Carlo Villante

ENERGIA E FUTURO?

Necessità e opportunità della transizione energetica, tra fonti rinnovabili e mobilità sostenibile

Prefazione di Giacomo Grassi

FrancoAngeli



I lettori che desiderano informarsi sui libri e le riviste da noi pubblicati
possono consultare il nostro sito Internet: *www.francoangeli.it* e iscriversi nella home page
al servizio “Informatemi” per ricevere via e.mail le segnalazioni delle novità.

Carlo Villante

ENERGIA E FUTURO?

Necessità e opportunità della transizione energetica, tra fonti rinnovabili e mobilità sostenibile

Prefazione di Giacomo Grassi

FrancoAngeli

L’autore dichiara che, nella fase di stesura del presente volume,
non ha utilizzato strumenti di IA generativa.

In copertina: Elaborazione grafica di Laura Villante.

Isbn e-book: 9788835198420

Copyright © 2026 by FrancoAngeli s.r.l., Milano, Italy.

L’opera, comprese tutte le sue parti, è tutelata dalla legge sul diritto d’autore.
Sono riservati i diritti per Text and Data Mining (TDM), AI training e tutte le tecnologie simili.
L’Utente nel momento in cui effettua il download dell’opera accetta tutte le condizioni della licenza
d’uso dell’opera previste e comunicate sul sito www.francoangeli.it.

Gli eventuali link attivi e QR code inseriti nel volume sono forniti dall’autore. L’editore non si assume
alcuna responsabilità sui link attivi e QR code ivi contenuti che rimandano a siti
non appartenenti a FrancoAngeli.

Ai miei figli, Gabriele e Laura,

e alla loro generazione, alla quale è affidata la responsabilità di rendere il nostro mondo un luogo in cui l'innovazione sia in armonia con la natura e l'energia sostenibile alimenti lo sviluppo.

Possiate guardare al futuro con maggiore coraggio, saggezza, passione e sensibilità, costruendo un domani più luminoso e più sostenibile per tutti.

Carlo Villante

Indice

Prefazione, di *Giacomo Grassi* Pag. 11

Premessa » 15

Parte Prima - Capire la transizione energetica

Sviluppo sostenibile » 21
- Sviluppo sostenibile » 28

I sistemi energetici » 29
Fonti di energia » 30
Vettori energetici » 31
Sistemi di accumulo » 32
Usi finali dell'energia » 33
- Sistemi energetici » 35

Dipendenza energetica » 37
Il petrolio » 38
Il gas naturale » 38
Il carbone » 39
- Dipendenza energetica » 41

Esauribilità delle risorse » 43
Petrolio » 44
Gas naturale » 45
Carbone » 45
- Esauribilità delle fonti energetiche » 47

Effetto serra Pag. 49
- Effetto serra » 54

Cambiamento climatico » 55
- Cambiamento climatico » 59

Emissioni di gas serra » 61
Popolazione: crescita e trasformazioni demografiche » 62
Sviluppo economico: crescita e disuguaglianze » 63
Efficienza energetica: progressi e limiti » 63
Intensità carbonica: la vera sfida » 64
Una prospettiva globale » 64
- L'identità di Kaya e le politiche di decarbonizzazione » 66

Le politiche climatiche » 67
Il Protocollo di Kyoto: limiti e criticità » 67
L'Accordo di Parigi: un nuovo paradigma » 68
- Percorsi di decarbonizzazione » 71

Transizione energetica » 73
- Transizione energetica » 76

Inquinamento atmosferico » 77
Inquinanti primari » 78
Inquinanti secondari » 78
Qualità dell'aria e salute » 78
- Impatti ambientali a piccola scala spazio-temporale » 81

Conclusione » 83

Parte Seconda – Le fonti di energia sostenibili

Fonti sostenibili » 87
Caratteristiche delle fonti energetiche sostenibili » 89
Energia solare » 91
Energia eolica » 92
Energia idroelettrica » 93
Energia da biomasse e altre fonti » 94
Energia geotermica » 94
Energia nucleare » 95

- Fonti energetiche sostenibili Pag. 96

Energia solare » 97
La radiazione solare » 98
Le tecnologie fotovoltaiche » 99
L'energia solare termica » 103
Il solare termodinamico » 104
Prospettive future del settore » 105
- Energia solare: tecnologie e applicazioni » 106

Energia eolica » 107
- L'energia del vento » 113

Energia idraulica » 115
Energia idraulica da bacini fluviali » 115
L'energia del mare » 118
- Energia idroelettrica » 119

Biomasse e biocombustibili » 121
- Biomasse, biofuel ed e-fuels » 124

Energia geotermica » 125
- Energia geotermica » 128

Energia nucleare » 129
- Energia nucleare » 133

Vettori e accumuli energetici » 135
Biocarburanti: continuità con il sistema attuale » 136
E-fuels: combustibili sintetici » 136
Il problema dell'accumulo » 136
L'idrogeno » 137
- Scelta sostenibile dei vettori energetici » 138

Conclusione » 139

Parte Terza – La mobilità sostenibile

Mobilità sostenibile » 145
- Sfide della mobilità sostenibile » 148

Prestazioni veicolari Pag. 149
Energia per la trazione » 149
Energia e progettazione dei veicoli » 151
➢ Energia e potenza nei veicoli » 153

Veicoli termici convenzionali » 155
Motori ad accensione comandata » 156
Motori ad accensione spontanea » 157
➢ I motori a combustione interna e i loro impatti locali e globali » 158

Combustibili alternativi per veicoli termici » 159
Metano » 159
Gas di petrolio liquefatti: GPL » 161
Idrogeno » 161
Biocombustibili » 162
➢ Carburanti alternativi per i motori a combustione interna » 163

Elettrificazione del veicolo » 165
➢ Elettrificazione dei veicoli » 168

Veicoli a idrogeno » 169
➢ Veicoli elettrici a celle a combustibile (FCEV) » 172

Veicoli elettrici » 173
➢ Veicoli elettrici a batteria (BEV) » 176

Veicoli ibridi » 177
➢ Veicoli ibridi elettrici (HEV) » 180

Conclusione » 181

Considerazioni finali » 185

Prefazione

di Giacomo Grassi[1]

A che punto siamo con la sfida climatica?

Una parte del quadro è nota. Il riscaldamento globale ha ormai raggiunto quasi 1.5 °C rispetto all'epoca preindustriale, gli ultimi 10 anni sono stati i più caldi mai registrati e la temperatura sale oggi più in fretta che in passato, di oltre 0.2 °C per decennio. Meno noto è che una parte consistente dell'anidride carbonica (CO_2) emessa dall'uomo resta in atmosfera per secoli, e che il clima risponde alla quantità accumulata nel tempo, non a quella emessa in un singolo anno. È uno dei risultati più solidi della scienza del clima, e ha due conseguenze. La prima è che il caldo di oggi è l'eredità delle emissioni di ieri, e che la temperatura smetterà di salire solo quando le emissioni nette di CO_2 di origine umana arriveranno a zero. La seconda è che il livello a cui si fermerà dipende dalle scelte di oggi.

Qui sta anche una buona notizia. Sapere che il cambiamento climatico è causato dall'uomo può generare ansia o sensi di colpa, eppure significa che non siamo passeggeri inermi di un'auto destinata a schiantarsi. Il volante è nelle nostre mani: possiamo ancora sterzare e limitare di molto i danni futuri.

Queste conoscenze sono raccolte nei rapporti dell'IPCC, il Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico delle Nazioni Unite. Centinaia di scienziati esaminano migliaia di studi e ne dichiarano le incertezze, e i governi approvano riga per riga le sintesi finali. L'IPCC non dice ai governi che cosa fare. Le scelte spettano alla politica e, in ultima analisi, ai cittadini, che per scegliere hanno bisogno di un quadro chiaro. Che cosa significa, allora, sterzare?

[1] Giacomo Grassi lavora al Joint Research Centre della Commissione europea, dove si occupa di cambiamenti climatici, foreste ed energia. È membro eletto del Bureau dell'IPCC Task Force sugli inventari nazionali di gas serra.

Le opinioni espresse sono esclusivamente quelle dell'autore e non possono in alcun caso essere considerate come posizione ufficiale della Commissione europea o dell'IPCC.

Circa tre quarti delle emissioni di gas serra derivano dall'uso dei combustibili fossili. Affrontare il problema climatico significa quindi, prima di tutto, cambiare il modo in cui produciamo e consumiamo l'energia: elettrificare i consumi, alimentarli con fonti a basse emissioni, investire in accumuli e in reti più flessibili.

Questo libro entra nel merito tecnico di questo cambiamento. Uno dei fili conduttori utilizzati è l'identità di Kaya, che scompone le emissioni in quattro fattori, cioè popolazione, reddito pro capite, energia per unità di prodotto, emissioni per unità di energia. Se popolazione e reddito crescono, ed è auspicabile che il reddito cresca, la riduzione deve venire dagli altri due fattori. L'elettrificazione agisce su entrambi. Dei dieci euro di benzina che mettiamo nel serbatoio, circa otto si disperdono in calore; un'auto elettrica o una pompa di calore alimentate da fonti rinnovabili tagliano le emissioni e, per lo stesso servizio, consumano circa tre volte meno energia.

Se il quadro è così chiaro, perché dopo 30 anni di studi e di negoziati la CO_2 in atmosfera continua a salire? Molti ne deducono che non si sia fatto nulla, ma è un errore di percezione. Le emissioni globali sono probabilmente vicine al picco, ma il sistema ha molta inerzia: finché le emissioni restano sopra lo zero, la concentrazione cresce anche quando le emissioni rallentano. Eppure, per ogni euro investito nei combustibili fossili, oltre due vanno oggi all'energia pulita, e nel 2025, per la prima volta, la crescita della domanda elettrica mondiale è stata coperta interamente da fonti pulite. L'Unione europea ha ridotto le proprie emissioni di oltre un terzo rispetto al 1990, mentre la sua economia cresceva di circa due terzi. Con l'Accordo di Parigi del 2015, quasi tutti i Paesi del mondo si sono impegnati a dotarsi di obiettivi di riduzione delle emissioni, da aggiornare periodicamente. Anche per questo gli scenari climatici peggiori sono oggi meno probabili di 15 anni fa. La transizione è iniziata, e ragioni fisiche, economiche e geopolitiche la rendono difficile da fermare. Procede però ancora troppo lentamente.

Nel dibattito pubblico, intanto, ogni tecnologia rischia di diventare una bandiera. Sapere che cos'è un fattore di capacità, perché un accumulo giornaliero è diverso da uno stagionale, come si confrontano i costi di fonti diverse: sono conoscenze che proteggono dagli slogan, in un senso e nell'altro, ed è qui che questo libro offre il suo contributo più utile.

Resta un ultimo pregiudizio, quello che vede nella transizione soprattutto un sacrificio. Non a caso il sottotitolo del libro parla di necessità, ma anche di opportunità. Oltre che indispensabile per il clima e utile alla qualità dell'aria, accelerare la transizione può contribuire ad abbassare nel tempo il costo dell'energia e a investire in innovazione e competitività. Per chi im-

porta quasi tutto il gas e il petrolio che consuma, è una questione cruciale di autonomia. Il primo cambiamento da compiere è quindi nella nostra testa: capire che la transizione energetica è sempre più una politica economica e di sicurezza, oltre che ambientale. Se vogliamo controllare il nostro futuro, qualunque sia il futuro che abbiamo in mente, dobbiamo prima controllare la nostra energia.

Premessa

Viviamo in un'epoca in cui l'energia, per lungo tempo percepita come una risorsa disponibile e relativamente stabile, è tornata al centro del dibattito pubblico, politico e scientifico. Non si tratta solo di una questione tecnica o economica: l'energia è oggi una chiave di lettura fondamentale per comprendere le trasformazioni profonde che stanno attraversando le nostre società. Le crisi energetiche, le tensioni geopolitiche, l'urgenza climatica e l'accelerazione dell'innovazione tecnologica stanno convergendo in un unico grande processo: la transizione energetica.

Questo è il contesto in cui nasce questo libro, con una convinzione semplice ma potente: per affrontare il futuro è necessario comprendere il presente. Tuttavia, comprendere il sistema energetico contemporaneo non è un compito immediato. Si tratta infatti di un sistema complesso, caratterizzato da molteplici dimensioni intrecciate tra loro: scienza, tecnologia, economia, ambiente, politica e società. Ridurre questa complessità a una visione semplificata rischia di produrre interpretazioni distorte; al contrario, affrontarla senza strumenti adeguati può risultare scoraggiante.

L'obiettivo di questo lavoro è colmare proprio questo spazio: offrire una guida rigorosa ma accessibile, capace di accompagnare il lettore in un percorso di comprensione graduale. Non si tratta di un manuale specialistico né di una narrazione puramente divulgativa. L'ambizione è piuttosto quella di costruire un ponte tra conoscenza tecnica e consapevolezza diffusa, restituendo al lettore gli strumenti necessari per orientarsi in un panorama in continua evoluzione.

La struttura del libro riflette questa impostazione. Il percorso si sviluppa a partire dai concetti fondamentali come sviluppo sostenibile, sistemi energetici, risorse, emissioni, per poi approfondire le diverse tecnologie e le loro implicazioni. In questo modo, ogni tema viene inserito in un quadro più ampio, evitando di considerare le singole soluzioni in modo isolato. La transizione energetica, infatti, non è la somma di innovazioni tecnologiche indi-

pendenti, ma una trasformazione sistemica che coinvolge l'intero modello di sviluppo. Un aspetto centrale che emerge attraverso tutto il testo è la natura intrinsecamente interdisciplinare dell'energia. Le scelte energetiche non riguardano solo l'efficienza o le prestazioni, ma implicano sempre compromessi tra obiettivi diversi: sicurezza degli approvvigionamenti, sostenibilità ambientale, accessibilità economica. Questi aspetti non possono essere affrontati simultaneamente senza generare tensioni, e comprendere tali tensioni è essenziale per interpretare le politiche energetiche e le strategie industriali.

In questo contesto, il cambiamento climatico rappresenta una delle sfide più rilevanti e urgenti. La crescente concentrazione di gas serra in atmosfera, legata in larga misura all'utilizzo di combustibili fossili, impone una revisione profonda dei sistemi energetici. Tuttavia, la decarbonizzazione non può essere vista come un semplice processo di sostituzione tecnologica. Essa richiede una trasformazione profonda che riguarda non solo le fonti di energia, ma anche i vettori (le modalità di trasporto ed accumulo dell'energia), gli usi finali e i comportamenti individuali e collettivi.

Un altro elemento chiave è rappresentato dal ruolo dell'innovazione tecnologica. Negli ultimi decenni, lo sviluppo delle energie rinnovabili, dei sistemi di accumulo, dei nuovi vettori energetici e delle tecnologie digitali ha aperto prospettive prima impensabili. Tuttavia, la tecnologia da sola non è sufficiente. La sua efficacia dipende dal contesto in cui viene applicata: infrastrutture, politiche, modelli di consumo e accettabilità sociale giocano un ruolo altrettanto determinante.

Nel trattare i temi sopra introdotti emergerà presto un tema ricorrente: quello dei limiti. Limiti fisici, legati alle leggi della natura; limiti tecnologici, legati allo stato dell'arte; limiti economici e sociali, legati alle condizioni reali di implementazione. Spesso, il dibattito pubblico tende a trascurare questi vincoli, enfatizzando soluzioni universali che nella pratica si rivelano parziali o contestuali. Comprendere questi limiti però non significa ridurre le nostre ambizioni, ma renderle più realistiche, proponendo soluzioni più efficaci.

Allo stesso modo, emergerà con forza l'idea che non esista una soluzione unica. Il sistema energetico del futuro sarà caratterizzato dalla coesistenza di tecnologie diverse, ciascuna con un ruolo specifico. Energie rinnovabili, sistemi di accumulo, vettori chimici, elettrificazione e innovazioni nei modelli di consumo costituiranno un mosaico complesso, in cui l'integrazione sarà più importante della competizione tra soluzioni.

Infine, questo libro vuole anche essere un invito alla responsabilità individuale e collettiva. Le scelte energetiche, infatti, da questo punto di vista non sono affatto neutre: influenzano il modo in cui viviamo, produciamo e ci muoviamo. Sebbene molte decisioni siano prese a livello istituzionale o

industriale, anche i comportamenti individuali hanno un ruolo significativo. Comprendere l'energia significa quindi acquisire una maggiore consapevolezza del proprio rapporto con il mondo. La transizione energetica non è d'altronde un processo lineare né privo di contraddizioni. È un percorso complesso, fatto di progressi e arretramenti, di innovazioni e resistenze, di opportunità e rischi. Proprio per questo, è necessario affrontarlo con strumenti adeguati, evitando sia l'ottimismo ingenuo sia il pessimismo paralizzante.

Il libro affronta tutte queste tematiche attraverso un approccio progressivo, organizzato in 26 capitoli, ciascuno dedicato a un tema specifico. Particolare attenzione è stata dedicata al linguaggio. L'esperienza maturata in oltre 30 anni di attività didattica universitaria ha evidenziato quanto sia importante trovare un equilibrio tra rigore scientifico e chiarezza espositiva. Concetti complessi non devono essere banalizzati, ma possono essere spiegati in modo semplice se viene costruito il giusto percorso logico. In questo senso, il libro si propone di rendere accessibili contenuti tecnici senza rinunciare alla precisione.

Ogni capitolo è concepito come un'unità autonoma, ma al tempo stesso integrata in un percorso complessivo. L'obiettivo è consentire una lettura flessibile, mantenendo tuttavia una coerenza sistemica. Ogni capitolo è completato da una scheda infografica di sintesi ed approfondimento tecnico.

Queste sintesi visive accompagnano il testo con una funzione non decorativa, ma didattica: facilitare la comprensione di concetti complessi attraverso rappresentazioni immediate. Esse possono anche fare da ponte, per chi fosse interessato, per un approfondimento ulteriore, molto più tecnico. A questo fine si segnala la disponibilità di un testo universitario redatto dall'autore sugli stessi temi per CRC Press - Taylor & Francis dal titolo *Transition to Sustainable Energy Technologies*, scaricabile liberamente in Open Access nella sua edizione digitale.

Parte Prima
Capire la transizione energetica