetici, in

particolare per acciaio primario e chimica. Bisogna evitare *lock-in* fossili e sostenere ricerca e sviluppo.
Agricoltura: la riduzione delle emissioni da fertilizzanti e allevamenti intensivi richiede pratiche colturali innovative e azioni di educazione alimentare verso diete più sostenibili.
Sul piano normativo, l'Italia non dispone ancora di una legge sul clima capace di vincolare e coordinare i Piani Nazionali sul clima (PNIEC) e sull'adattamento (PNACC) e i piani sociali di sostegno alle famiglie a basso reddito e alle imprese che potranno avere costi più alti durante la transizione. Il PNIEC 2024 è debole, troppo orientato al gas e privo di un quadro finanziario.
La transizione energetica, se ben governata, può generare benefici netti: indipendenza e sicurezza energetica, nuova occupazione, riduzione dei costi sanitari conseguenti all'inquinamento atmosferico, disponibilità di risorse economiche prima impegnate nell'acquisto di combustibili fossili. Ma richiede certezza politica, corretta informazione ai cittadini, e soprattutto energia elettrica a prezzi bassi, per rendere sostenibile l'elettrificazione di case, mobilità e industria, e per trasformare la decarbonizzazione in una leva di competitività.
In sintesi, la decarbonizzazione è un obbligo non rinviabile. L'Italia deve cogliere l'opportunità di costruire un sistema più innovativo, competitivo, socialmente equo e partecipato dai cittadini, centrato su rinnovabili diffuse e bollette più leggere.

Indice

PREMESSA **3**

EXECUTIVE SUMMARY **4**

INDICE **6**

INTRODUZIONE **8**

Fermare il riscaldamento globale è prioritario per l'umanità 8
Per restare entro il limite di +1,5°C di riscaldamento possiamo emettere ancora pochissima CO_2. 8
Nel misurare le responsabilità internazionali del riscaldamento globale, le emissioni storiche sono quelle che contano. 8
L'Italia è in grave ritardo nel ridurre le sue emissioni. 10
La scienza dei cambiamenti climatici si basa sul più ampio consenso scientifico. 10
Non basta ridurre le emissioni fino ad azzerarle; bisogna anche adattarsi ai cambiamenti climatici in corso e in divenire 10
La mitigazione, ovvero la riduzione delle emissioni, è il miglior investimento pr l'adattamento ai cambiamenti climatici. 11
La transizione energetica verso un futuro a zero emissioni nette non è più negoziabile. 11

1 - ENERGIA, EMISSIONI E PROSPETTIVE DI SISTEMA **12**

1.1 - Il sistema energetico deve passare da fossile a rinnovabile 12
1.2 - L'Italia è in ritardo sugli obiettivi UE al 2030. 12
1.3 - La riduzione delle emissioni italiane è più frutto della deindustrializzazione che di politiche attive. 12
1.4 - L'agricoltura è responsabile della gran parte delle emissioni di ossido nitroso e di metano, più difficili da rimuovere. 13
1.5 - Nel sistema energetico italiano la maggioranza dell'energia consumata è sprecata come calore di scarto 14
1.6 - Un sistema energetico futuro basato al 100% sulle rinnovabili è possibile. 14
1.7 - Le reti di distribuzione dell'energia elettrica sono state concepite per un sistema con pochi punti di generazione e molti di consumo e non sono adatte ad un sistema strutturalmente decentrato. 15
1.8 - Il sistema energetico futuro produrrà più del doppio dell'energia elettrica oggi consumata 15
1.9 - Un sistema energetico al 100% rinnovabile fornisce indipendenza e sicurezza energetica. 16
1.10 - L'energy-mix ideale richiede un bilanciamento tra fotovoltaico, eolico e stoccaggio. 16
1.11 - Necessaria un'assegnazione dei carichi (*BURDEN-SHARING*) tra le Regioni più direttivo da parte governativa. 17
1.12 - Il nucleare non è utile alla transizione energetica 17
1.13 - I costi del nucleare non si limitano al costo di costruzione degli impianti. 18
1.14 - Gli assorbimenti di CO_2 delle foreste sono incerti e fragili 18

2 - TECNOLOGIE ENERGETICHE RINNOVABILI, STOCCAGGI E CONDIVISIONE DELL'ENERGIA **19**

2.1 - L'Italia è un paese vocato per le rinnovabili 19
2.2 - Il fotovoltaico a terra è essenziale. 19
2.3 - La questione dell'agrivoltaico. 19
2.4 - Fotovoltaico ed eolico sono complementari. 20
2.5 - Impianti per energie rinnovabili e paesaggio non sono in conflitto. 20
2.6 - L'eolico offshore galleggiante deve ancora svilupparsi per diventare economicamente competitivo 21
2.7 - Il potenziamento (repowering) di impianti esistenti permetterà tra oggi e il 2050 di aumentarne la produzione rinnovabile a parità di superficie 21
2.8 - Energia da biomasse: attenzione alla sostenibilità. 22
2.9 - Geotermia a medio-bassa entalpia: nuova tecnologia da valutare per impianti di teleriscaldamento urbano. 22
2.10 - La condivisione dell'energia tra produttori domestici di rinnovabili e consumatori deve essere sburocratizzata. 22

3 - USI SETTORIALI DELL'ENERGIA E DECARBONIZZAZIONE **24**

3.1 - I settori maggiormente responsabili delle emissioni sono edifici, trasporti e industria 24
3.2 - Il parco edilizio nazionale è altamente inefficiente dal punto di vista energetico 24
3.3 - Nella gran parte dei casi, la ristrutturazione energetica si ripaga nel tempo con i minori costi di gestione rispetto ad oggi e con l'incremento di valore degli edifici 25

3.4 - Le pompe di calore sono l'alternativa più efficiente per il riscaldamento invernale e il raffrescamento estivo. 25
3.5 - La penetrazione nel mercato delle pompe di calore dipende dal rapporto di prezzo tra energia elettrica e gas naturale. 25
3.6 - L'Italia possiede ottime e innovative capacità industriali nel campo delle pompe di calore e dei sistemi radianti. 26
3.7 - La lezione del Superbonus deve servire a progettare un diverso sistema di supporto. 26
3.8 - Per decarbonizzare i trasporti occorre intraprendere varie strade. 27
3.9 - Per le auto, gli autobus, e in prospettiva anche i mezzi pesanti, l'elettrificazione è la strada maestra. 27
3.10 - Il vantaggio delle auto elettriche non è solo dovuto alle emissioni, ma ad un bilancio di materia estremamente favorevole sul ciclo di vita. 27
3.11 - I vantaggi economici delle auto elettriche aumentano con le lunghe percorrenze e con la possibilità di ricarica domestica. 28
3.12 - La transizione verso l'auto elettrica è inevitabile: non va contrastata ma facilitata. 29
3.13 - Idrogeno, biocombustibili e combustibili sintetici non possono competere con l'elettrico. 30
3.14 - Per navi e aerei servono (per ora) combustibili sostenibili. 30
3.15 - La decarbonizzazione industriale presenta diverse criticità. 30
3.16 - Le industrie con processi ad alta temperatura rappresentano una ulteriore criticità 31
3.17 - L'acciaio primario è la maggiore criticità. 32
3.18 - La chimica è uno scheletro nell'armadio. 33
3.19 - Il problema del cemento va affrontato anche con materiali alternativi 33
3.20 - CCS, CCU, CCUS sono chimere rischiose e antieconomiche, ma dovranno servire in futuro per generare emissioni negative. 33
3.21 - Agricoltura, zootecnia e sistema alimentare: quali prospettive? 34
3.22 - Sono possibili interventi tecnici per l'abbattimento delle emissioni agricole e zootecniche? 34
3.23 - Una dieta equilibrata è anche un minor costo per il Sistema Sanitario Nazionale 35

4 - ASPETTI NORMATIVI, ECONOMICI E SOCIALI DELLA TRANSIZIONE ENERGETICA 36

4.1 - L'Italia non ha una propria legge sul clima. 36
4.2 - Il nuovo PNIEC dell'attuale governo non risponde alle richieste europee, manca di un impianto attuativo, e porta troppo in avanti nel tempo la riduzione delle emissioni nel nostro Paese 36
4.3 - Benefici e co-benefici superano i costi della transizione, ma richiedono una gestione proattiva da parte dei governi. 36
4.4 - Benefici e co-benefici superano i costi della transizione, ma non sempre costi e benefici sono distribuiti equamente. 37
4.5 - La transizione non si fa a colpi di *bonus* elettorali, ma di politiche regolatorie e di incentivazione ben motivate e proporzionate 37
4.6 - La transizione energetica genera nuova crescita economica. 38
4.7 - La transizione ha costi sociali che possono colpire categorie svantaggiate. Bisogna attuare politiche preventive e proattive al fine di non lasciare indietro nessuno. 38
4.8 - La transizione deve essere giusta 38
4.9 - La moderazione nei consumi ha effetti ecologici e sociali positivi 39
4.10 - In una transizione fortemente basata sull'elettrificazione, gli aspetti economici e sociali sono facilitati da bassi costi dell'energia elettrica. 39
4.11 - È necessario portare a termine positivamente la discussione sulla proposta di revisione della Direttiva europea sulla tassazione dell'energia. 40
4.12 - Serve una comunicazione corretta e responsabile. La transizione energetica sarà più facile e rapida se partecipata da cittadini consapevoli. 40

BIBLIOGRAFIA 41

Introduzione

Fermare il riscaldamento globale è prioritario per l'umanità.
Il riscaldamento globale [1] è causato dall'incremento delle concentrazioni di gas a effetto serra nell'atmosfera, in particolare dalla CO_2 prodotta dalla combustione di combustibili fossili che trovandosi confinati in profondità sottoterra non sono parte del ciclo naturale del carbonio. La persistenza della CO_2, molecola molto poco reattiva che può restare nell'atmosfera per centinaia di anni, fa sì che la combustione di petrolio, carbone e gas naturale estratti dal sottosuolo provochi un continuo aumento della sua concentrazione atmosferica, e quindi un riscaldamento globale per "effetto serra", che può essere arrestato soltanto azzerando le emissioni e portando il ciclo del carbonio ad un nuovo equilibrio. La comunità internazionale, con l'Accordo di Parigi del 2015, si è data l'obiettivo di mantenere il riscaldamento del pianeta ben al di sotto dei 2°C, e il più vicino possibile alla soglia di +1,5°C rispetto al periodo preindustriale. L'obiettivo è di evitare di innescare fenomeni di accelerazione che potrebbero causare danni molto gravi alla stabilità della civilizzazione umana e degli ecosistemi della Terra.

Per restare entro il limite di +1,5°C di riscaldamento possiamo emettere ancora pochissima CO_2.
Da quanto detto sopra deriva che vi sia un rapporto quasi lineare tra emissioni cumulative globali di CO_2 e crescita della temperatura superficiale media della Terra. Questa corrispondenza ha permesso agli scienziati del clima di calcolare quanta CO_2 di origine fossile possa essere ancora globalmente emessa prima di giungere a determinati livelli di riscaldamento globale: questa stima è stata chiamata "budget di carbonio". Secondo stime recenti [2], il budget di carbonio per restare entro +1,5°C di riscaldamento - rispetto al periodo preindustriale - è dal 2025 intorno a 130 Gt CO_2, che ad emissioni globali costanti verrebbe sicuramente consumato entro i prossimi 5 anni (Fig. 1). È quindi evidente che i grandi emettitori storici debbano da subito e con molto maggiore impegno ridurre le proprie emissioni in modo significativo.

Nel misurare le responsabilità internazionali del riscaldamento globale, le emissioni storiche sono quelle che contano.
L'Unione Europea è seconda solo agli Stati Uniti nella quantità di emissioni storiche prodotte dall'inizio della rivoluzione industriale (Fig. 2), emissioni che ancora determinano buona parte del riscaldamento di oggi [3]. La Cina, oggi il più grande emettitore su base annuale, ha responsabilità storiche tuttora inferiori a quelle occidentali, e parte di queste sono dovute a prodotti che Stati Uniti e Unione Europea si fanno produrre a minor costo in Cina. Adottando principi di equità più stringenti, il grado di responsabilità andrebbe poi valutato sulle emissioni cumulative pro-capite (Fig. 3), con risultati ancora più evidenti a sfavore del mondo occidentale.

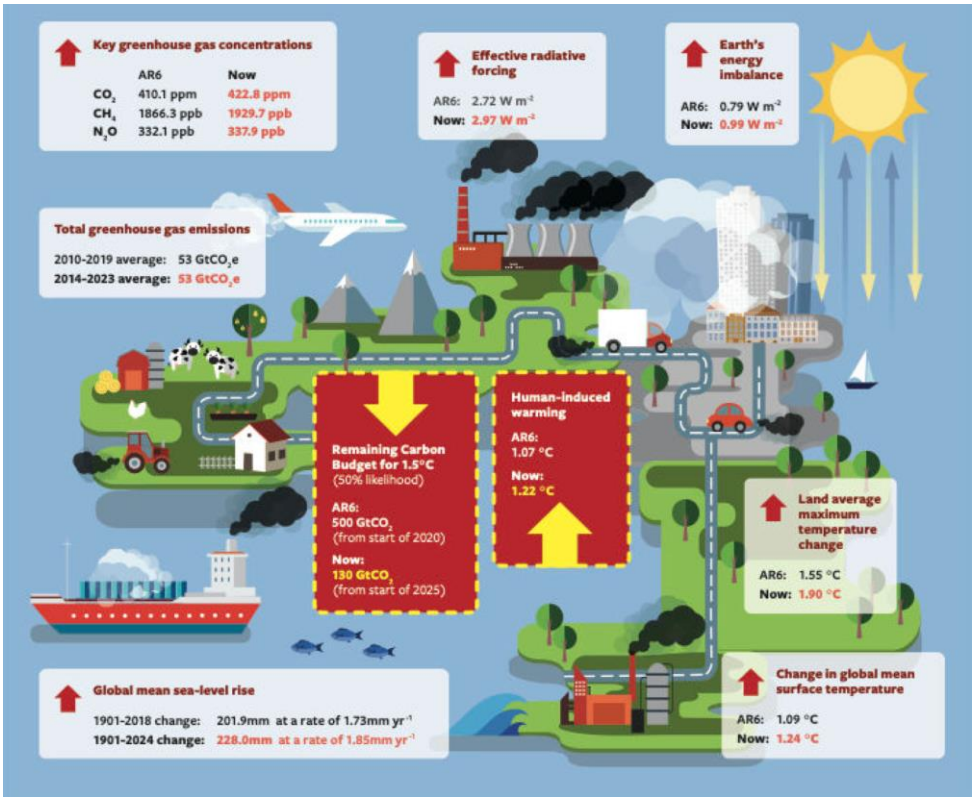


Fig. 1: Andamento dei parametri chiave di rappresentazione dei cambiamenti climatici nel periodo: 6° Rapporto IPCC 2021-22 (in figura AR6) - inizio 2025 (in figura "now"), quest'ultimo pubblicato come annual update 2024 da un vasto panel di scienziati (Forster e altri 49 autori, 2025 [2]) già coinvolti nella stesura dell'AR6.

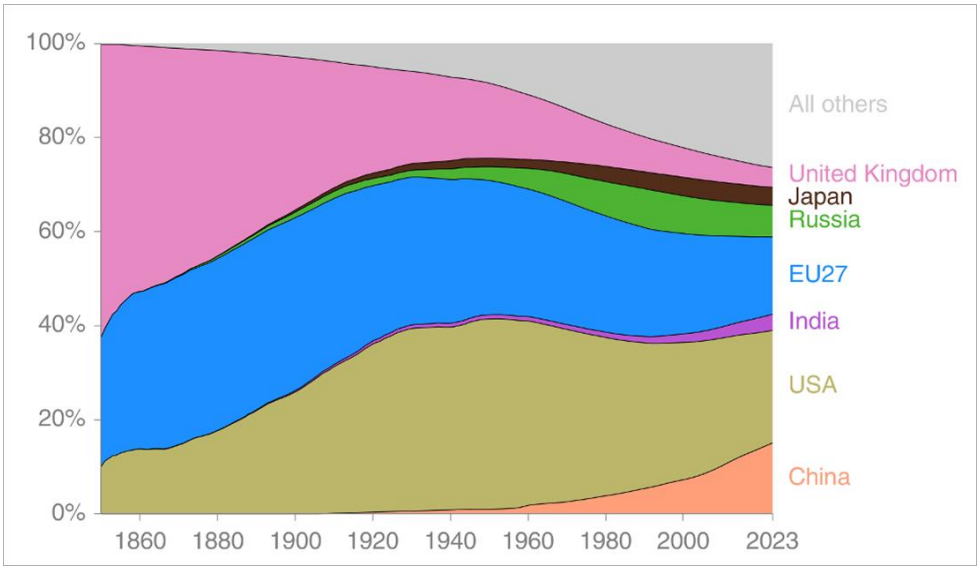


Fig. 2: Emissioni cumulative storiche di CO_2 da parte dei maggiori emettitori dal 1850 al 2023. La componente "All others" contiene anche le emissioni dovute alla navigazione aerea e marittima internazionale [3].

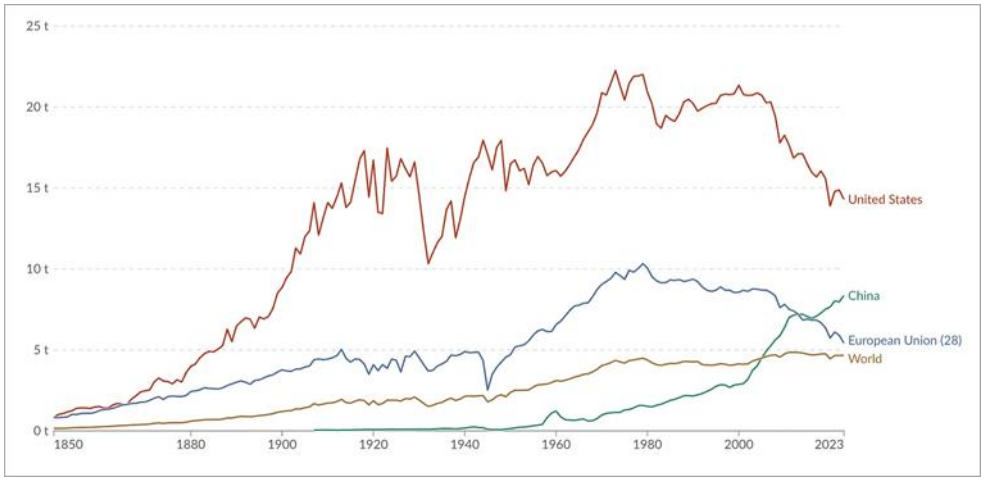


Fig. 3: Emissioni storiche pro-capite di Stati Uniti, Cina e UE+UK. Calcolando le emissioni sulla base dei beni consumati, il dato cinese almeno dalla fine degli anni '90 si abbassa di un 10-15%, e quelli di Stati Uniti e Unione Europea+Gran Bretagna si alzano conseguentemente (da https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions).

L'Italia è in grave ritardo nel ridurre le sue emissioni.
L'Italia, come stato membro dell'Unione Europea e del suo mercato unico che impone a tutti gli stessi standard ambientali e climatici, deve rispettare gli impegni di riduzione delle emissioni al 2030 (-55% a livello UE rispetto al 1990) e di giungere allo zero-netto entro il 2050. Questi target sono stati calcolati ipotizzando di consumare un certo budget di carbonio con un percorso lineare di riduzione seguito da tutti gli Stati membri. Questo ci obbliga a seguire una traiettoria molto ripida di riduzione [4], che l'Italia non sta seguendo, "mangiandosi" così emissioni che non dovrà più fare in futuro. Ogni ritardo nella decarbonizzazione si dovrà pagare in accelerazione futura, o lo pagherà il pianeta con un maggiore riscaldamento, e i rispettivi oneri ricadranno sulle giovani generazioni.

La scienza dei cambiamenti climatici si basa sul più ampio consenso scientifico.
Questo è il quadro di riferimento, che non deriva da "ambientalismo ideologico", come si sente dire spesso da nostri governanti, ma dalle conoscenze collettivamente acquisite dal mondo della scienza che stanno alla base del consenso scientifico che è presentato nei rapporti periodici dell'IPCC [5] e ripreso dai conseguenti accordi internazionali. Se mai, è il negazionismo che è ideologico in quanto non basato sulla scienza.

Non basta ridurre le emissioni fino ad azzerarle; bisogna anche adattarsi ai cambiamenti climatici [6] in corso e in divenire.
Le emissioni di gas serra che restano a lungo nell'atmosfera (CO_2, N_2O, certi gas fluorurati di sintesi a lunghissima vita) determinano un riscaldamento persistente e sempre crescente fino a quando esisterà la benché minima emissione. Di conseguenza, questi causano cambiamenti strutturali nel clima della Terra ai quali ci dobbiamo adattare per prevenire per quanto possibile gli effetti negativi e i danni prevedibili. Anche i gas serra a breve vita, come il metano (CH_4, vita media in atmosfera di circa 11-12 anni),

contribuiscono sostanzialmente al riscaldamento, ma se le loro emissioni venissero ridotte, data la loro breve vita si ridurrebbe il riscaldamento. L'aumento di temperatura ha già fatto aumentare la frequenza e l'intensità dei fenomeni meteorologici estremi, sta facendo crescere il livello dei mari, sta provocando lo scongelamento del permafrost in zone di montagna e alle alte latitudini, ed è la causa di molti altri cambiamenti in atto con prevalenti effetti negativi sulle società umane e sulla biosfera. La crescita della concentrazione della CO_2 atmosferica sta inoltre causando l'acidificazione degli oceani e mettendo a rischio le catene alimentari marine che si basano su organismi che necessitano scheletri o gusci carbonatici.

La mitigazione, ovvero la riduzione delle emissioni, è il miglior investimento per l'adattamento ai cambiamenti climatici.

I danni dovuti ai cambiamenti climatici crescono esponenzialmente al crescere della temperatura. Minore sarà l'aumento di temperatura a cui si riuscirà a stabilizzare la temperatura media della Terra, minori saranno i costi che dovranno sopportare la presente e le future generazioni. Peraltro, anche se investire nella riduzione delle emissioni è l'azione più efficace, mitigazione e adattamento non devono essere visti come alternative. L'investimento in mitigazione (es. energie rinnovabili al posto di energie fossili) deve essere accompagnato da investimenti nell'adattamento (es. protezione dagli eventi meteorologici estremi). Gli investimenti nell'adattamento devono essere a basso rischio di inefficacia (*low regret*), ovvero comunque parzialmente utili anche in caso di aggravamento dei fenomeni, e possibilmente scalabili nel tempo, ovvero espandibili in caso di aggravamento dei fenomeni.

La transizione energetica verso un futuro a zero emissioni nette non è più negoziabile.

La transizione energetica va attuata senza indugio, possibilmente al minor costo e con un ritorno il più possibile positivo in termini di benefici diretti e primari – rappresentati dai minori costi dovuti ai cambiamenti tecnologici per ridurre e azzerare le emissioni o derivati dalla riduzione delle emissioni - e di co-benefici – rappresentati dai minori costi derivanti da benefici secondari indotti, quali ad esempio il miglioramento della qualità dell'aria e i conseguenti vantaggi per la salute dovuti all'abbandono delle combustioni di vettori energetici fossili per generare energia, o la creazione di nuovi posti di lavoro, o altri benefici aggiuntivi.

Queste considerazioni introduttive sono poste alla base dell'enunciato dei capitoli 1-4 seguenti, nei quali si analizzeranno gli aspetti di sistema, le tecnologie, la decarbonizzazione dei vari settori e gli aspetti economici e sociali della transizione.

1 - Energia, emissioni e prospettive di sistema

1.1 - Il sistema energetico deve passare da fossile a rinnovabile.

Il sistema energetico italiano è fortemente basato sui combustibili fossili che rappresentano ancora quasi l'80% dei consumi, una quota complementare di rinnovabili poco superiore al 20%, e una dipendenza dall'estero di circa il 75%. Le emissioni sono in leggero calo dopo una lunga fase quasi stazionaria a cavallo degli anni COVID, nel 2024 intorno a 400 $MtCO_2eq$, questo non considerando le emissioni dovute ad un 16,3% di energia elettrica di importazione. Nella produzione elettrica nazionale, la quota prodotta da rinnovabili ha rappresentato nel 2024 poco meno del 50% del totale, composta a sua volta da circa il 40% di idroelettrico, 28% di fotovoltaico e 17% di eolico, oltre a quote minori di biomasse e geotermico. Nel 2024 la crescita delle rinnovabili rispetto all'anno precedente è stata di circa 7GW [7], soprattutto di fotovoltaico riconducibile in buona parte agli effetti del Superbonus 110%. L'eolico soffre purtroppo di processi autorizzativi molto lunghi e difficoltosi, che hanno portato ad uno sbilanciamento con il fotovoltaico; la complementarità di produzione tra estate e inverno delle due fonti, solare e eolica, richiederebbe uno sviluppo maggiore dell'eolico per dare stabilità al sistema elettrico.

1.2 - L'Italia è in ritardo sugli obiettivi UE al 2030.

La progressione verso gli obiettivi europei al 2030 è in grave ritardo e richiederebbe provvedimenti di accelerazione invece del protrarsi dell'incertezza normativa e programmatoria dovuta soprattutto al provvedimento sbagliato sulle aree idonee che, se pur bocciato da una sentenza del Tar del Lazio, ha causato ulteriori ritardi. Peraltro, dopo il progresso del 2024 il mercato delle rinnovabili è fermo, non soltanto per i ritardi normativi, ma anche per mancanza di fondi per le aste FER, fondi in gran parte dirottati per il potenziamento degli impianti galleggianti di rigassificazione. Il leggero calo delle emissioni del 2024 non è peraltro in linea con gli obiettivi UE al 2030, e nemmeno in linea con gli obiettivi del nuovo Piano Nazionale Integrato Energia e Clima (PNIEC), rischiando di farci rimanere fortemente arretrati rispetto alla media dei 27 stati membri e quindi con bassi spazi negoziali per il futuro.

1.3 - La riduzione delle emissioni italiane è più frutto della deindustrializzazione che di politiche attive.

Dal profilo delle emissioni degli ultimi anni prodotto da ISPRA (Fig. 4 e 5), risulta che il calo delle emissioni non è avvenuto tanto a causa di politiche strutturali – a parte l'effetto dei Conti Energia tra il 2010 e il 2012 - quanto in seguito a crisi industriali, come quella del 2008-2012. Anche il calo osservato nel 2024, per il quale si hanno solo dati provvisori, sembra solo in parte da attribuire alla crescita delle rinnovabili nella produzione elettrica, mentre sicuramente ha contribuito la crisi produttiva del polo di Taranto delle Acciaierie d'Italia.

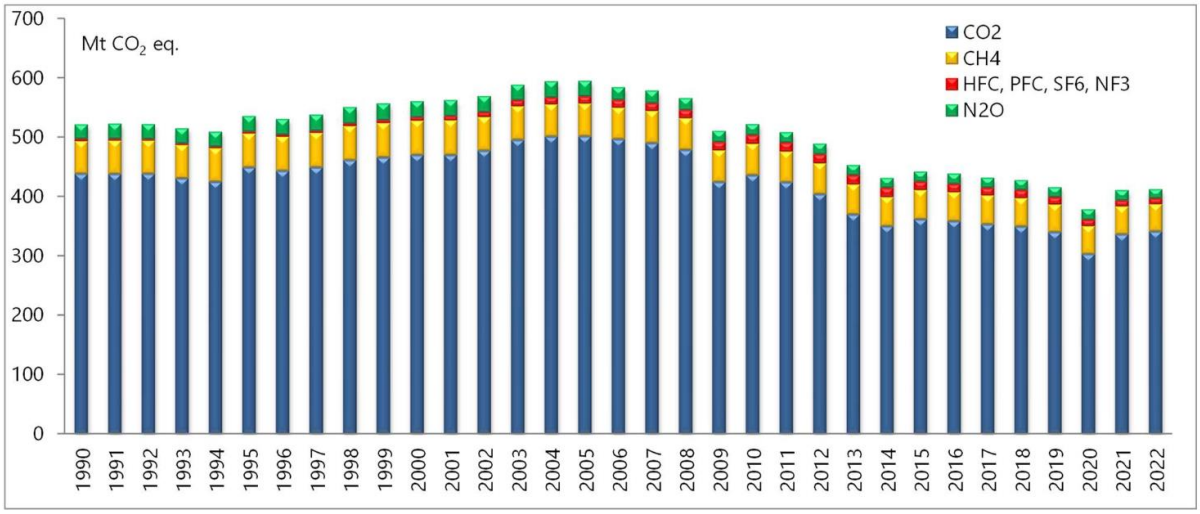


Fig. 4: Statistica ufficiale delle emissioni italiane su base annua [8]; si può notare la profonda flessione seguita alla crisi finanziaria del 2008 e alla conseguente deindustrializzazione, certificata anche dalle statistiche industriali (vedi Fig. 5).

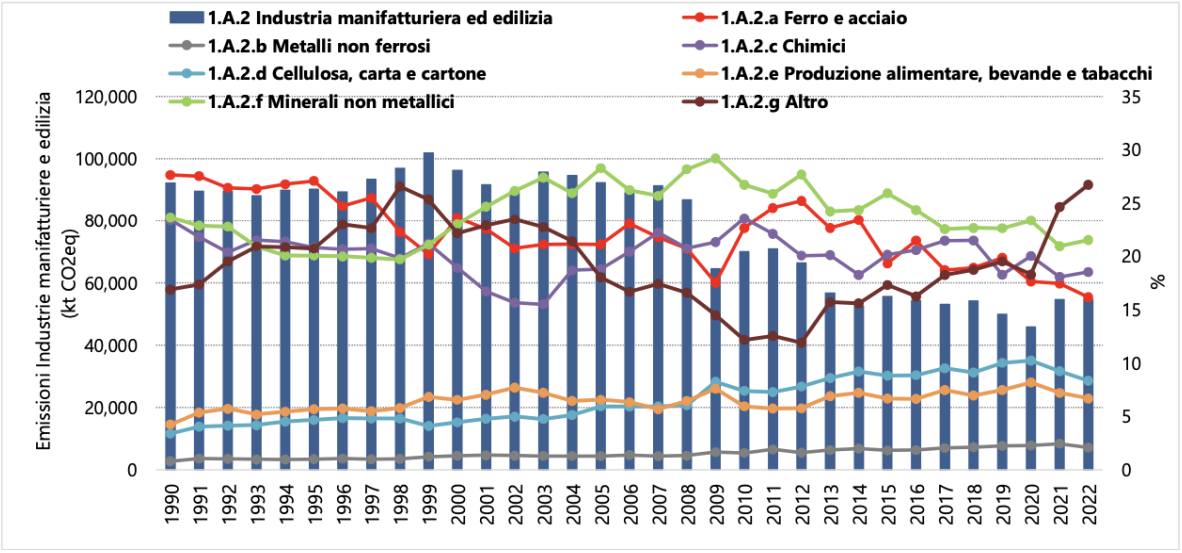


Fig. 5: Emissioni industriali su base annua in Italia [8]. A sinistra, emissioni industriali totali (barre blu verticali); a destra, percentuale settoriale delle emissioni industriali (linee colorate).

1.4 - L'agricoltura è responsabile della gran parte delle emissioni di ossido nitroso e di metano, più difficili da rimuovere.

Circa l'82% delle emissioni italiane sono di anidride carbonica (CO_2), l'11% circa di metano (CH_4), quasi il 4% di ossido nitroso (o protossido di azoto, N_2O), e il 2,5% circa di gas fluorurati. È utile tenere in considerazione questi numeri in quanto l'agricoltura, responsabile almeno della metà delle emissioni di metano (soprattutto a causa dei ruminanti, bovini in testa, che emettono metano dalla bocca durante la ruminazione, e dalle deiezioni animali) e della quasi totalità di quelle di N_2O (causate da processi microbiologici di trasformazione dei fertilizzanti azotati nel suolo), rappresenta un settore resistente alla decarbonizzazione, in quanto diretto da stili di vita e abitudini alimentari dei consumatori non facili da modificare,

e segnato in parte da barriere all'adozione di tecniche colturali innovative (vedi § 3.21).

1.5 - Nel sistema energetico italiano la maggioranza dell'energia consumata è sprecata come calore di scarto.

Il sistema energetico, con piccole differenze nei numeri, è ben rappresentato dal diagramma Sankey del Lawrence Livermore National Laboratory riferito all'anno 2017 (su dati IEA, Fig. 6 [9]) che mette molto bene in evidenza che per generare servizi energetici - in termini essenzialmente di elettricità, calore e movimento - del valore di circa 700 TWh/anno, si buttano via come calore di scarto circa 1100 TWh/anno, più del 60% dell'energia totale consumata. La dipendenza dell'80% dai fossili prima richiamata (vedi § 1.1) nasconde il cosiddetto "errore dell'energia primaria", in quanto in realtà genera molto meno servizi energetici utili, mentre il 20% di rinnovabili non hanno scarto se non le normali perdite di rete.

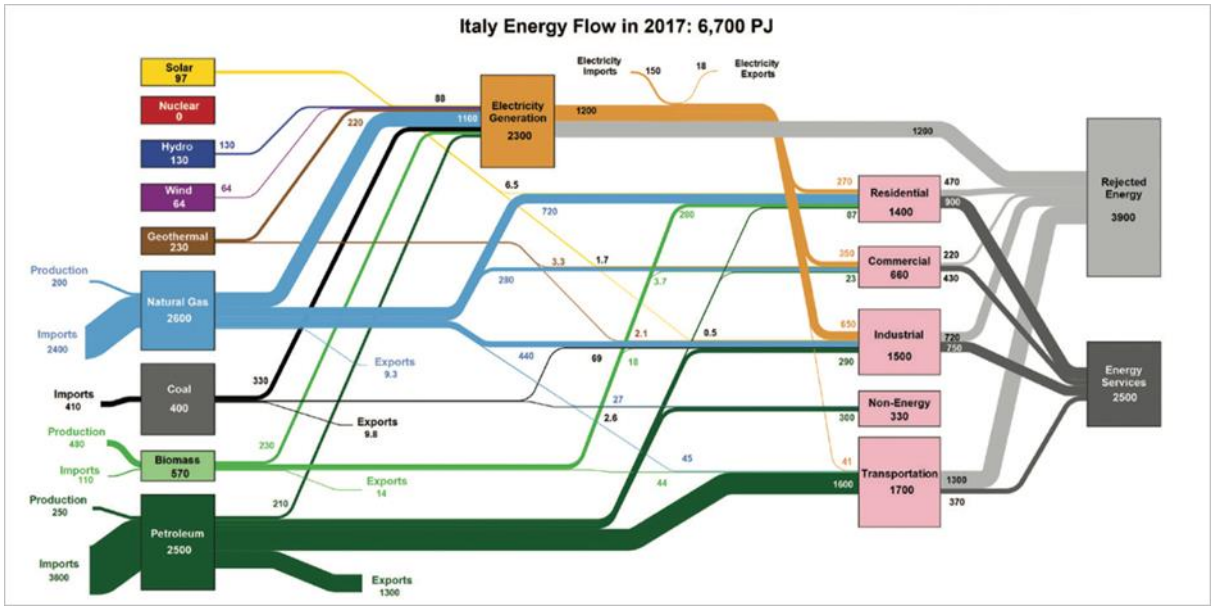


Fig. 6: Diagramma Sankey del sistema energetico italiano nel 2017 finalizzato a quantificare i flussi di energia (in Petajoule) per produrre servizi energetici finali. 1 PJ= 0,278 TWh, da cui si ricava che i servizi energetici finali utili sono circa 700 TWh, ovvero il 37% circa dell'energia consumata (fonte Lawrence Livermore National Laboratory 2021, su dati IEA Detailed World Energy Balances 2019 - Valori arrotondati).

1.6 - Un sistema energetico futuro basato al 100% sulle rinnovabili è possibile.

Il sistema energetico di domani a zero emissioni nette sarà molto diverso da quello attuale fortemente centralizzato. Lo sviluppo delle energie rinnovabili, programmabili (idroelettrico, geotermico e biometano/biomasse), non programmabili (solare fotovoltaico e eolico) e relativi stoccaggi (batterie, pompaggi idroelettrici, power2X, biometano in accumuli geologici per alimentare turbogas in riserva, altri sistemi di stoccaggio in via di sviluppo) dovrà essere accompagnato da uno sviluppo delle reti di distribuzione e delle interconnessioni con l'estero, UE e paesi confinanti. La negazione della possibilità di un sistema al 100% rinnovabile è

stata oggetto di una discussione spesso non fondata su considerazioni tecnico scientifiche e alimentata dagli ingenti interessi economici che circondano il mondo dei combustibili fossili. In questo Rapporto si fa riferimento alla letteratura scientifica prevalente e si rimanda alle estese considerazioni della campagna "100% rinnovabili" a cui aderisce Energia per l'Italia [10]. Va inoltre considerato che, con il procedere della transizione energetica, il profilo della domanda di potenza elettrica dovrebbe cambiare. La riduzione della domanda energetica degli edifici e dell'industria, gli accumuli termici, le reti di teleriscaldamento, la possibilità futura di sistemi *Vehicle-to-Grid,* il potenziamento delle reti e delle interconnessioni internazionali e molte altre innovazioni porteranno ad un generalizzato aumento dell'efficienza energetica e abbasseranno – in relativo - anche la domanda di picco del sistema elettrico.

1.7 - Le reti di distribuzione dell'energia elettrica sono state concepite per un sistema con pochi punti di generazione e molti di consumo e non sono adatte ad un sistema strutturalmente decentrato.

La rete elettrica nazionale [11] è stata concepita per un sistema con un relativamente piccolo numero di grandi centrali di generazione lungo delle dorsali e prossime ai nodi, e una distribuzione verso le zone periferiche con una prevalenza di flussi dal Nord al Sud. Con il crescere delle rinnovabili, e in particolare di fotovoltaico ed eolico nel meridione, oggi i flussi sono prevalentemente dal Sud al Nord e dalla periferia verso le zone centrali. Si è determinata quindi la necessità di rinforzare le reti ad alta tensione e le connessioni trasversali tra le dorsali principali per eliminare colli di bottiglia e aumentarne la stabilità. Lo sviluppo non riguarda solo le capacità di trasporto (aumento delle connessioni in alta tensione sud-nord e est-ovest e delle interconnessioni con l'estero), quanto le capacità di controllo e regolazione (digitalizzazione, smart grids, regolazione dei flussi, sistemi di inerzia sintetica, capacità di blackstart, flessibilità con sistemi demand-response) e il posizionamento strategico di sistemi di stoccaggio associato a soluzioni *grid-forming* oltre che *grid-following* . Il programma pluriennale di TERNA prevede già molto di tutto questo, anche se il programma di capacità di stoccaggio MACSE dovrebbe essere ampliato da 50 a più di 70 GWh. Nella valutazione dei costi, grosso modo per ogni euro di investimento in rinnovabili si stima quasi un altro euro in reti (di cui la metà sarebbe comunque stata spesa per ammodernamento e manutenzione) e 50 centesimi in stoccaggi.

1.8 - Il sistema energetico futuro produrrà più del doppio dell'energia elettrica oggi consumata.

L'azzeramento delle emissioni nette si potrà ottenere soltanto con la progressiva uscita dai combustibili fossili e una generale elettrificazione del sistema energetico, anche perché futuri impieghi di vettori energetici gassosi o liquidi a zero emissioni dovranno necessariamente derivare da energia elettrica rinnovabile. Pertanto, i circa 700 TWh di energia equivalente del sistema energetico al 2017 dovranno da una parte calare per effetto del miglioramento progressivo dell'efficienza energetica (ad

esempio negli edifici e nelle produzioni industriali), ma d'altra parte dovranno crescere per sostenere l'elettrificazione di edifici e veicoli, e per poter produrre almeno la metà di vettori energetici gassosi e liquidi (idrogeno, combustibili sintetici, biocombustibili sostenibili), oggi prevalentemente d'importazione, necessaria per alcuni processi industriali e per trasporti di lunga distanza non elettrificabili (navi e aerei). Diversi studi [12][13][14] che prefigurano un sistema energetico net-zero al 2050 portano stime anche molto diverse dovute a scenari differenti, ma non si sbaglia di molto nel fornire per uno scenario "*net*-zero" al 2050 una forchetta della domanda domestica di servizi energetici tra 600 e 750 TWh/anno molto dipendenti dalle diverse proiezioni demografiche, dalle aspettative di sviluppo economico e dalla percentuale di autosufficienza energetica. Infatti, forti differenze possono dipendere dalla percentuale di produzione nazionale (e dal complemento di importazione) di vettori energetici "verdi" per funzioni non elettrificabili (vedi § 3.14, 3.16 e 3.17). In complesso, la transizione energetica comporterà una massiccia transizione verso l'elettrico con un forte recupero di efficienza. I due *driver* quasi si compensano, ma per ottenere questo risultato il ricorso allo stoccaggio dell'energia è fondamentale.

1.9 - Un sistema energetico al 100% rinnovabile fornisce indipendenza e sicurezza energetica.

Un sistema energetico basato solamente sulle energie rinnovabili e stoccaggi, ben integrato nel sistema energetico europeo, è garanzia di indipendenza e sicurezza energetica, protegge il Paese dalle oscillazioni dei prezzi delle fonti fossili, e libera grandi risorse economiche, oggi versate all'estero per l'acquisto di petrolio e gas, utilizzabili per sviluppo interno e nuova occupazione. Dobbiamo però essere consapevoli che la progressiva riduzione delle importazioni di materie prime energetiche avrà forti conseguenze negative nei Paesi esportatori, oggi principalmente localizzati in Nord-Africa e Asia Sud-Occidentale, situati in aree geopoliticamente complesse e con economie essenzialmente basate sull'esportazione di gas e petrolio. Sarà necessario quindi accompagnare il nostro disimpegno commerciale con progetti di cooperazione, anche in campo energetico, in particolare per la produzione di vettori energetici verdi.

1.10 - L'energy-mix ideale richiede un bilanciamento tra fotovoltaico, eolico e stoccaggio.

Lavori di ricerca sull'ottimizzazione dell'energy mix in funzione del costo di produzione mettono in evidenza il vantaggio di permettere un adeguato sviluppo di solare fotovoltaico a terra in impianti utility-scale (oltre che sui tetti) e di un complementare sviluppo di eolico (indicativamente con un rapporto FV/eolico ottimale di 60/40 in potenza), associati a stoccaggio, con sviluppo di nuovi pompaggi idroelettrici e sistemi a batteria. L'utilizzo del biometano in stoccaggi stagionali per impianti turbogas di adeguatezza potrebbe fornire il contributo di capacità non coperto dalle interconnessioni o da flessibilità. In prospettiva della sostituzione progressiva del parco veicolare con veicoli elettrici, lo sviluppo di sistemi V2G (*Vehicle to Grid*)

potrebbe fornire per ogni milione di veicoli collegati la disponibilità di almeno 20-30 GWh di ulteriore stoccaggio distribuito. La limitazione dello sviluppo dell'eolico e del fotovoltaico utility-scale a terra - oggi spesso osteggiati per opposizioni paesaggistiche o localistiche - potrebbe essere la causa maggiore di aumento dei costi di sistema per la necessità di sovradimensionare la produzione solare e gli stoccaggi stagionali, tuttora in fase di sviluppo tecnologico.

1.11 - Necessaria un'assegnazione dei carichi (*burden-sharing*) tra le Regioni più direttivo da parte governativa.

La problematica della tendenza da parte di molte Regioni di imporre divieti molto estesi a eolico e fotovoltaico *utility-scale* va risolta con un *burden-sharing* più direttivo verso le regioni da parte governativa, basato sulle necessità di sicurezza energetica e di rispetto degli impegni internazionali, coerentemente alla sentenza del Consiglio di Stato n. 6160/2025 del 14 luglio 2025 nella quale si chiarisce definitivamente che la materia della produzione energetica da fonti rinnovabili rientra nella competenza legislativa esclusiva dello Stato alla quale le Regioni non possono aggiungere ulteriori restrizioni, e si ribadisce il principio dell'interesse pubblico prevalente degli interventi di produzione energetica da fonti rinnovabili. Questo deve essere accompagnato da processi di compartecipazione delle comunità locali alla progettazione e agli utili generati dagli investimenti, peraltro già in parte presenti nella normativa attuale [15]. Inoltre, le aree idonee non possono essere limitate al 2030, ma devono prevedere il pieno sviluppo al 2050, considerando il periodico *repowering*. Sarebbe poi necessario prevedere una più veloce introduzione delle tariffe zonali dell'energia elettrica non perequate, e delle tariffe orarie, al fine di meglio riflettere nei prezzi locali lo sviluppo territoriale delle rinnovabili, responsabilizzando quindi le Regioni in relazione ai prezzi dell'energia pagati da proprie imprese e cittadini.

1.12 - Il nucleare non è utile alla transizione energetica.

Il rilancio del governo italiano sul nucleare sembra basato più sull'effetto-annuncio che su una prospettiva reale. Il governo punta su un "nucleare sostenibile" di dubbia esistenza, tra SMR (Small Modular Reactors), ovvero reattori tradizionali ma di piccola taglia (2-300 MW), e AMR (Advanced Modular Reactors), ovvero reattori molto più piccoli e prodotti in serie, con sistemi di raffreddamento a metalli fusi, non ancora disponibili. Ripartire da zero sul nucleare ha prima di tutto un problema di tempi che lo rende incompatibile con le urgenze della decarbonizzazione richieste dai nostri impegni. In qualsiasi versione venga rilanciato, un suo contributo al sistema energetico non sarebbe significativo prima di 20-25 anni, quando il nostro sistema elettrico dovrebbe essere già dal 2035 pressoché al 100% a zero emissioni. Questo rilancio si scontra poi con problemi di costi, di localizzazione, di maggiori problemi di scorie rispetto al grande nucleare, di sicurezza fisica, di controllo militare dei rischi di sottrazione di materiale fissile, nonché di integrazione con le rinnovabili, dato che il nucleare in genere non si presta per ragioni tecniche e di costo ad un utilizzo modulato. Va detto inoltre che la dipendenza dall'estero per il combustibile, oggi in

particolare dalla Russia e domani dagli USA, creerebbe una nuova dipendenza da evitare.

1.13 - I costi del nucleare non si limitano al costo di costruzione degli impianti.

Le esperienze più recenti di nuove realizzazioni di nucleare tradizionale in Europa, come in Finlandia e quelle in corso nel Regno Unito, mostrano costi moltiplicati per fattori interi rispetto a quelli di progetto, ritardi nella realizzazione molto importanti rispetto alle previsioni, e conseguenti altissimi costi finanziari. Inoltre, come Paese dell'Unione Europea, dobbiamo fare i conti con l'assenza in Italia di un sito di stoccaggio permanente, e quindi con l'impossibilità di far rientrare i costi nell'ambito degli investimenti sostenibili previsti dalla tassonomia UE. Va poi detto che riaprire il nucleare italiano, chiuso da più di 25 anni, comporta enormi costi – e tempi lunghi - per ricostituire le competenze e le infrastrutture di ricerca, supervisione e controllo, essenziali per una gestione sicura del sistema.

1.14 - Gli assorbimenti di CO_2 delle foreste sono incerti e fragili.

Dato che non tutte le emissioni si potranno completamente azzerare, la capacità della vegetazione di assorbire CO_2 è cruciale per raggiungere lo zero-netto di emissioni al 2050. In Italia si stima che le foreste, i prati-pascoli, i suoli e attività agricole (LULUCF, da Land-Use, Land-Use Change and Forestry) assorbano il 14% circa delle emissioni totali. Tuttavia, il calcolo di queste quantità è soggetto a notevoli incertezze, a causa della grande variabilità spazio-temporale dei flussi di CO_2 e alla difficoltà di separare la componente naturale da quella dovuta alla gestione antropica del patrimonio prativo e forestale [16]. Inoltre, questi assorbimenti sono vulnerabili: a livello europeo si è già assistito ad un loro importante calo, causato anche dai cambiamenti climatici e dall'aumento degli incendi boschivi, il cui rischio è cresciuto con il riscaldamento globale [17]. Le foreste sono un alleato prezioso, ma fragile, nella lotta ai cambiamenti climatici: il loro contributo ha senso solo se accompagnato da una rapida decarbonizzazione degli altri settori. Sarebbe già tanto se al 2030 gli assorbimenti LULUCF reali fossero capaci di compensare le emissioni non-CO_2 del settore agricolo-zootecnico. Questo comporterebbe, in prospettiva dello zero-netto, che tutti gli altri settori che avessero emissioni residue dovrebbero essere compensati da emissioni negative.

2 - Tecnologie energetiche rinnovabili, stoccaggi e condivisione dell'energia

2.1 - L'Italia è un Paese vocato per le rinnovabili [18].

Dove? Sulle Alpi e a complemento di invasi artificiali in Appennino per l'idroelettrico; in prevalenza nel Sud ma in generale in tutta la penisola per il solare fotovoltaico e per la produzione di acqua calda sanitaria con il solare termico; sulle coste, al Sud, sui crinali appenninici e *offshore* nel mare Adriatico per l'energia eolica, in attesa che diventi competitivo il costo dell'eolico galleggiante che avrebbe siti particolarmente idonei al largo della costa occidentale della Sardegna, della costa sud-occidentale della Sicilia, e nel Tirreno centrale.

2.2 - Il fotovoltaico a terra è essenziale.

Il fotovoltaico è tipicamente di quattro tipologie: 1) quello installato sui tetti delle case; 2) quello, più grande, su coperture industriali, parcheggi, e altre infrastrutture; 3) quello a terra "utility-scale" di grandi dimensioni, fisso o con inseguitori; 4) il cosiddetto agrivoltaico. Dato che l'orientamento ottimale è a Sud, con una inclinazione rispetto all'orizzontale di circa 35°, si può ben comprendere che non tutti i tetti e le coperture industriali risultino idonei, e come l'installazione su strutture esistenti comporti quasi sempre compromessi di minor rendimento rispetto all'ottimale. Le migliori rese economiche si hanno senza dubbio con impianti a terra orientati a Sud con inseguitori Est-Ovest, capaci di fornire 1830 MWh/MWp al Sud e 1600 MWh/MWp al Nord, a costi di produzione di poco superiore ai 60 €/MWh al Sud e ai 70 €/MWh al Nord. La curva di produzione [19] di un impianto con inseguitori solari presenta due picchi, uno verso metà mattina e un secondo verso metà pomeriggio, con una leggera flessione a metà giornata quando si ha il picco degli impianti fotovoltaici a orientamento fisso. Un buon equilibrio tra impianti a inseguitori e impianti a orientamento fisso permetterebbe già di ridurre molto la necessità di stoccaggio dell'energia in eccesso da distribuire in altri momenti della giornata. Si calcola che per produrre tutta l'energia elettrica oggi consumata con il più efficiente fotovoltaico a terra, basterebbero 180000 ettari ben esposti, pari a solo l'1,4% della superficie agricola utile (SAU) italiana.

2.3 - La questione dell'agrivoltaico.

Mentre il fotovoltaico su tetti, capannoni industriali e altre infrastrutture ha una sua redditività, soprattutto quando può essere coperto da autoconsumo, si esprimono dubbi sul cosiddetto agrivoltaico, un ibrido che combina una relativamente bassa produttività fotovoltaica con una necessariamente inferiore produttività agricola, fatto salvo per produzioni che si avvantaggiano dall'ombreggiatura fornita dai pannelli. Sarebbe meglio, per l'economia dell'agricoltura, dedicare a fotovoltaico a terra una piccola porzione dei terreni agricoli, in particolare quelli non coltivati o destinati alle poco sostenibili colture a fini energetici. Se ben progettato, il fotovoltaico a terra può diventare un'isola di biodiversità, creando riparo e zone di riproduzione per insetti utili, impollinatori, e piccoli animali.

2.4 - Fotovoltaico ed eolico sono complementari.

Il fotovoltaico (FV) produce solamente di giorno, e segue una curva stagionale con un massimo estivo. L'eolico produce invece nelle 24 ore, senza grandi differenze tra notte e giorno, e molto di più nei mesi invernali rispetto all'estate. Se installato a terra, l'eolico ha rese annue di circa 2000 kWh/kWp, mentre offshore si situa intorno a 2500 kWh/kWp, ma in siti particolarmente favorevoli anche a 3000 kWh/kWp e più. È quindi evidente la complementarità con il fotovoltaico (Fig. 7, [20]). In termini di potenza installata, il mix ottimale si otterrebbe con un rapporto FV/eolico intorno a 60/40. Purtroppo, a causa dei ritardi amministrativi e delle frequenti opposizioni a progetti eolici, il rapporto FV/eolico a fine 2024 era di 74/26, con tendenza al peggioramento. Il messaggio, in particolare alle amministrazioni regionali che devono proporre le aree idonee, è quello di non frenare l'eolico, essenziale per poter sviluppare un sistema energetico totalmente basato sulle rinnovabili e per far scendere il costo dell'energia elettrica. L'eolico è installabile solo dove c'è vento, a terra su crinali ventosi e in zone costiere, o in mare, e produce energia al prezzo più basso tra le rinnovabili. Il suo consumo di suolo è irrisorio e temporaneo; al termine dei 20-25 anni della sua vita tecnologica un parco eolico può essere smontato e riciclato, oppure sostituito con un minor numero di macchine più potenti ed efficienti.

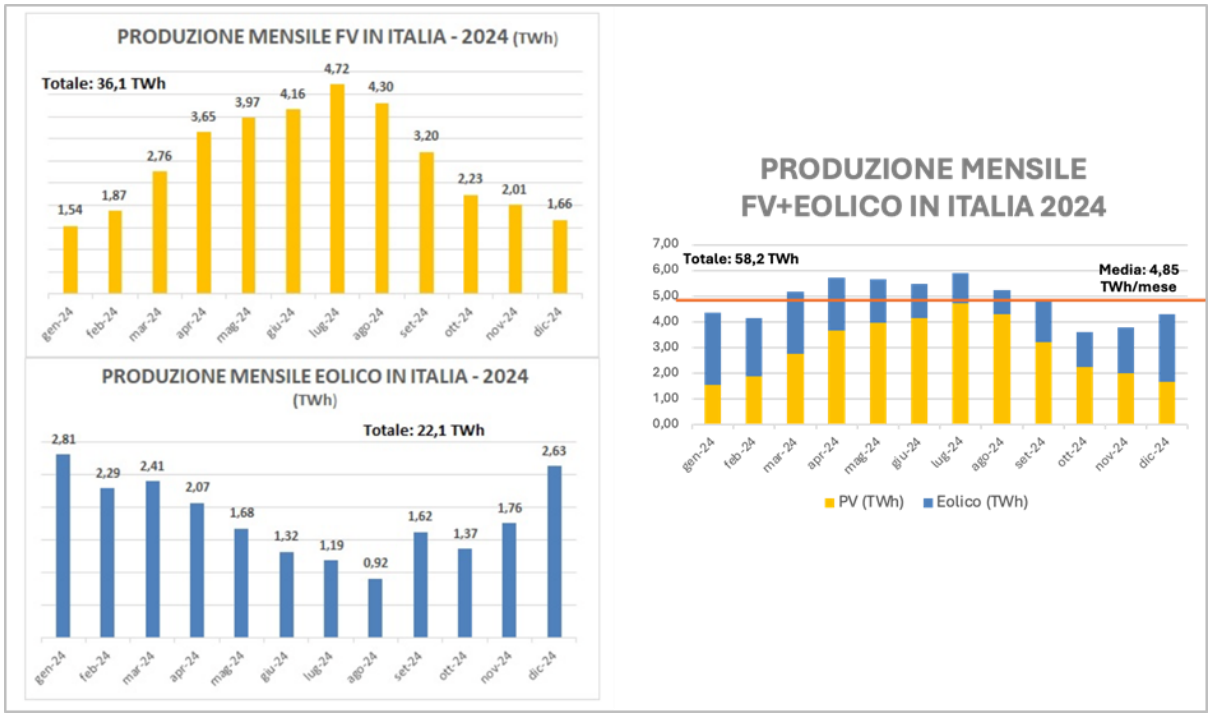


Fig. 7: Dati 2024 sulla produzione mensile di fotovoltaico ed eolico in Italia da cui si può evincerne la complementarità stagionale (fonte TERNA).

2.5 - Impianti per energie rinnovabili e paesaggio non sono in conflitto.

La decarbonizzazione attraverso fonti rinnovabili richiede quindi un adeguato mix di eolico, fotovoltaico e relativi stoccaggi, restando quasi invariato il contributo dell'idroelettrico, per assicurare copertura del fabbisogno, complementarità nella produzione e costi sostenibili. In uno

scenario di decarbonizzazione ottimizzato, in termini di costi-benefici, si rende quindi necessario installare impianti eolici nei luoghi ventosi e fotovoltaico *utility-scale* a terra. Come per qualsiasi altra infrastruttura, anche lo sviluppo di questa infrastruttura energetica comporta una modifica del paesaggio [21]. Immaginare una transizione energetica a paesaggio invariato significa, di fatto, impedire la transizione energetica e arrendersi alla crisi climatica. Le necessità di superficie per lo sviluppo di impianti eolici e fotovoltaici sono assai limitate, inferiori a qualche punto percentuale dell'intera superficie del Paese; nonostante questo, l'inserimento paesaggistico di questi impianti, in particolare a terra, incontra crescenti opposizioni. Se il paesaggio è il frutto dell'interazione tra uomo e natura, il valore che gli viene attribuito non può prescindere dalle motivazioni che spingono l'uomo a modificarlo. Tolti alcuni ambiti di particolare tutela, già individuati dalla legge, che riteniamo intangibili, il resto del paesaggio ha tanto più valore quanto più è il segno di un'opera di riconciliazione dell'uomo con la natura. Un parco eolico o un campo fotovoltaico possono rappresentare il segno di un'azione tesa a ristabilire un giusto equilibrio tra società e pianeta. Riteniamo che a questo "paesaggio post-fossile" si possa attribuire un valore positivo, anche estetico.

2.6 - L'eolico offshore galleggiante deve ancora svilupparsi per diventare economicamente competitivo.

Per l'eolico offshore, oggi possibile in Italia con installazioni sul fondale quasi solo nell'alto Adriatico e in pochi altri siti costieri, si sta sviluppando una ipotesi di impianti galleggianti in mare aperto, ancorati su fondali al massimo di 5-600 m. A questo proposito va detto che i costi sono ancora elevati e questi impianti richiedono per ora forti sussidi per produrre energia a costi accettabili. Senza dubbio questa tecnologia aprirebbe nuovo lavoro per l'industria cantieristica nazionale, ma è saggio procedere con cautela con installazioni pilota per far scendere i costi. Un primo impianto galleggiante nel Mediterraneo è stato recentemente varato in Francia [22].

2.7 - Il potenziamento (repowering) di impianti esistenti permetterà tra oggi e il 2050 di aumentarne la produzione rinnovabile a parità di superficie.

Fotovoltaico ed eolico hanno dimostrato in questi anni di essere ancora in fase di crescita tecnologica, in quanto le efficienze dei nuovi prodotti continuano a crescere, e i costi a calare. Il *repowering* di impianti fotovoltaici esistenti, abbinato al rinnovamento (*revamping*) che si effettua dopo un tempo adeguato ad aver sfruttato economicamente l'installazione, permette quindi di aumentare significativamente la produzione senza modificare la superficie occupata. Il *repowering* dell'eolico [23], laddove sia possibile l'installazione di pale più alte e quindi molto più efficienti, permetterebbe di sostituire con meno pale più potenti un numero elevato di piccoli aerogeneratori, ottenendo anche una produzione complessiva maggiore.

2.8 - Energia da biomasse: attenzione alla sostenibilità.

La produzione di energia da biomasse è oggi articolata su quattro strade principali: 1) la produzione di biocombustibili da colture energetiche (e.g. biodiesel da olio di colza) o da residui dell'industria alimentare (e.g. olii vegetali esausti) di produzione nazionale o di importazione; 2) la produzione di biogas/biometano per digestione anaerobica di deiezioni zootecniche e colture energetiche; 3) il riscaldamento domestico con stufe a pellet di legno; 4) centrali di cogenerazione alimentate da biomasse legnose di scarto. Tutti questi sistemi presentano rilevanti problemi di sostenibilità, tra cui: profili emissivi talvolta maggiori dei combustibili fossili sostituiti (*e.g.* molti biocombustibili da colture energetiche, l'aggiunta di biomasse coltivate in impianti di biogas); rilevanti emissioni in fase di trasporto delle biomasse importate in Italia (*e.g.* la quasi totalità dei pellet di uso domestico provengono da Paesi lontani senza una certificazione di provenienza in cascata d'uso, alte emissioni di trasporto oltre a dubbia natura e provenienza di molte sostanze oleose provenienti dall'Asia per la produzione di biocombustibili [24]); emissioni inquinanti e di gas a effetto serra (*e.g.* polveri sottili e altri inquinanti atmosferici da stufe a pellet e combustione di biomasse legnose, perdite di metano in atmosfera dagli impianti di biogas). Per questi motivi lo sviluppo futuro delle biomasse per la produzione di energia richiede attente analisi di sostenibilità, non dimenticando che le biomasse sono già e saranno necessarie per sostituire il petrolio con carbonio di origine biogenica per l'industria chimica, e saranno necessarie per produrre emissioni negative nei cosiddetti impianti BECCS (*Bio-energy with Carbon Capture and Storage*), catturando e rimuovendo definitivamente dal ciclo la CO_2 prodotta.

2.9 - Geotermia a medio-bassa entalpia: nuova tecnologia da valutare per impianti di teleriscaldamento urbano.

Nuove applicazioni di geotermia a bassa entalpia a circuito chiuso, e quindi a basso o nullo inquinamento ambientale, stanno emergendo con prime applicazioni in varie parti del mondo [25][26] e sperimentazioni anche in Italia [27]. La tecnologia va seguita con attenzione, in particolare per la possibilità di alimentare reti di teleriscaldamento urbano, mentre sembra meno utile per la produzione di energia elettrica a causa dei costi elevati.

2.10 - La condivisione dell'energia tra produttori domestici di rinnovabili e consumatori deve essere sburocratizzata.

In Italia l'energia elettrica viene distribuita da linee ad alta tensione che alimentano circa 2100 cabine primarie che a loro volta alimentano in media tensione circa 430000 cabine secondarie che distribuiscono in bassa tensione a 36 milioni di utenti. Già oggi, 1 milione e mezzo di questi utenti autoproducono energia, quasi sempre con impianti fotovoltaici domestici o di piccole imprese, immettendo in rete energia che viene inconsapevolmente utilizzata dagli utenti che sottostanno alla stessa cabina. In sostanza, ogni gruppo di utenti di una cabina secondaria in cui siano presenti auto-produttori è una Comunità Energetica Rinnovabile (CER) di fatto. La nuova normativa europea sul mercato dell'energia sollecita

una facilitazione della condivisione dell'energia autoprodotta, il che rende necessario sburocratizzare le attuali normative sulle CER rendendo più facile e senza rendite improprie la cessione a terzi di energia autoprodotta, attraverso lo scorporo in bolletta dell'energia condivisa [28].

3 - Usi settoriali dell'energia e decarbonizzazione

3.1 - I settori maggiormente responsabili delle emissioni sono edifici, trasporti e industria.

Guardando le emissioni dal punto di vista degli usi finali dell'energia e delle altre fonti emissive, *grosso modo* gli edifici sono responsabili di circa il 30% delle emissioni italiane, i trasporti di poco meno del 30%, l'industria di un altro 25-30% e l'agricoltura e i rifiuti del rimanente 10-15%. Nel percorso di decarbonizzazione, ciascun settore ha proprie specificità e criticità.

3.2 - Il parco edilizio nazionale è altamente inefficiente dal punto di vista energetico.

Oltre che energeticamente inefficienti (Fig. 8), le abitazioni sono fortemente dipendenti dal gas (e in piccola misura da altri combustibili fossili) per il riscaldamento invernale e gli usi di cucina. L'obiettivo della transizione deve essere quello di abbandonare progressivamente l'uso dei fossili fino all'azzeramento entro il 2050. Per raggiungere questo obiettivo con la massima economia - raggiungibile con l'elettrificazione (pompe di calore, piani di cottura elettrici a induzione), con il solare termico, con lo sviluppo di sistemi di accumulo termico, e/o con reti di teleriscaldamento alimentate da calore di scarto e rinnovabili - sarà necessario mettere in opera un piano di ammodernamento energetico degli edifici che comporti - a seconda dei casi - anche interventi sull'involucro e sulla possibilità di autoproduzione di energia elettrica e acqua calda sanitaria.

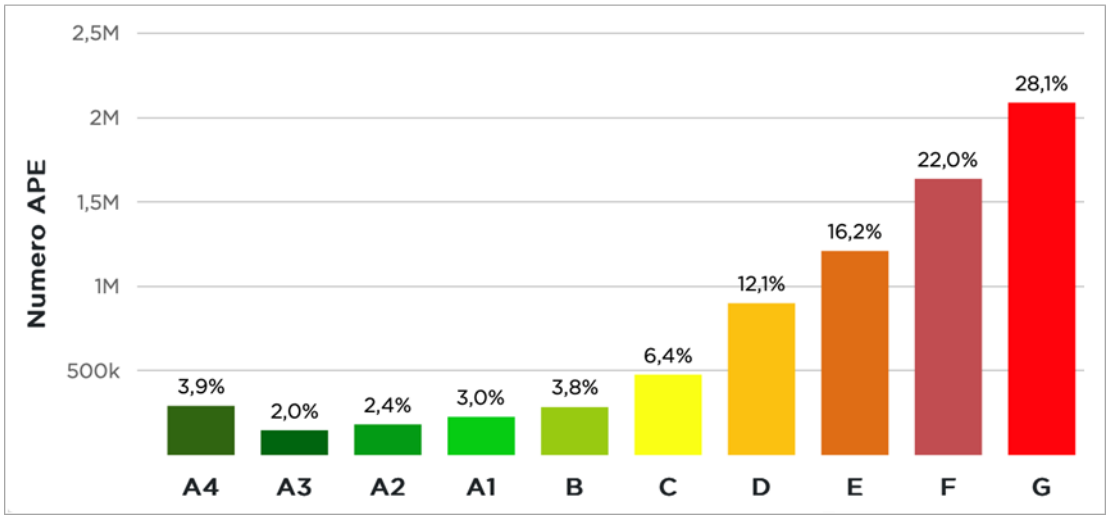


Fig. 8: Distribuzione per classe energetica dei 7,4 milioni di Attestati di Prestazione Energetica (APE) di unità abitative presenti nel database SIAPE-ENEA [29] al 4/8/2025. Questi rappresentano un campione parziale dei 67 milioni di unità abitative italiane totali. Secondo uno studio della Banca d'Italia (QEF 850, 2024 [30]) il campione sovrastimerebbe di circa un 9% la categoria G e di piccole percentuali tutte le categorie tra A4 ed E, mentre sottostimerebbe di molto (>30%) la categoria F.

3.3 - Nella gran parte dei casi, la ristrutturazione energetica si ripaga nel tempo con i minori costi di gestione rispetto ad oggi e con l'incremento di valore degli edifici.

Secondo *l'impact assessment* [31] della revisione 2024 della Direttiva *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD), nella zona climatica dell'Italia basterebbero sussidi del 25% per rendere conveniente la ristrutturazione energetica nella totalità dei casi medi considerati. Peraltro, in considerazione del consistente investimento necessario, è necessaria la disponibilità di capitale per l'investimento iniziale. Questo capitale potrebbe essere reso disponibile sotto forma di prestiti agevolati e garantiti da un fondo revolving alimentato dalle entrate del nuovo sistema europeo di commercio delle emissioni ETS2 che dal 2027 si applicherà ai combustibili per riscaldamento e trasporti su strada. Per non comportare rischi inflattivi, il recepimento della revisione dell'EPBD dovrebbe contenere programmi di lunga durata per avviare in prima istanza la ristrutturazione degli immobili meno efficienti, fornendo sussidi scalari in base al reddito familiare. Le autorevoli analisi in materia svolte a più riprese dalla Banca d'Italia (vedi in particolare i QEF 845 e 860 del 2024 [32][33]) risultano al riguardo particolarmente informative.

3.4 - Le pompe di calore sono l'alternativa più efficiente per il riscaldamento invernale e il raffrescamento estivo.

Le pompe di calore trasferiscono il calore da un mezzo esterno all'edificio (aria ambiente, acqua superficiale o sotterranea, terreno) al suo interno attraverso un ciclo di compressione ed espansione di un fluido frigorifero, con coefficienti di prestazione (COP) tra 3 e 5 kWh termici generati per kWh elettrico utilizzato. In condizioni estive le pompe di calore possono essere riversate per raffrescare l'interno, con COP simili. Il riscaldamento globale sta un poco riducendo le necessità invernali di calore, e sta aumentando di molto le necessità estive di raffrescamento; le pompe di calore sono quindi in grado di offrire una soluzione combinata che sta diventando sempre più necessaria per la situazione climatica di gran parte dell'Italia e di molte parti del mondo per cui si parla di una nuova "povertà di raffrescamento" (*cooling poverty* [34]), ovvero la condizione - acuita dai cambiamenti climatici - in cui famiglie a basso reddito non riescono ad accedere a sistemi di raffreddamento adeguati a causa dei costi energetici.

3.5 - La penetrazione nel mercato delle pompe di calore dipende dal rapporto di prezzo tra energia elettrica e gas naturale.

La diffusione delle pompe di calore (PdC) non dipende dalle condizioni climatiche, come testimonia la prevalenza di PdC nei paesi nordici. L'influenza del rapporto di prezzo tra elettricità e gas è invece molto evidente confrontando i dati nazionali di mercato con il rapporto tra prezzo del kWh elettrico e del kWh di gas naturale. Un rapporto inferiore a 2,5 favorisce le pompe di calore. In Italia, a causa di una politica di prezzo a favore del gas, che impone al kWh elettrico oneri fiscali e parafiscali tre volte più alti rispetto al gas, siamo appena sopra alla soglia di convenienza economica (Fig. 9). Peraltro, la modesta penetrazione delle PdC è dovuta

anche ad altri fattori, prima di tutto la differenza iniziale di costo dell'impianto, la diffusa impreparazione dei termotecnici abituati a installare solo caldaie a gas, e la mancanza di informazione sui vantaggi economici e di altra natura ottenibili nel tempo.

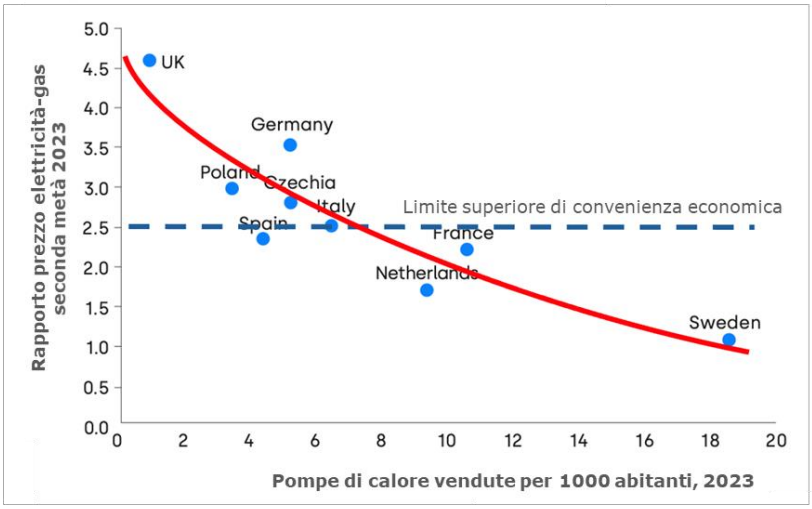


Fig. 9: Influenza del rapporto tra prezzo del kWh di gas naturale e kWh elettrico (periodo di riferimento seconda metà del 2023) sulla vendita di pompe di calore in alcuni paesi europei (elaborazione da grafico del Reform Institute [35] basato su analisi proprie e dati EHPA).

3.6 - L'Italia possiede ottime e innovative capacità industriali nel campo delle pompe di calore e dei sistemi radianti.

La riconversione energetica degli edifici darà lavoro ad un comparto industriale che conta numerose imprese produttrici di pompe di calore, oggi prevalentemente attive nell'esportazione, e ad un innovativo comparto di più piccole imprese produttrici di sistemi radianti a bassa temperatura, ideali per l'accoppiamento più efficiente a pompe di calore sia per riscaldamento invernale, sia per raffrescamento estivo.

3.7 - La lezione del Superbonus deve servire a progettare un diverso sistema di supporto.

Gli errori del 110% sono stati molti, ben analizzati peraltro da rapporti della Banca d'Italia già citati (QEF 860 e QEF 845 [32][33]). Tra i molti, la non-partecipazione economica del destinatario della ristrutturazione ha causato un mancato controllo sui costi, con pesanti conseguenze inflattive e sui conti pubblici. Come già anticipato, per mettere in moto un cantiere di dimensioni nazionali ci vuole elevata capacità amministrativa e politica, definendo un insieme di misure normative (ad esempio il *phase-out* già operativo dei sussidi all'acquisto di caldaie a gas, che dovrà in un periodo di 10-15 anni diventare un *phase-out* del gas dalle abitazioni), accompagnate da incentivi proporzionati al ritorno economico previsto (e al reddito dei proprietari), a incentivi specifici per proprietari e inquilini di immobili in affitto, e ad un sistema di prestiti agevolati e garantiti per mettere a

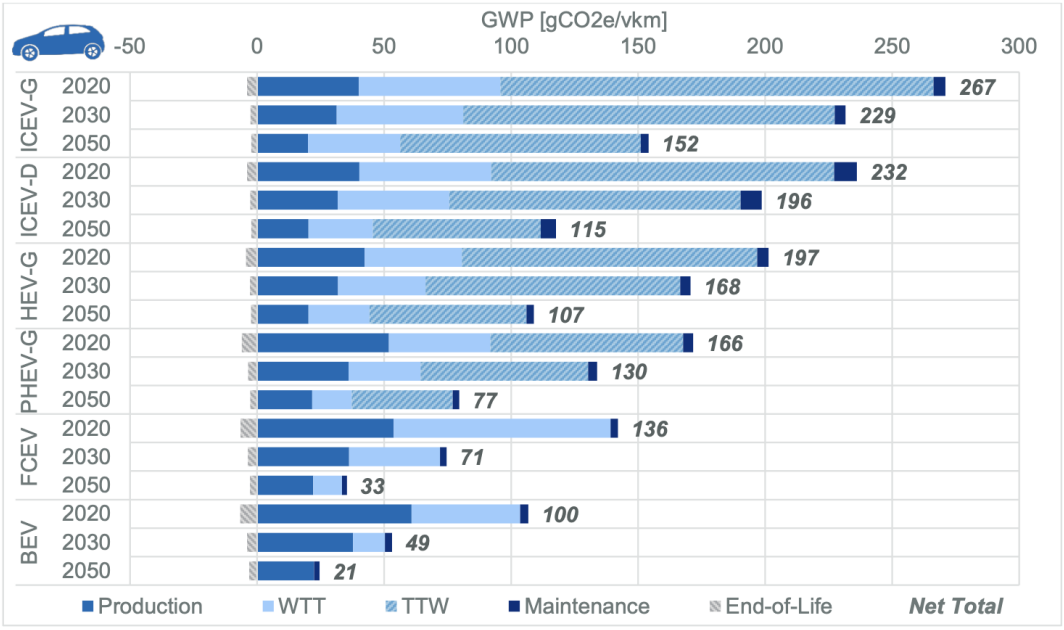
disposizione i capitali d'investimento in modo scaglionato sulla base di un programma di lunga durata e possibilmente stabile.

3.8 - Per decarbonizzare i trasporti occorre intraprendere varie strade.
Non si tratta soltanto di nuove tecnologie, ma anche di provvedimenti e scelte politico-amministrative e di investimenti infrastrutturali per facilitare la mobilità "dolce" o "sostenibile" e la mobilità condivisa, in particolare nelle città e relative aree metropolitane, aumentare l'offerta di servizi pubblici e di servizi di trasporto in generale, spostare dalla gomma al ferro maggiori quantità di trasporto sia di passeggeri sia di merci e ridurre la dipendenza da mezzi di trasporto di proprietà per cui l'Italia è leader in Europa. Ma senza alcun dubbio, al fine dell'uscita dai combustibili fossili, che nei trasporti sono principalmente utilizzati in forma liquida (benzina, gasolio, kerosene, gpl, gnl, combustibili navali), il cambio tecnologico è fondamentale [36].

3.9 - Per le auto, gli autobus, e in prospettiva anche i mezzi pesanti, l'elettrificazione è la strada maestra.
C'è ampia concordanza nella comunità scientifica che l'auto elettrica (BEV, da *battery electric vehicle*) sia la soluzione energeticamente più efficiente (in media con un fattore 4 rispetto alle motorizzazioni tradizionali) e quella che presenta i maggiori vantaggi emissivi nel ciclo di vita, oltre ad abbattere l'inquinamento atmosferico, causa di diverse decine di migliaia di morti precoci ogni anno in Italia. L'auto elettrica ha anche costi di gestione molto inferiori, e le sue prestazioni economiche e ambientali non potranno che migliorare con il progredire delle rinnovabili nella produzione elettrica, e con il galoppante sviluppo tecnologico delle batterie e delle nuove filiere di prodotto. Gli autobus cittadini e i furgoni da ultimo miglio elettrici sono ormai uno standard per le nuove acquisizioni, e lo saranno presto anche per le lunghe percorrenze e per i trasporti pesanti a più lungo raggio.

3.10 - Il vantaggio delle auto elettriche non è solo dovuto alle emissioni, ma ad un bilancio di materia estremamente favorevole sul ciclo di vita.
Sono numerosi gli studi di *Life Cycle Assessment* (LCA), recente quello prodotto da Ricardo plc per conto della Federazione Internazionale dell'Automobile (FIA) [37], che mostrano un netto vantaggio delle BEV relativamente a tutti gli altri tipi di motorizzazione, e come questo vantaggio andrà crescendo negli anni a venire a causa della progressiva decarbonizzazione della produzione di elettricità prevista da leggi sul clima e accordi internazionali (Fig. 10). Anche dal punto di vista dell'estrazione di materia va detto che un'auto a combustione interna che percorre in media 15000 km/anno necessita nella sua vita utile dell'estrazione, lavorazione e trasporto di una quantità di carburante di origine fossile 12-15 volte maggiore del suo peso, producendo oltre all'energia per il moto una quantità molto maggiore di calore di scarto, una massa di 38-45 tonnellate di CO_2, nonché una massa di prodotti di rifiuto (NO_x, PM, ozono, CO, incombusti) che causano inquinamento atmosferico. In confronto, una BEV richiede l'estrazione e il processamento di alcune centinaia di kg di materiali per le batterie che vengono utilizzati per tutta la sua vita utile e poi riciclati.

L'energia elettrica, se fornita da fonti rinnovabili, produce inquinamento ed emissioni soltanto nella fase di produzione e installazione dei macchinari.



Notes: Production = production of raw materials, manufacturing of components and vehicle assembly; WTT = fuel/electricity production cycle; TTW = impacts due to emissions from the vehicle during operational use; Maintenance = impacts from replacement parts and consumables; End-of-Life = impacts/credits from collection, recycling, energy recovery and disposal of vehicles and batteries. GWP = Global Warming Potential.

Fig. 10: Emissioni nel ciclo di vita di automobili (categorie in legenda-Notes) con vari tipi di motorizzazione (ICEV-G= auto a benzina; ICEV-D= auto diesel; HEV-G= auto ibride a benzina; PHEV-G= auto ibride plug-in a benzina; FCEV= auto a idrogeno e celle a combustibile; BEV= auto elettriche), con proiezioni al 2030 e 2050 che tengono conto della legislazione europea in termini di riduzione di emissioni (fonte Rapporto di Ricardo Plc realizzato per la Federazione Internazionale dell'Automobile, 2024 [37]).

3.11 - I vantaggi economici delle auto elettriche aumentano con le lunghe percorrenze e con la possibilità di ricarica domestica.

Già oggi le auto elettriche che percorrono almeno 15000 km/anno e vengono ricaricate a casa possono avere un costo totale di possesso (CTdP, insieme di costi di acquisto, carburante/ricarica, manutenzione, assicurazione, tasse, incentivi, valore residuo) inferiore o uguale a quello di auto tradizionali. Il CTdP continuerà a migliorare con la discesa dei prezzi d'acquisto, l'aumento dell'efficienza in kWh/km, e il vantaggio relativamente a motorizzazioni tradizionali crescerà con l'aumento delle tasse sul carbonio per i combustibili (ETS2 dal 2027). L'Italia si colloca nella fascia alta dei prezzi del kWh alle colonnine di ricarica, tra i più alti d'Europa, secondo i dati dell' European Alternative Fuel Observatory (EAFO) [38], anche a causa delle molte stazioni di ricarica operanti per un piccolissimo parco circolante elettrico. Nelle prossime formulazioni di incentivi, anche considerando che le differenze di prezzo di acquisto delle BEV stanno scendendo significativamente, occorrerebbe puntare anche sulla riduzione del prezzo alla colonnina, portandolo in linea con la media UE.

3.12 - La transizione verso l'auto elettrica è inevitabile: non va contrastata ma facilitata.

La necessità di abbattere le emissioni rende inevitabile questo cambio tecnologico, che presenta vantaggi inequivocabili anche in termini di inquinamento atmosferico e di bilancio di materia. L'extra-costo di acquisto - ormai in discesa - dipende molto dalla dimensione del mercato e verrà presto azzerato. In Norvegia, dove questa transizione è ormai quasi completa, le vendite di BEV sono ormai prossime al 100% del mercato (Fig. 11), pur in assenza di un divieto esplicito di vendita di motorizzazioni tradizionali. Questo successo è frutto di un mix di incentivi fiscali (IVA e tasse di circolazione azzerate) associati ad altre misure come una elevata tassazione sulle auto a combustibili fossili basata sulle emissioni, la gratuità di parcheggi o l'accesso alle corsie riservate ai mezzi pubblici per le auto a zero emissioni, e altri [39]. Questi incentivi sono stati nel tempo progressivamente ridotti con la crescita del mercato e il calo dei prezzi, ma mai in modo brusco. Il successo della transizione sta anche in un costo zonale dell'energia elettrica (tutta rinnovabile) particolarmente basso per la ricarica domestica - soprattutto nelle regioni del Nord e del centro - e alla possibilità di usufruire di tariffe orarie. In Italia al contrario gli incentivi sono sempre stati modesti e frammentati nel tempo – nel 2025 avviati solo durante l'estate e riservati a utenti a basso ISEE residenti in aree metropolitane - e lasciati a decisioni dei singoli comuni per quanto riguarda accessi a ZTL o parcheggi. L'attuale governo ha di fatto boicottato la transizione anche con esplicite dichiarazioni contrarie del Ministro dei trasporti e con pressioni sulla Commissione Europea per cambiare la decisione già presa nel 2023 di porre fine alla immatricolazione di nuove auto a combustione interna nel 2035.

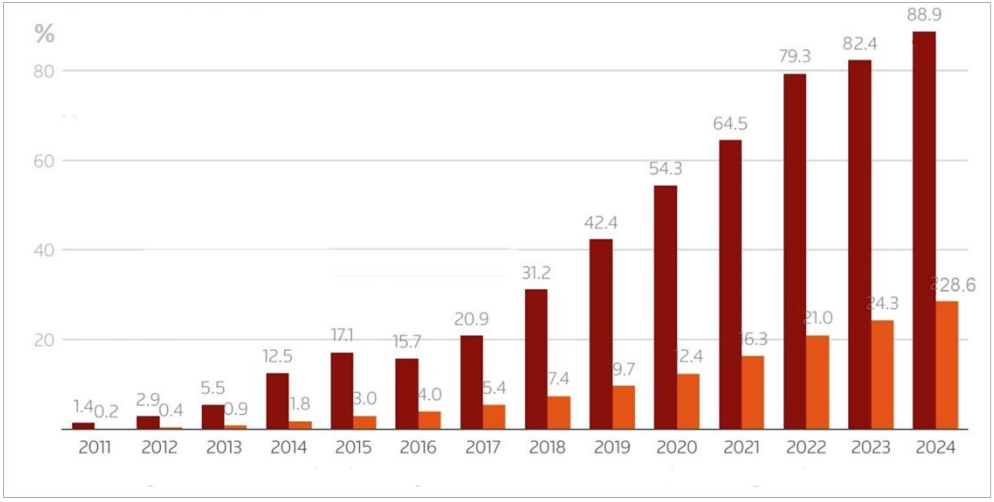


Fig. 11: Percentuale di vendite di auto elettriche in Norvegia dal 2011 al 2024 (barra rosso scuro) rispetto alla percentuale della flotta elettrica circolante della barra arancione (fonte Norwegian Road Federation, Norwegian Public Roads Administration).

3.13 - Idrogeno, biocombustibili e combustibili sintetici non possono competere con l'elettrico.

I *powertrain* elettrici a idrogeno e celle a combustibile, pubblicizzati come capaci di garantire maggiori autonomie e rifornimenti più rapidi, sono stati via via abbandonati dalla maggioranza dei produttori. Presentano infatti una bassa efficienza energetica, di poco superiore alle motorizzazioni tradizionali (Fig. 12) e costi molto superiori, anche per i prezzi ancora elevati dell'idrogeno verde prodotto da elettrolisi dell'acqua e per le necessità di manutenzione. I biocombustibili, e in particolare quelli derivati da produzioni agricole, hanno profili emissivi solitamente elevati. Quelli più sostenibili, derivati da prodotti di scarto, sono globalmente in quantità limitata e non risolvono il problema dell'inquinamento atmosferico. I combustibili sintetici sono ancora di là da venire, avranno secondo le stime costi elevati e anch'essi non risolvono il problema dell'inquinamento atmosferico.

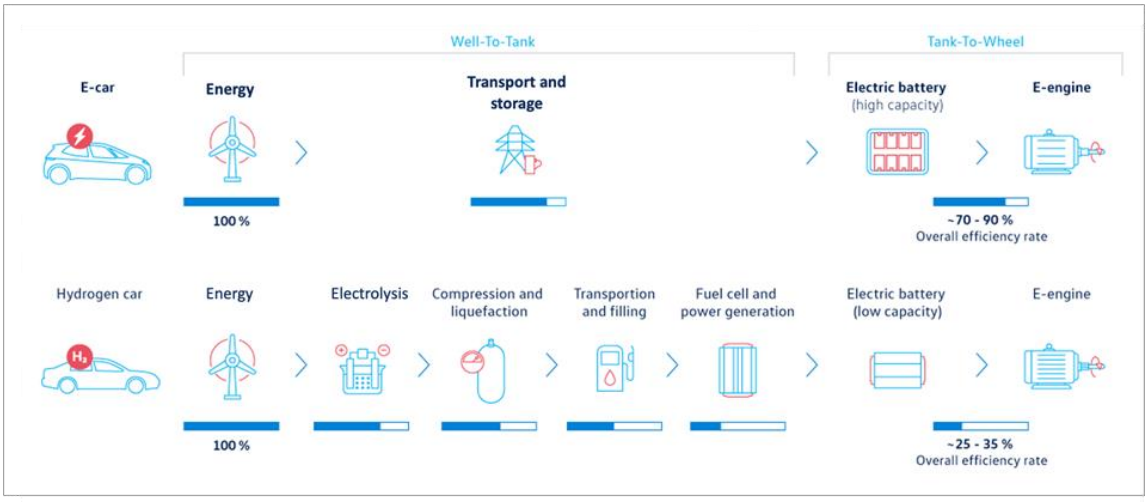


Fig. 12: Confronto tra l'efficienza energetica di un'automobile elettrica e un'auto a idrogeno e cella a combustibile, entrambe alimentate da energia rinnovabile (fonte Volkswagen [40]).

3.14 - Per navi e aerei servono (per ora) combustibili sostenibili.

Biocombustibili sostenibili e combustibili sintetici prodotti senza combustibili fossili dovrebbero essere tutti indirizzati alla produzione di *sustainable aviation fuel* (SAF) e di combustibili navali, dal momento che non esistono al momento possibilità di elettrificazione dei voli commerciali e dei trasporti navali, fatta eccezione per i traghetti su brevi distanze e nel prossimo futuro per voli regionali per i quali si intravedono possibilità di nuove tecnologie elettriche.

3.15 - La decarbonizzazione industriale presenta diverse criticità.

L'aspetto più semplice della decarbonizzazione dell'industria è l'uso di elettricità generata da fonti rinnovabili e di pompe di calore per le necessità di riscaldamento e condizionamento dei luoghi di lavoro. Più complesso è il passaggio a tecnologie elettriche per la generazione di calore a media temperatura, anche se pompe di calore ad alta temperatura sono già

disponibili. La prima vera criticità sta nel fatto che molte imprese industriali in Italia, avendo necessità di energia elettrica e di calore (e alcune anche di refrigerazione), grazie alle politiche favorevoli al gas naturale hanno investito in impianti di cogenerazione (o trigenerazione per produrre anche freddo). Il cambio tecnologico per queste aziende risulta accettabile solo se l'impianto di cogenerazione è stato completamente ammortizzato economicamente o è a fine vita tecnologica. Bisogna quindi aiutare le aziende in transizione con strumenti adatti a sostenere i cambiamenti tecnologici accompagnati da misure che impediscano di restare bloccati (*lock-in*) in processi dipendenti da fonti fossili.

3.16 - Le industrie con processi ad alta temperatura rappresentano una ulteriore criticità.

Ne fanno parte industrie di vario tipo, metallurgiche, chimiche, ceramiche, cementiere, vetrarie e altro. Vengono spesso identificate complessivamente come "difficili da abbattere" (*hard to abate*), ma ognuna ha propri problemi di processo e possibili soluzioni di elettrificazione (Fig. 13, [41]). Secondo diversi studi di questo comparto, con processi elettrificati già oggi si potrebbero rimuovere il 70% delle emissioni dovute ai combustibili fossili, e con processi e tecnologie alternative al 2050 rimarrebbe un residuo del 5-10% da coprire con vettori energetici sintetici liquidi o gassosi, o con idrocarburi e CCS. Il vero ostacolo è quindi il prezzo dell'energia elettrica, di cui si tratta, con le possibili soluzioni, nel capitolo 4.

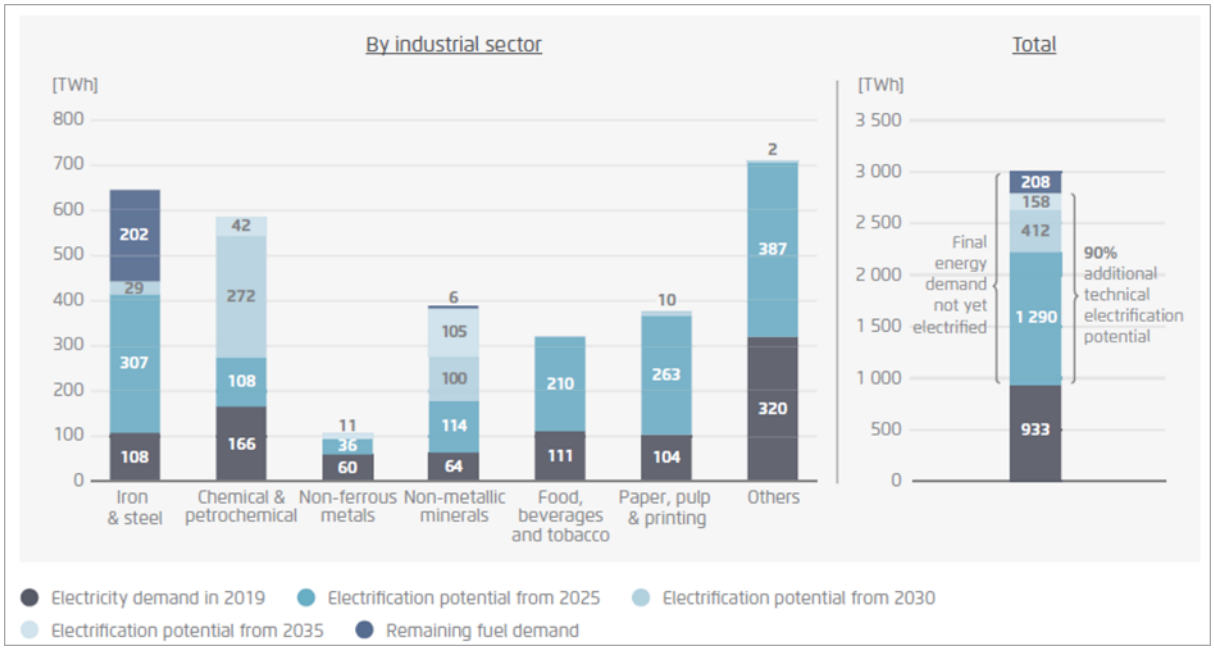


Fig. 13: Potenziale di elettrificazione dell'industria europea per settori (a sinistra) basata sulla domanda energetica del 2019 e sugli sviluppi tecnologici previsti per il 2025, 2030, 2035 (fonte ISI Fraunhofer [41]*). Da questo studio risulta (a destra) che tecnicamente già oggi il 75% circa della domanda potrebbe essere soddisfatta da tecnologie elettrificate.*

3.17 - L'acciaio primario [42] è la maggiore criticità.

L'acciaio primario è prodotto dal minerale di ferro (70% circa della produzione mondiale), ed è necessario per produrre acciai con elevate caratteristiche strutturali. Si tratta di un processo produttivo ad altissime emissioni che avviene in altoforni dove la miscela di minerale pretrattato e carbon coke ad alta temperatura riduce il minerale di ferro alla ghisa grezza (*pig iron*), preparandolo al successivo processo nella fornace basica all'ossigeno dove il suo contenuto di carbonio viene ridotto fino a ottenere la colata di acciaio. L'acciaio secondario è invece prodotto a partire da rottami e residui della lavorazione dell'acciaio primario che vengono fusi in forni ad arco elettrico. Per la presenza nei rottami di impurità, e in particolare di rame, l'acciaio secondario in genere è meno adatto per utilizzi strutturali che necessitano alta resistenza alla deformazione, come per i telai automobilistici. Un processo alternativo di produzione di acciaio primario basato sulla riduzione diretta (*Direct Reduced Iron,* DRI) può essere realizzato con gas naturale e portare con minori emissioni alla produzione di "*sponge iron*" che può essere poi avviato al forno ad arco elettrico per la produzione di acciaio. Numerose sperimentazioni stanno provando a sostituire il metano con l'idrogeno nel cosiddetto HDRI (Fig. 14), processo che potrebbe avere emissioni quasi nulle di gas a effetto serra se l'idrogeno fosse prodotto da elettrolizzatori alimentati con energia rinnovabile. Interessante notare che la gran parte degli altoforni europei sono a fine vita tecnologica, e quindi sarebbe il momento opportuno per scelte tecnologiche alternative senza un ulteriore *lock-in* a combustibili fossili. Purtroppo, l'HDRI presenta costi superiori dovuti soprattutto all'idrogeno verde e alla necessità di minerale ad alto tenore di ferro.

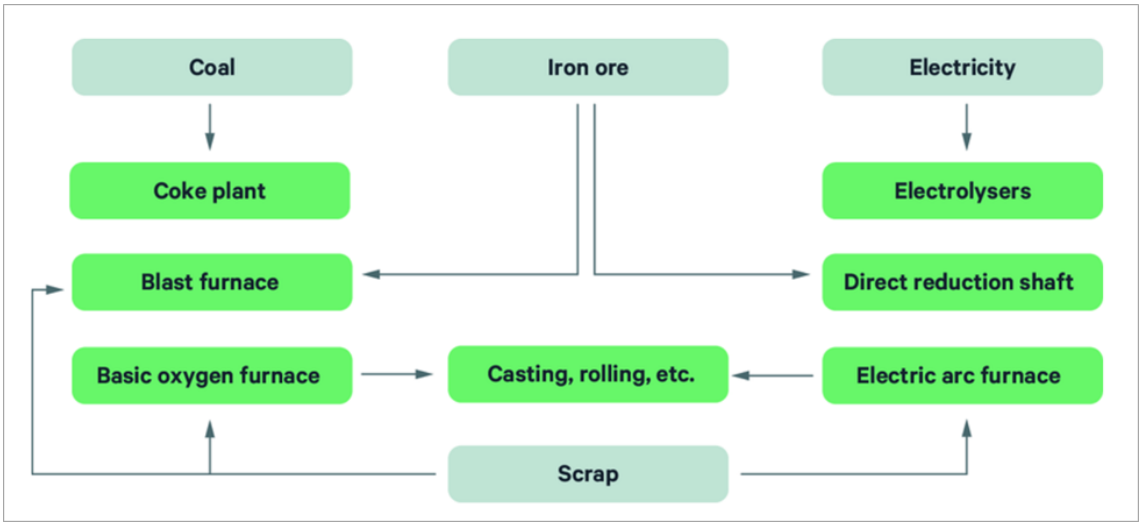


Fig. 14: Confronto tra il processo più diffuso in Europa di produzione di acciaio primario basato su altoforni alimentati da minerale e carbone coke (a sinistra, detto BF-BOF da Blast Furnace - Basic Oxygen Furnace), e l'HDRI-EAF (Hydrogen Direct Reduced Iron - Electric Arc Furnace) a destra. Nel secondo processo, la parte nel forno elettrico può essere separata nel tempo e avvenire in altre installazioni (fonte Maltais et al., 2021 [43]).

3.18 - La chimica è uno scheletro nell'armadio.
La chimica è oggi quasi-completamente basata sul petrolio, e i suoi prodotti, anche quelli solidi come fibre o materie plastiche, in un tempo più o meno lungo finiscono a produrre emissioni o dannosi residui di nano e microplastiche. Da tempo sono in corso ricerche, non sufficientemente supportate da investimenti industriali, sulla chimica verde [44] per produrre gli intermedi di base necessari per l'industria chimica senza utilizzare petrolio o altri combustibili fossili, ma non è ancora stata trovata una soluzione che unisca economicamente la disponibilità di materia prima alla flessibilità produttiva e alla bassa generazione di residui, se non per nicchie di prodotti.

3.19 - Il problema del cemento va affrontato anche con materiali alternativi.
La produzione di cemento, al di là delle emissioni generate dalla fonte energetica necessaria per ottenere l'elevata temperatura di processo, produce emissioni a causa della calcinazione dei carbonati che genera ossidi di calcio a partire da minerale carbonatico, con perdita di CO_2 nel processo. L'aggiunta di sottoprodotti come la loppa di altoforno può significativamente ridurre le emissioni di processo. Esistono in commercio diversi tipi di cemento "verde", che presentano però limitazioni d'uso. Va detto per completezza che i manufatti di cemento hanno la tendenza alla ricarbonatazione, per cui si stima che il 30% circa delle emissioni generate nella produzione siano ridotte nell'esposizione delle superfici o delle macerie all'aria ambiente. La riduzione delle emissioni si dovrà basare sia sul miglioramento delle caratteristiche dei cementi verdi [45], sia anche sulla adozione di materiali di costruzione alternativi, come ad esempio il legno ingegnerizzato, con cui oggi si costruiscono anche palazzi multipiano.

3.20 - CCS, CCU, CCUS [46] sono chimere rischiose e antieconomiche, ma dovranno servire in futuro per generare emissioni negative.
La cattura chimica della CO_2 da effluenti gassosi, come dai camini con concentrazioni superiori al 10%, è un processo chimico consolidato a base di soluzioni acquose di ammine, mentre sono ancora in fase di sviluppo processi capaci di catturare economicamente la CO_2 dall'aria ambiente (DAC, da *Direct Air Capture*), oggi in concentrazione di circa 420 ppm. Peraltro, catturare non vuol dire sequestrare, e senza un sequestro sicuro non c'è modo di eliminare l'anidride carbonica dal ciclo del carbonio ed evitare rischi di incidenti che possono essere molto gravi. Molte ricerche sono state condotte per il riutilizzo di CO_2 catturata (il cosiddetto CCU, *Carbon Capture and Utilization*), per esempio per produrre combustibili sintetici con idrogeno verde, ma il riutilizzo di carbonio, se di origine fossile, crea comunque emissioni climalteranti. Il CCS dovrà essere sviluppato per produrre emissioni negative in futuro (l'IPCC considera oltre al DAC il cosiddetto BECCS, da *BioEnergy with Carbon Capture and Sequestration*), necessarie per ridurre le concentrazioni atmosferiche di CO_2 una volta che le emissioni da combustibili fossili saranno state azzerate, ma la ricerca sui processi di sequestro non ha finora dato risultati industrializzabili.

3.21 - Agricoltura, zootecnia e sistema alimentare: quali prospettive?

Il settore agricolo-alimentare è all'origine di gran parte delle emissioni di N_2O e di CH_4, le prime dovute all'uso di fertilizzanti azotati e le seconde soprattutto all'allevamento di bovini e altri ruminanti. Le due fonti sono interrelate, in quanto i terreni adibiti a pascoli coprono globalmente circa il 70% dei terreni agricoli (Fig. 15), e il 30% rimanente destinato a colture è utilizzato per quasi la metà per la produzione di alimenti per l'allevamento animale (i dati italiani sono diversi per la poca disponibilità di terreni da pascolo e l'elevata importazione di proteine vegetali per i mangimi animali). Risulta pertanto evidente che qualsiasi strategia di riduzione delle emissioni debba considerare un'evoluzione delle diete verso regimi più sani e a minore presenza di prodotti di origine animale. Il cambiamento di abitudini alimentari non è però semplice da ottenere, essendo legato ad aspetti culturali e tradizioni, e al collegamento tra il raggiungimento del benessere economico e il consumo di carne. Più facile da ottenere potrebbe essere la riduzione degli sprechi alimentari, che sono quantificati oggi intorno al 19% del totale del cibo prodotto, di cui più della metà è dovuto all'uso domestico. Azioni di informazione e educazione alimentare dovrebbero essere condotte a partire dalla scuola.

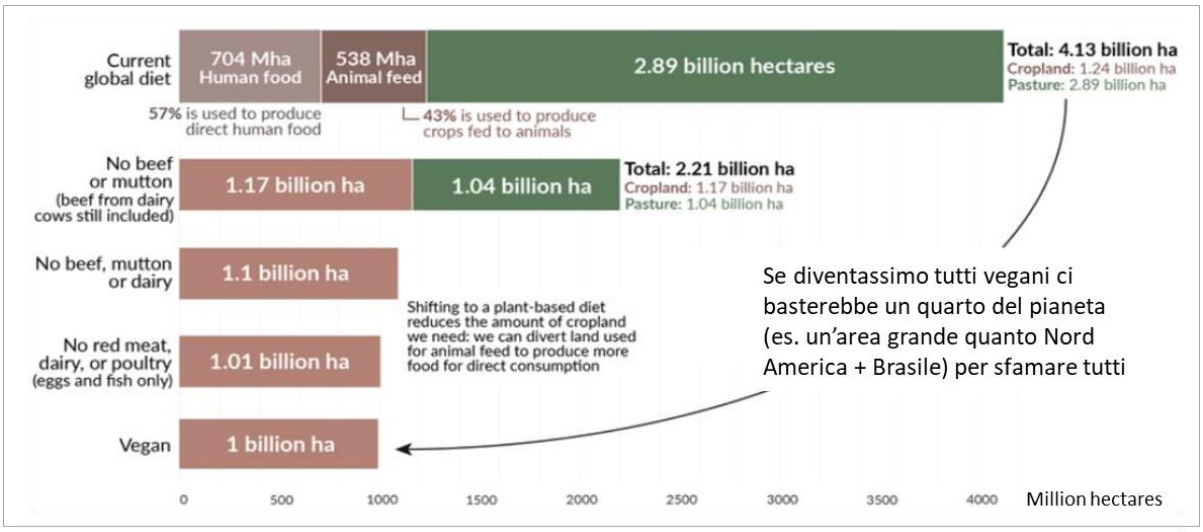


Fig. 15: Nella barra in alto uso odierno del suolo agricolo a livello planetario (pasture=pascolo). Nelle barre sottostanti stime di necessità di territorio agricolo per diete via via più basate su vegetali [47].

3.22 - Sono possibili interventi tecnici per l'abbattimento delle emissioni agricole e zootecniche?

Sono allo studio diversi tipi di misure agronomiche per ridurre le emissioni di N_2O dai terreni. Tecniche di *no-tillage* (non-aratura) possono ridurre queste emissioni ma necessitano di controllo chimico delle infestanti e non sono ambientalmente neutre, per cui sarebbero preferibili tecniche di *minimum-tillage*. Laddove possibile, l'agricoltura di precisione permette un utilizzo più mirato dei nutrienti e quindi minori emissioni. Per le emissioni

di CH_4 durante la ruminazione sono state provate strategie alimentari e altre tecniche per ora poco convincenti, per cui la strategia più coerente, oltre a raccomandare diete a basso uso di carni rosse, sembra quella di ridurre per quanto possibile le altre fonti di emissioni di metano, quali quelle dalla gestione delle deiezioni con recupero di gas biologico. Pur con una penetrazione in Italia dell'8% circa delle aziende agricole che praticano misure biologiche ecocompatibili, e che coprono un significativo 20% della superficie agraria utile, ci si deve peraltro confrontare con una relativamente bassa propensione all'innovazione per la sostenibilità da parte dell'imprenditorialità agricola, stretta tra piccole dimensioni e limitate risorse economiche.

3.23 - Una dieta equilibrata è anche un minor costo per il Sistema Sanitario Nazionale.

L'obesità, molte malattie cardiovascolari, il diabete e alcuni tipi di tumori sono ascrivibili a regimi alimentari squilibrati in quantità e in qualità, con eccessi di proteine animali, grassi e zuccheri. Diete principalmente vegetariane, come ad esempio quella tipica mediterranea, ricca di frutta, verdure, legumi e cereali e con un'ampia varietà, non sono solo più sane, ma presentano un minore impatto emissivo, minori consumi di acqua e migliore impronta ecologica complessiva (Fig. 16). Lo sviluppo di programmi di salute alimentare dovrebbe essere incentivato in ogni possibile contesto sociale.

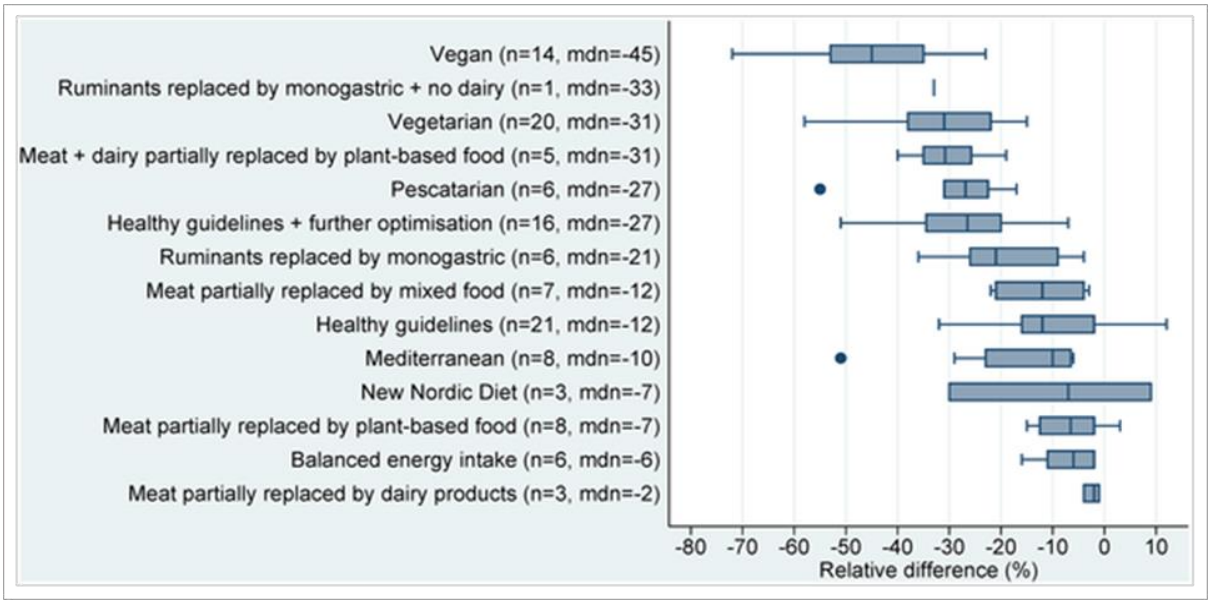


Fig. 16: Differenza relativa (mdn=mediana) nelle emissioni di gas a effetto serra tra una serie di diete più sostenibili e la dieta media corrente [48].

4 - Aspetti normativi, economici e sociali della transizione energetica

4.1 - L'Italia non ha una propria legge sul clima.

L'Italia è uno dei pochi paesi UE, e unica tra i grandi paesi, a non avere una propria legge quadro sul clima. Un tale strumento normativo servirebbe per recepire gli aspetti della *Governance regulation* (EU)2018/1999 [49] - che ha introdotto i Piani Nazionali Energia e Clima (da cui il PNIEC italiano [50]), le *Long-Term Strategies*, il dialogo multilivello con Regioni e Comuni e il quadro di *reporting*. Servirebbe inoltre per recepire la legge europea sul clima [51] del 2021 coi suoi target intermedi al 2030 e di net-zero al 2050 e per definire un quadro finanziario e attuativo multi-annuale a cui ancorare il PNIEC e il Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC, [52]). Infine, nella legge quadro sul clima troverebbero posto programmi di informazione alla cittadinanza e l'istituzione di un gruppo di esperti di alto livello con compiti consultivi, previsionali e di valutazione degli impatti ambientali, economici e sociali dei provvedimenti legislativi che possano aiutare o ostacolare l'azione climatica.

4.2 - Il nuovo PNIEC dell'attuale governo non risponde alle richieste europee, manca di un impianto attuativo, e porta troppo in avanti nel tempo la riduzione delle emissioni nel nostro Paese.

Gli elementi deficitari del nuovo PNIEC, inviato dal governo alla Commissione Europea il 1° luglio 2024, sono molti e diversi [53]. Alcuni riguardano la non conformità con i target europei al 2030, quali l'obiettivo della *Effort Sharing Regulation* (ESR, relativa ai settori non coperti dall'ETS) limitato al -40% invece del -43,5% assegnato all'Italia, emissioni in crescita nei trasporti, mancato calo del gas con ulteriore *lock-in* dovuto a nuovi rigassificatori, valori poco credibili dei pozzi di carbonio dovuti alle foreste e molto altro. Ma soprattutto il PNIEC dovrebbe avere valore di legge, essere accompagnato da un piano di finanziamenti e da una analisi sociale degli impatti necessaria per disegnare una strategia per una transizione giusta. Dovrebbe analizzare le mancanze normative e prevedere le necessarie riforme abilitanti coerenti con gli obiettivi UE, quali il quadro autorizzativo per le rinnovabili, la riforma del mercato elettrico per facilitare la discesa dei prezzi dell'energia elettrica, o il graduale *phase-out* dei combustibili fossili. Similmente, anche il PNACC manca di un impianto attuativo, non prevede finanziamenti e programmi di spesa, e scarica su Regioni e Comuni la pianificazione strategica.

4.3 - Benefici e co-benefici superano i costi della transizione, ma richiedono una gestione proattiva da parte dei governi.

Le politiche regolatorie europee e gli strumenti economici messi in atto per la riduzione delle emissioni si sono dimostrati efficaci, ma necessitano di chiarezza negli obiettivi e nella comunicazione, coordinamento tra diverse politiche e certezza nella sequenza di azioni future. Nell'analisi economica del pacchetto *Fit for 55* realizzata dal CMCC [54], risulta che il riciclo dei proventi delle tasse sul carbonio, se indirizzato in modo appropriato a famiglie bisognose, supporto alle rinnovabili e supporto all'innovazione e

alla riqualificazione professionale nel settore della transizione energetica, sarebbe in grado di generare nuova crescita e occupazione. Tale transizione non può dunque essere fatta dal basso ma richiede un governo che la accompagni con i necessari provvedimenti strutturali e accessori.

4.4 - Benefici e co-benefici superano i costi della transizione, ma non sempre costi e benefici sono distribuiti equamente.

Osservando casi di studio riferiti alla decarbonizzazione delle città, si può osservare che spesso l'ente intitolato a investire può non riuscire a recuperare gli investimenti fatti, così come al contrario altri possono ricevere benefici sproporzionati rispetto ai propri costi (Fig. 17). Questo problema richiede una particolare cura nello studio delle politiche economiche e fiscali di sostegno, incentivo e disincentivo, per progettare politiche di ridistribuzione economicamente e socialmente giuste, mettendo ulteriormente in evidenza la necessità di un governo coerente della transizione.

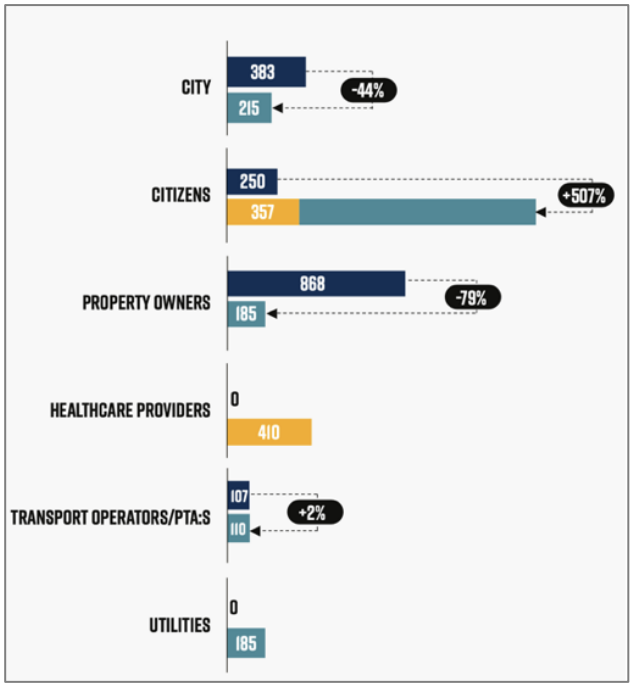


Fig. 17: Caso di studio sui costi di investimento (2020-2030, in blu scuro) per la decarbonizzazione di una città (Orléans, F) e il conseguente ritorno per ciascun settore in termini di benefici (in verde petrolio) e co-benefici (in giallo, 2020-2050). Fonte Material Economics, 2020 [55].

4.5 - La transizione non si fa a colpi di *bonus* elettorali, ma di politiche regolatorie e di incentivazione ben motivate e proporzionate.

La lezione del Superbonus 110% con i suoi pesantissimi effetti sulle finanze pubbliche va studiata attentamente per non essere ripetuta in futuro. I provvedimenti di incentivazione per interventi che con l'aumento dell'efficienza fanno diminuire i costi operativi dovranno in futuro essere sempre basati sulla compartecipazione ai costi, non necessariamente limitati a sconti fiscali o in conto capitale, prevedere nel caso obblighi ben motivati e proporzionali, e graduati sulla base delle capacità economiche. Le necessità della transizione vanno spiegate ai cittadini con campagne

informative e sportelli territoriali di assistenza. Anche i cambiamenti comportamentali sono estremamente importanti, ed è imprescindibile promuovere interventi dal lato della domanda.

4.6 - La transizione energetica genera nuova crescita economica.
La transizione energetica richiede investimenti che generano crescita economica in settori a medio-alto contenuto tecnologico e valore aggiunto, sia nel campo delle tecnologie energetiche, sia nei trasporti elettrificati, sia nei servizi collegati, e agire da traino sulla crescita del livello tecnologico della produzione nazionale. Questa crescita porterà a maggiore occupazione di tecnici e di laureati in discipline STEM (Scienze, TEcnologie e Matematica), che potrà almeno tamponare l'emorragia di laureati che da molti anni prendono la strada dell'emigrazione, contribuendo ad alzare la produttività e i livelli stipendiali, in stagnazione in Italia da quasi 30 anni in termini di potere d'acquisto.

4.7 - La transizione ha costi sociali che possono colpire categorie svantaggiate. Bisogna attuare politiche preventive e proattive al fine di non lasciare indietro nessuno.
Le politiche di sostegno a chi può soffrire gli effetti delle politiche climatiche vanno attuate con fondi sociali legati agli introiti delle tasse sul carbonio, prevedendo primariamente azioni di formazione professionale nelle nuove professioni legate alla transizione energetica, e azioni di supporto alla riconversione produttiva per le aziende. Il Piano Sociale per il Clima da 9,3 Mld € annunciato dal governo all'inizio di agosto 2025 [57], per l'attuazione e il co-finanziamento del 25% dei 7 Mld € previsti per il periodo 2026-2032 per l'Italia dal Fondo Sociale per il Clima dell'UE, sembra ancorato alla logica dei "bonus", facilmente vendibili a scopo elettorale, mancando di una profonda analisi dell'impatto dell'ETS2 e dell'impatto macroeconomico delle misure proposte, di azioni sinergiche e sistemiche e di meccanismi strutturanti capaci di contribuire alla transizione energetica e non solo di compensare economicamente le famiglie più bisognose [57]. Ad esempio, invece di compensare economicamente le famiglie più povere per l'aumento dei costi di carburante per la propria auto inquinante, potrebbe essere strutturalmente più efficace prevedere meccanismi di leasing sociale per nuove auto elettriche non inquinanti.

4.8 - La transizione deve essere giusta.
Una transizione giusta deve esserlo dal punto di vista della distribuzione di costi e benefici (e co-benefici), e dal punto di vista procedurale con il coinvolgimento dei cittadini. Va affrontata e superata la divergenza tra l'urgenza della transizione e la necessità di coinvolgere territori e comunità. Il dialogo deve essere istituzionalizzato e mediato da esperti, in un quadro in cui tutti gli attori devono essere consapevoli della necessità della transizione e del contributo che ogni territorio deve fornire, pur con capacità differenti, al quadro complessivo. Il passaggio a prezzi zonali dell'elettricità può essere uno stimolo per le comunità regionali e locali per accettare sul proprio territorio l'installazione di rinnovabili contribuendo agli obiettivi di decarbonizzazione e facendo scendere i prezzi locali dell'elettricità.

4.9 - La moderazione nei consumi ha effetti ecologici e sociali positivi.
Una strategia di sufficienza energetica, di sobrietà, può essere importante per creare una cultura del rispetto che contemperi i bisogni della società umana e la salute del pianeta. Non si tratta di promuovere la decrescita ma una crescita equilibrata del benessere che tenga in considerazione non soltanto lo sviluppo economico ma più in generale la qualità della vita e delle relazioni sociali.

4.10 - In una transizione fortemente basata sull'elettrificazione, gli aspetti economici e sociali sono facilitati da bassi costi dell'energia elettrica.
Il calo del prezzo dell'energia elettrica non è più rinviabile. Ne va della tenuta finanziaria delle famiglie e della competitività del nostro apparato produttivo. A questo scopo vanno rapidamente aumentate le rinnovabili e gli stoccaggi riducendo la dipendenza dal gas (Fig. 18), vanno generalizzati nuovi tipi contrattuali (PPA, CfD) per valorizzare al meglio i bassi costi delle rinnovabili e si deve transitare più rapidamente ai prezzi zonali non calmierati e ai prezzi orari. Si devono inoltre superare le vischiosità burocratiche delle Comunità Energetiche Rinnovabili, con una revisione delle regole del mercato elettrico che facilitino e semplifichino la possibilità di condivisione dell'energia tra autoproduttori e consumatori situati al di sotto della stessa cabina secondaria, prevedendo meccanismi semplificati secondo cui la quota di energia condivisa sia scorporata a priori e non rientri fra le voci oggetto di fornitura da parte dei venditori terzi. È anche necessario, per favorire la transizione energetica, ridurre gli oneri fiscali e parafiscali che gravano sulla bolletta elettrica, prima di tutto trasferendo sui combustibili fossili la componente ASOS (Accantonamento Sostegno Oneri di Sistema), relativa al sostegno delle energie rinnovabili ed alla cogenerazione, in quanto non ha senso che il supporto alle rinnovabili sia pagato dall'elettricità, già oggi al 50% circa rinnovabile.

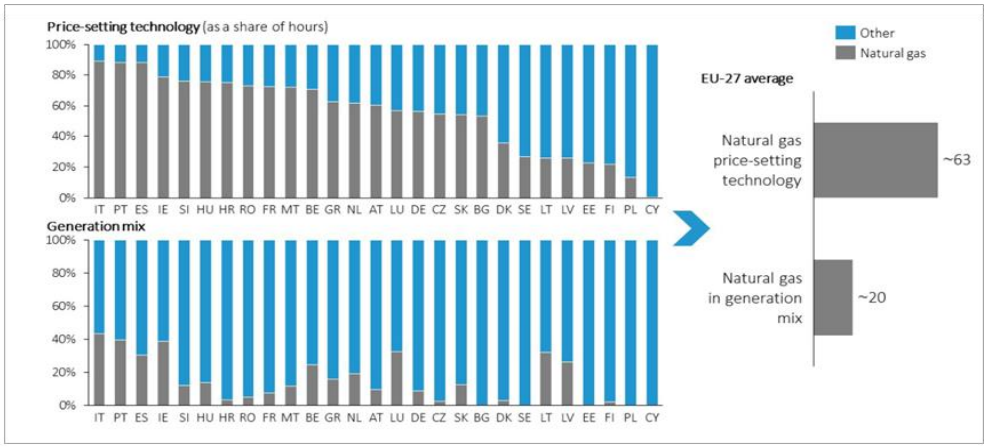


Fig. 18: Percentuale di ore in cui il prezzo dell'energia elettrica dipende dal prezzo della generazione a gas nei paesi UE, e corrispondente presenza del gas nel mix energetico (dal Rapporto Draghi, 2024 [58], su dati Eurostat elaborati dal Centro Comune di Ricerca della Commissione Europea – JRC, 2023).

4.11 - È necessario portare a termine positivamente la discussione sulla proposta di revisione della Direttiva europea sulla tassazione dell'energia.

Di tutte le proposte del Green Deal, questa è la sola a non essere ancora giunta alla fase di accordo politico e di adozione. Si tratta di una tessera molto importante del mosaico di provvedimenti necessari per accompagnare e realizzare in modo ordinato la transizione energetica. Il carico fiscale deve essere più correlato alle emissioni per facilitare le scelte verso le rinnovabili, con la necessaria progressività e accompagnato da azioni di informazione e comunicazione e da misure sociali adeguate. Per l'Italia si tratta anche di mettere ordine nella selva di accise e altre componenti parafiscali che compongono voci talvolta oscure delle bollette, nonché eliminare progressivamente i sussidi ambientalmente dannosi.

4.12 - Serve una comunicazione corretta e responsabile. La transizione energetica sarà più facile e rapida se partecipata da cittadini consapevoli.

Non si parla abbastanza del riscaldamento globale e dei conseguenti cambiamenti climatici, e quando se ne parla nei media non si spiegano le cause, non si nominano i responsabili, non si parla delle soluzioni, e in particolare della necessità della transizione energetica [59]. I cambiamenti climatici sono presentati come la causa dei problemi, non come l'effetto di 250 anni di uso di combustibili fossili. La comunicazione sul tema è in costante peggioramento, ed è in crescita lo spazio per opinioni contrarie che puntano su costi eccessivi, sulla revisione di tempi e obiettivi definiti "ideologici", sul rilancio di opzioni nucleari molto di là da venire, ma anche su vero e proprio negazionismo antiscientifico. Occorre ribaltare questa tendenza creando nuove alleanze tra scienza, media e portatori di interesse collettivo e fare leva su una comunicazione inclusiva. Si deve presentare la transizione energetica non solo come necessaria e non rimandabile, ma in quanto porta benefici tangibili e desiderabili. E per essere desiderabile, la transizione deve essere socialmente giusta, centrata su persone e comunità, oltre che informare correttamente e coinvolgere attivamente i cittadini.

Bibliografia

[1] Il sito *skepticalscience.com* contiene dettagliate risposte a tutte le domande sul riscaldamento globale e i cambiamenti climatici.

[2] Forster, P. M., Smith, C., Walsh, T., Lamb, W. F., Lamboll, R., Cassou, C., Hauser, M., Hausfather, Z., Lee, J.-Y., Palmer, M. D., von Schuckmann, K., Slangen, A. B. A., Szopa, S., Trewin, B., Yun, J., Gillett, N. P., Jenkins, S., Matthews, H. D., Raghavan, K., Ribes, A., Rogelj, J., Rosen, D., Zhang, X., Allen, M., Aleluia Reis, L., Andrew, R. M., Betts, R. A., Borger, A., Broersma, J. A., Burgess, S. N., Cheng, L., Friedlingstein, P., Domingues, C. M., Gambarini, M., Gasser, T., Gütschow, J., Ishii, M., Kadow, C., Kennedy, J., Killick, R. E., Krummel, P. B., Liné, A., Monselesan, D. P., Morice, C., Mühle, J., Naik, V., Peters, G. P., Pirani, A., Pongratz, J., Minx, J. C., Rigby, M., Rohde, R., Savita, A., Seneviratne, S. I., Thorne, P., Wells, C., Western, L. M., van der Werf, G. R., Wijffels, S. E., Masson-Delmotte, V., and Zhai, P. (2025). Indicators of Global Climate Change 2024: annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence, Earth Syst. Sci. Data, 17, 2641–2680, https://doi.org/10.5194/essd-17-2641-2025

[3] Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Li, H., Luijkx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Arneth, A., Arora, V., Bates, N. R., Becker, M., Bellouin, N., Berghoff, C. F., Bittig, H. C., Bopp, L., Cadule, P., Campbell, K., Chamberlain, M. A., Chandra, N., Chevallier, F., Chini, L. P., Colligan, T., Decayeux, J., Djeutchouang, L. M., Dou, X., Duran Rojas, C., Enyo, K., Evans, W., Fay, A. R., Feely, R. A., Ford, D. J., Foster, A., Gasser, T., Gehlen, M., Gkritzalis, T., Grassi, G., Gregor, L., Gruber, N., Gürses, Ö., Harris, I., Hefner, M., Heinke, J., Hurtt, G. C., Iida, Y., Ilyina, T., Jacobson, A. R., Jain, A. K., Jarníková, T., Jersild, A., Jiang, F., Jin, Z., Kato, E., Keeling, R. F., Klein Goldewijk, K., Knauer, J., Korsbakken, J. I., Lan, X., Lauvset, S. K., Lefèvre, N., Liu, Z., Liu, J., Ma, L., Maksyutov, S., Marland, G., Mayot, N., McGuire, P. C., Metzl, N., Monacci, N. M., Morgan, E. J., Nakaoka, S.-I., Neill, C., Niwa, Y., Nützel, T., Olivier, L., Ono, T., Palmer, P. I., Pierrot, D., Qin, Z., Resplandy, L., Roobaert, A., Rosan, T. M., Rödenbeck, C., Schwinger, J., Smallman, T. L., Smith, S. M., Sospedra-Alfonso, R., Steinhoff, T., Sun, Q., Sutton, A. J., Séférian, R., Takao, S., Tatebe, H., Tian, H., Tilbrook, B., Torres, O., Tourigny, E., Tsujino, H., Tubiello, F., van der Werf, G., Wanninkhof, R., Wang, X., Yang, D., Yang, X., Yu, Z., Yuan, W., Yue, X., Zaehle, S., Zeng, N., and Zeng, J. (2025). Global Carbon Budget 2024, Earth Syst. Sci. Data, 17, 965–1039, https://doi.org/10.5194/essd-17-965-2025

[4] COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT IMPACT ASSESSMENT Accompanying the document COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS Stepping up Europe's 2030 climate ambition Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people, SWD/2020/176 final. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52020SC0176

[5] I Rapporti dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) sono tutti scaricabili dal sito https://www.ipcc.ch/reports/

[6] IPCC: Climate Change 2022 - Impacts, adaptation and vulnerability, https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/

[7] https://www.terna.it/it/media/comunicati-stampa/dettaglio/consumi-elettrici-2024#:~:text=Secondo%20le%20rilevazioni%20di%20Terna%2C%20considerando%20tutte%20le%20fonti%20rinnovabili,29%25)%20rispetto%20al%202023

[8] ISPRA (2024). Inventario nazionale delle emissioni in atmosfera 1990-2022. https://www.isprambiente.gov.it/it/istituto-informa/comunicati-stampa/anno-2024/emissioni-di-gas-serra-trend-in-diminuzione

[9] https://flowcharts.llnl.gov/commodities/energy

[10] https://www.100x100rinnovabili.net/wp-content/uploads/2025/03/Report-Verso-la-neutralita-climatica_100x100-rinnovabili-network.pdf

[11] https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/programmazione-territoriale-efficiente/piano-sviluppo-rete

[12] https://www.mase.gov.it/portale/documents/d/guest/lts_gennaio_2021-pdf .
[13] Pastore, L. M., de Santoli, L., (2025). 100% renewable energy Italy: A vision to achieve full energy system decarbonisation by 2050. Energy 317, 13 p. - ISSN 0360-5442. - https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134749
[14] Gaeta, M., Nsangwe Businge, C., Gelmini, A. (2022). Achieving Net Zero Emissions in Italy by 2050: Challenges and Opportunities. *Energies 15(1)*,46. https://doi.org/10.3390/en15010046
[15] Decreto legislativo n. 190 del 25 novembre 2024 (Testo unico sulle rinnovabili). https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2024/12/12/24G00205/sg
[16] Grassi, G., Stehfest, E., Rogelj, J. *et al.* (2021). Critical adjustment of land mitigation pathways for assessing countries' climate progress. *Nat. Clim. Chang.* 11, 425–434. https://doi.org/10.1038/s41558-021-01033-6
[17] https://climadat.isprambiente.it/dati-e-indicatori/indicatori-di-impatto-dei-cambiamenti-climatici/incendi-boschivi/
[18] https://data.jrc.ec.europa.eu/collection/id-00138
[19] Luigi Spedini (SBS Solar srl). Presentazione all'incontro di studio organizzato da Energia per l'Italia il 13 maggio 2025 presso l'Università di Parma. https://www.energiaperlitalia.it/wp-content/uploads/2025/05/Spedini-13-mag-2025Parma.pdf
[20] TERNA, Rapporto mensile sul sistema elettrico, dicembre 2024, https://download.terna.it/terna/Rapporto_Mensile_Dicembre_24_8dd358635ce3ac2.pdf
[21] https://www.greenreport.it/news/nuove-energie/56889-eolico-gli-antagonisti-del-mugello-arroccati-nel-paesaggio-fossile
[22] https://www.siemensgamesa.com/global/en/home/explore/journal/united-by-the-sea-how-people-came-together-to-build-france-first-floating-wind-farm.html#:~:text=Off%20the%20coast%20of%20Port,kind%20in%20the%20Mediterranean%20Sea
[23] https://windeurope.org/news/europe-not-yet-reaping-the-benefits-of-repowering-old-wind-farms/
[24] The advanced and waste biofuel paradox (2024). Transport & Environment, https://www.transportenvironment.org/uploads/files/202407_TE_advanced_biofuels_report-2.pdf
[25] https://eavor.com/technology/
[26] https://geothermal.org/our-impact/blog/new-opportunities-and-applications-closed-loop-geothermal-energy-systems
[27] https://www.f-geo.it/progetto-pangea/
[28] https://www.rse-web.it/wp-content/uploads/2025/07/libro_cer_pdf_def.pdf
[29] https://siape.enea.it
[30] https://www.bancaditalia.it/pubblicazioni/qef/2024-0850/QEF_850_24.pdf
[31] https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/daf643a4-5da2-11ec-9c6c-01aa75ed71a1/language-en
[32] https://www.bancaditalia.it/pubblicazioni/qef/2024-0845/QEF_845_24_ITA.pdf
[33] https://www.bancaditalia.it/pubblicazioni/qef/2024-0860/QEF_860_24.pdf
[34] Mazzone, A., De Cian, E., Falchetta, G. *et al.* (2023). Understanding systemic cooling poverty. *Nat Sustain* 6, 1533–1541. https://doi.org/10.1038/s41893-023-01221-6
[35] https://ireform.eu/s/uploads/European_Heat_Pump_Policies_Ranking_Reform_Institute_report.pdf
[36] https://www.mit.gov.it/nfsmitgov/files/media/notizia/2022-09/STEMI_Decarbonizzare%20i%20trasporti_ITA.pdf
[37] https://www.fiaregion1.com/wp-content/uploads/2024/09/Final-report_Environmental-Sustainability-and-Energy-Efficiency-of-EVs_03-Sep-2024.pdf
[38] https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/consumer-portal/electric-vehicle-recharging-prices
[39] https://elbil.no/english/norwegian-ev-policy/

[40] https://modo.volkswagengroup.it/en/lab/fuel-cells-or-batteries-for-the-cars-of-the-future
[41] https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/a3e17b7f-1c91-444e-86a6-7b4880c0bf57/content
[42] https://eu.bellona.org/publication/net-zero-pathways-for-european-steel/
[43] Maltais A. et al., (2021). What does it take to achieve net zero? Opportunities and barriers in the steel, cement, agriculture, and oil and gas sectors. DOI:10.13140/RG.2.2.26788.60801
[44] https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acssuschemeng.7b03505
[45] https://iea.blob.core.windows.net/assets/6633c3f9-2fdc-473b-a472-e2e91cba85ba/BreakthroughAgendaReport2024.pdf
[46] https://www.energiaperlitalia.it/wp-content/uploads/2025/05/Bertucco-Bologna-2025.05.20-.pdf
[47] Poore, J., & Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, 360(6392), 987-992.
[48] Aleksandrowicz et al. (2016). The Impacts of Dietary Change on Greenhouse Gas Emissions, Land Use, Water Use, and Health: A Systematic Review, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165797
[49] https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/governance-energy-union-and-climate-action_en
[50] https://www.mase.gov.it/portale/documents/d/guest/pniec_2024_revfin_01072024-pdf
[51] https://eur-lex.europa.eu/IT/legal-content/summary/european-climate-law.html
[52] https://www.mase.gov.it/portale/-/clima-approvato-il-piano-nazionale-di-adattamento-ai-cambiamenti-climatici
[53] https://eccoclimate.org/it/pniec-2/
[54] Bosello F., Carraro C., Di Bella A., Key R., Parrado R., Standardi G., Tavoni M. (2023). Verso una crescita a zero emissioni: Gli impatti macroeconomici e occupazionali per l'Italia del pacchetto "Fit for 55". DOI: https://doi.org/10.25424/cmcc-y6jz-nq49
[55] https://materialeconomics.com/sites/default/files/2024-06/eit-climate-kic-healthy-clean-cities-understanding-the-economic-case-for-decarbonising-cities.pdf
[56] https://www.mase.gov.it/portale/-/clima-pichetto-con-il-piano-sociale-da-9-3-miliardi-sosteniamo-famiglie-e-imprese-nella-transizione.-un-italia-piu-giusta-piu-forte-piu-sostenibile-?p_l_back_url=%2Fportale%2Fweb%2Fguest%2Fcomunicati-stampa
[57] https://eccoclimate.org/it/sistema-ets2-e-fondo-sociale-per-il-clima-cosa-sono-e-perche-servono-per-una-transizione-equa-e-giusta/
[58] https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/draghi-report_en
[59] https://www.greenpeace.org/static/planet4-italy-stateless/2025/04/142a3047-report-media-e-clima_anno-2024.pdf