



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

A.A. 2024/2025

Sessione di Laurea Novembre 2025

**Analisi di mercato del settore
fotovoltaico: dinamiche, trend e
prospettive di sviluppo**

Relatrice:

Prof. ssa. Laura Abrardi

Candidato:

Matteo Piccinno

Indice

1	Introduzione	7
2	Il contesto di mercato	10
2.1	Evoluzione storica	10
2.2	Trend attuale	12
2.3	Panoramica a livello mondiale e nazionale	13
2.4	Caratteristiche del mercato	14
2.4.1	Crescita esponenziale e scalabilità	14
2.4.2	Stagionalità e variabilità della produzione	15
2.4.3	Elevata sostenibilità ambientale	15
2.4.4	Produzione energetica decentralizzata	15
2.4.5	Elevata dipendenza da incentivi	16
2.4.6	Alta competitività e dinamiche globali	16
2.5	Tendenze future	16
3	Analisi della domanda	19
3.1	Segmentazione della domanda di mercato	19
3.1.1	Segmentazione per tipologia dell'impianto	20
3.1.2	Segmentazione per dimensione dell'impianto	22
3.1.3	Segmentazione per modalità di utilizzo dell'energia	23
3.1.4	Segmentazione per modello di business	24
3.2	Comportamento e preferenze dei consumatori	25
3.2.1	Comportamento del consumatore secondo la Conjoint Analysis	25
3.2.2	Comportamento del consumatore secondo la Cluster Analysis	26
3.3	Fattori che influenzano la domanda	28
3.3.1	Fattori economici	28
3.3.2	Fattori tecnologici	29
3.3.3	Fattori normativi	29
3.3.4	Fattori ambientali	30
3.3.5	Fattori geografici	30
3.4	Dipendenza della domanda dal prezzo	31
3.5	Previsioni di crescita della domanda	33

3.6	Beni sostituti o complementari	35
3.6.1	Principali beni complementari nel settore fotovoltaico	36
3.6.2	Principali beni sostituti del settore fotovoltaico	37
4	Analisi dell'offerta	39
4.1	Catena del valore	39
4.1.1	Fasi upstream	39
4.1.2	Fasi midstream	41
4.1.3	Fasi downstream	43
4.2	Attori principali	45
4.2.1	Attori principali fasi upstream	45
4.2.2	Attori principali fasi midstream	47
4.2.3	Attori principali fasi downstream	48
4.3	Struttura dei costi	49
4.3.1	Costi di fornitura	50
4.3.2	Costi di installazione	50
4.3.3	Costi di progettazione	51
4.3.4	Costi accessori e finanziari	51
4.3.5	Costi di gestione e manutenzione	52
4.4	Barriere all'ingresso del settore fotovoltaico	52
4.4.1	Barriere all'ingresso di tipo economico-finanziario	53
4.4.2	Barriere all'ingresso di tipo tecnologico	54
4.4.3	Barriere all'ingresso di tipo normativo	55
4.4.4	Barriere all'ingresso legate all'approvvigionamento	55
4.4.5	Barriere all'ingresso legate alla reputazione	56
4.5	Innovazioni tecnologiche principali	56
4.5.1	L'impatto della perovskite nella produzione delle celle	56
4.5.2	Moduli trasparenti, semitrasparenti e flessibili	57
4.5.3	Industrializzazione dei processi	58
4.5.4	Riduzione dei materiali critici, riciclo ed economia circolare	58
5	Analisi economico-finanziaria del settore fotovoltaico	60
5.1	Dimensioni del mercato e quote del mercato fotovoltaico	60
5.2	Tipologie di concorrenza e strategie di prezzo	64
5.2.1	Area della produzione di moduli e componenti fotovoltaici	64
5.2.2	Area dell'installazione e dei servizi	64
5.2.3	Area della produzione e della vendita di energia	65
5.3	Marginalità e redditività delle imprese	66

5.3.1	Performance delle principali aziende globali	67
5.3.2	Performance principali in Europa	67
5.3.3	Conclusioni dell'analisi	68
6	Regolamentazione e fattori esterni impattanti sul settore fotovoltaico	72
6.1	Normative e regolamentazione	72
6.1.1	Quadro normativo a livello globale	72
6.1.2	Quadro normativo a livello nazionale	73
6.2	Politiche governative e incentivi	74
6.2.1	Quadro internazionale delle politiche di sostegno	74
6.2.2	Il sistema italiano	75
6.2.3	Limiti e prospettive future del fotovoltaico in Italia	76
6.3	Impatto ambientale e sostenibilità	77
6.3.1	Fasi di produzione	77
6.3.2	Fase operativa	78
6.3.3	Fine vita e riciclo	78
6.3.4	Prospettive future	78
7	Conclusioni	80

Introduzione

Analizzando il contesto geopolitico e ambientale mondiale degli ultimi decenni, con particolare attenzione al giorno d'oggi, risulta evidente che il sistema economico produttivo globale sia stato profondamente modificato da due concetti strettamente connessi tra di loro: transizione energetica e sostenibilità ambientale. La crescente consapevolezza dei rischi legati al cambiamento climatico e la necessità di ridurre la dipendenza dalle fonti energetiche non rinnovabili hanno infatti contribuito a porre lo sviluppo delle energie rinnovabili al centro del dibattito energetico concernente le strategie future per lo sviluppo sostenibile. Parallelamente a ciò, le frequenti tensioni geopolitiche che incidono sull'approvvigionamento energetico causando forte volatilità dei prezzi hanno reso sempre più evidente quanto per un Paese sia fondamentale possedere una base di risorse energetiche sicura, pulita e soprattutto sempre accessibile. In questo scenario, il settore fotovoltaico si è presto affermato come una delle fonti energetiche alternative pilastri della nuova economia energetica. In brevissimo tempo, infatti, l'energia solare è passata da soluzione marginale a componente strategica dei sistemi energetici moderni, grazie al continuo progresso tecnologico, alla riduzione dei costi di produzione e alla crescente attenzione dei governi e dei cittadini verso la sostenibilità ambientale. Catalizzatore di questa grande crescita è stata sicuramente la grande attenzione che gli enti statali hanno dimostrato e continuano a dimostrare verso questa nuova soluzione: a livello comunitario, ad esempio, l'Unione Europea, attraverso provvedimenti come il Green Deal ha fissato obiettivi ambiziosi riguardanti la decarbonizzazione dei processi industriali e l'aumento della quota rinnovabile all'interno del mix di risorse energetiche dei Paesi membri, delineando così una situazione nella quale il fotovoltaico riveste un ruolo centrale. Sulla falsa riga delle norme comunitarie, l'Italia ha ulteriormente rafforzato il ruolo del fotovoltaico attraverso percorsi volti all'aumento della capacità installata e dell'efficienza, anche grazie a sovvenzioni economiche derivanti da iniziative con il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) e il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR). In questo contesto, quindi, analizzare il settore fotovoltaico è un'operazione complessa, che racchiude al suo interno, oltre alle classiche dinamiche tipiche di un settore industriale, anche alcune delle sfide principali dell'industria contemporanea, come la transizione verso un modello produttivo basato sulla sostenibilità ambientale e sulla riduzione delle emissioni di CO₂.

Lo scopo del presente elaborato è, quindi, quello mettere in evidenza le principali dinamiche strutturali, economiche e normative del settore fotovoltaico, nonché le sue prospettive di crescita nel medio-lungo periodo in una situazione globale di grande cambiamento e di transizione energetica, nel quale riveste un ruolo di grande importanza strategica. Per raggiungere l'obiettivo si utilizzerà un approccio integrato, nel quale si coniugheranno tutti i diversi aspetti che caratterizzano il mercato, per poi, riunire il tutto in una visione generale che permetterà di avere un quadro completo della situazione dinamica del settore fotovoltaico.

A livello strutturale, l'elaborato è composto da una prima sezione nella quale si tratterà in modo generale il contesto di mercato del fotovoltaico, a partire da brevi cenni storici riguardanti la scoperta dei principi alla base del funzionamento della tecnologia, per poi passare all'evoluzione storica che ha attraversato fino ai giorni nostri, dove verrà fornita una panoramica della situazione attuale, nonché delle principali tendenze attuali a livello tecnologico e di diffusione. Successivamente, nel secondo capitolo il focus verterà sull'analisi della domanda, a cominciare dalle varie segmentazioni di mercato, con le quali verranno enunciate le varie tipologie di consumatori e le loro preferenze a seconda del criterio selezionato, per poi scendere nel contesto delle dinamiche che regolano questo lato del mercato, ossia i vari fattori che lo influenzano e la variazione rispetto al prezzo. Il capitolo si concluderà con una sezione incentrata sulla previsione di crescita della domanda e con una panoramica dei beni complementari e sostituti del settore, che costituiscono degli importanti fattori influenzanti per la domanda di adesione alla tecnologia fotovoltaica. Il terzo capitolo riguarderà, invece, il lato dell'offerta di mercato, con una iniziale panoramica sulla catena del valore del settore, nella quale verranno descritte tutte le varie fasi che portano dall'approvvigionamento della materia prima fino all'installazione dell'impianto e alla produzione di energia. Questa parte sarà inoltre la base per enunciare i principali attori che operano nel mercato fotovoltaico a seconda dei vari step della filiera nei quali sono impegnati, per spostare l'attenzione sulla struttura dell'offerta, con una sezione dedicata alla struttura dei costi e alle barriere all'ingresso che regolano le dinamiche del settore, allontanandolo da una ideale situazione di concorrenza perfetta. Infine, dopo aver trattato le principali innovazioni dal punto di vista tecnologico che influenzano fortemente l'andamento dell'offerta, si cambierà sezione, passando ad una nuova dedicata all'analisi economico-finanziaria, nella quale la trattazione si concentrerà sui fattori quantitativi, partendo dalla dimensione e dalle quote di mercato del fotovoltaico, per poi passare alle dinamiche di concorrenza e decisione del prezzo e, infine, all'analisi della marginalità nonché della redditività delle principali aziende del settore, sia globale che italiane. Per concludere, l'ultimo capitolo fornirà una panoramica sulla regolamentazione e sul sistema di incentivi che gli enti governativi e non utilizzano per mantenere alta la domanda di adesione alla tecnologia fotovoltaica. In particolare, la trattazione verrà strutturata in diverse sezioni riguardanti il contesto normativo prima globale e poi prettamente europeo e, infine, italiano. L'ultima parte del capitolo si occuperà, infine, dell'impatto ambientale della

tecnologia fotovoltaica in tutte le fasi della filiera, con particolare attenzione alla fase di smaltimento, dato che le prime grandi installazioni fotovoltaiche si avvicinano alla fine del ciclo vita, per cui la quantità di rifiuti di origine fotovoltaica subirà una crescita esponenziale.

Il contesto di mercato

2.1 Evoluzione storica

A livello storico, la nascita del settore fotovoltaico viene fatta coincidere con la scoperta dell'effetto fotovoltaico, ad opera di Alexandre Edmond Becquerel e datata 1839. L'intuizione di Becquerel fu quella di capire che alcuni materiali, se esposti alla luce solare erano in grado di generare corrente elettrica. A livello particellare, ciò avviene quando la luce solare colpisce un materiale semiconduttore (ad esempio il silicio) e le sue particelle (fotoni) colpendo la superficie del materiale, trasferiscono energia agli elettroni delle particelle di esso, portandoli nello stato eccitato e creando così un flusso di elettroni, ossia la definizione di corrente elettrica. A partire da questa scoperta vennero create le prime celle a funzionamento fotovoltaico, tra le quali spiccò quella prodotta nel 1883 dal fisico statunitense Charles Fritts, il quale fu il primo ad utilizzare il silicio come materiale semiconduttore da esporre alla luce solare, una scelta che è ancora centrale anche in moltissimi modelli attuali. Dopo questi eventi, le ricerche sull'effetto fotovoltaico e le sue possibili applicazioni divennero sempre più concrete tanto che nel 1921 Albert Einstein ottenne il premio Nobel proprio per le sue ricerche sull'effetto fotoelettrico e, nel 1941 il fisico statunitense Russel Ohl creò la prima "solar cell", un meccanismo in grado di convertire direttamente l'energia solare in elettricità. Da qui il passo verso la realizzazione del primo impianto totalmente fotovoltaico fu breve: questo venne infatti realizzato nel 1954 nei Bell Laboratories, negli USA, dai fisici Chapin, Fuller e Pearson. Questo impianto, in grado di produrre un Watt di potenza attraverso una cella di silicio, spianò la strada all'utilizzo dell'energia elettrica di natura solare per alcune applicazioni che in precedenza sembravano utopistiche: infatti, nel 1958 la Nasa lanciò in orbita una sonda spaziale alimentata a celle fotovoltaiche, che rimase in orbita auto alimentandosi fino al 1964. Tuttavia, solo a metà degli anni '70 si comprese il reale potenziale che questa forma di energia poteva avere: l'evento scatenante che portò a volgere l'attenzione verso forme energetiche alternative fu la crisi del settore petrolifero del 1973, dovuta alla guerra dello Yom Kippur, per la quale l'OPEC alzò fortemente i prezzi del petrolio ai paesi occidentali che, quindi, dovettero affrontare una fase di austerità sull'industria, che per non essere fortemente penalizzata dal problema del risparmio energetico doveva essere sostenuta da fonti

alternative. Sulla falsa riga di questo periodo, negli anni 80 e 90 si cercò di implementare nuove tecnologie basate sul principio del fotovoltaico, ma ci si fermò principalmente ad applicazioni che supportano impianti isolati non collegati alla rete elettrica nazionale (off-grid). La vera fase di espansione, però, si ebbe a partire dagli anni 2000, nei quali i progressi tecnologici resero l'installazione degli impianti sostenibile dal punto di vista economico ma anche la sensibilità alle tematiche ambientali cominciò a ritagliarsi un ruolo di spicco nel dibattito pubblico, tanto da portare i governi dei principali Stati a promulgare leggi volte a favorire politiche di incentivo verso le energie rinnovabili. Questo trend esplose definitivamente del decennio successivo: tra il 2010 e il 2020, infatti, la capacità installata globale diventò quasi venti volte maggiore, passando da 40 GW a oltre 700 GW (International Energy Agency (IEA) 2023a), con un incremento medio annuo del 30%. Parallelamente a ciò, il costo di produzione dei vari moduli di conversione dell'energia da solare ad elettrica videro un crollo dei prezzi (Figura 2.1), passando da 1,5 USD/W nel 2010 a meno di 0,3 USD/W nel 2020 (International Renewable Energy Agency (IRENA) 2024b). Questi numeri, favoriti principalmente dal massiccio ingresso del mercato della Cina sia come produttore di celle che installatore portarono alla fine del decennio ad una grande crescita nella competitività del mercato fotovoltaico nella comparazione con altre fonti energetiche primarie molto più utilizzate, in primis le fonti fossili. In Italia la tecnologia fotovoltaica arrivò nei primi anni '90, e precisamente nel 1992, quando il governo allora in carica istituì degli incentivi per la produzione di energia da fonti rinnovabili, tra le quali venne incluso il fotovoltaico. Un'ulteriore spinta verso la diffusione arrivò nel 2005 attraverso il "Conto Energia", un sistema che forniva un incentivo economico a seconda della quantità energetica prodotta (il primo conto energia ricompensava gli investitori con 0,50€ per kWh prodotto dall'impianto).

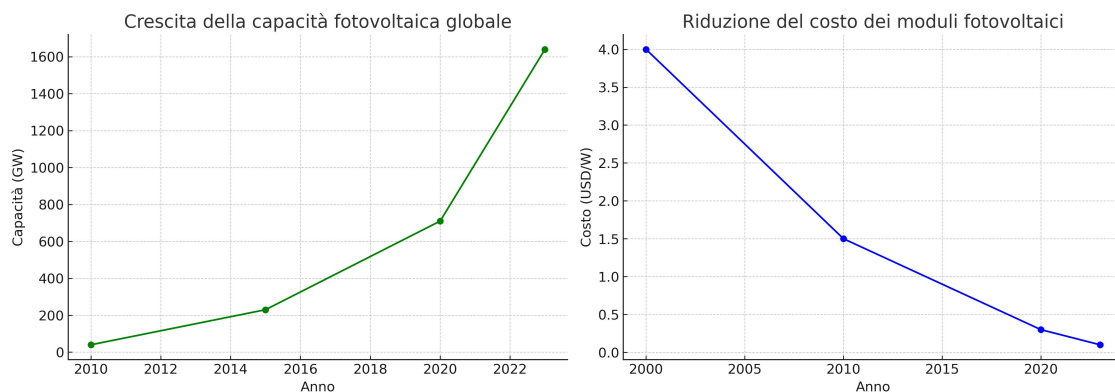


Figura 2.1: dei trend di crescita di capacità fotovoltaica installata e di riduzione del costo dei moduli fotovoltaici

Fonte: International Renewable Energy Agency (IRENA) 2024b

2.2 Trend attuale

Dal 2020 in poi, la tecnologia fotovoltaica ha continuato ad evolversi facendo grossi passi avanti e portando sia a notevoli miglioramenti delle soluzioni già presenti (l'efficienza delle celle in silicio cristallino viene portata ad un valore maggiore del 22%) che a numerose nuove applicazioni ad alta efficienza nell'ambito dell'impiantistica, che utilizzano tecniche rivoluzionarie capaci di dare un enorme miglioramento alle performance dell'impianto. Tra queste, le principali sono:

- Celle TOPCon : acronimo di Tunnel Oxide Passivated Contact, sono delle celle che migliorano l'efficienza dell'impianto grazie ad uno strato di ossido che riduce la perdita degli elettroni impedendo ad essi di ricombinarsi, e un contatto passivato che aumenta la conduzione di corrente, facilitando il passaggio attraverso il circuito e generando quindi più elettricità.

- Celle HJT: acronimo di Heterojunction with Intrinsic Thin-layer, rappresentano un'innovazione per il materiale utilizzato, composto da uno strato sottile di silicio amorfo (a-Si) depositato ai lati del classico strato di silicio cristallino (c-Si) sempre utilizzato. A fronte di un funzionamento identico rispetto alle classiche celle, quelle di tipo HJT consentono di avere un importante miglioramento delle prestazioni in condizione di scarsa illuminazione (passivazione superficiale garantita dal silicio amorfo), di lavorare a basse temperature e soprattutto di rendere il materiale più durevole rispetto a quello tradizionale.

- Celle IBC: acronimo di Interdigitated Back Contact sono delle soluzioni di celle solari in cui i contatti elettrici, generalmente presenti sia nel lato anteriore che in quello posteriore, sono invece traslati interamente al lato posteriore. Questo cambiamento di design consente di avere un miglioramento delle prestazioni sia quantitativamente che qualitativamente rispetto alle celle tradizionali, dovuto all'aumento della superficie di captazione della luce solare e quindi ad una migliore conversione fotovoltaica.

- Celle in perovskite: in queste celle il materiale di captazione della luce solare non è il silicio come nelle celle tradizionali, bensì la perovskite, un materiale sintetico con una specifica struttura cristallina, che assorbe i fotoni della luce solare, eccitando gli elettroni al suo interno. L'energia dei fotoni assorbiti fa sì che gli elettroni saltino ad un livello energetico superiore, creando delle coppie di elettroni e cariche positive (anche dette lacune) che vengono trasportati verso elettrodi separati creando una corrente elettrica. Una volta raggiunti gli elettrodi, gli elettroni e le lacune vengono convogliati in un circuito, generando quindi elettricità. La perovskite, tendenzialmente meno costosa del silicio, è considerata migliore sia dal punto di vista prestazionale che da quello pratico (molto più flessibile, consente quindi soluzioni maggiori).

- Moduli bifrontali: a differenza dei moduli tradizionali, con questa soluzione si genera energia su entrambe le facciate, sia per captazione diretta su quella esposta alla luce solare, che attraverso la riflessione del terreno per quella non esposta al sole. Fondamentale per far esprimere al meglio il potenziale dei moduli bifrontali è tener conto di diversi aspetti come la riflettività del

terreno, la posizione geografica di installazione del modulo e l'inclinazione di esso.

Tutti questi fattori hanno portato, nel 2023, alla cifra record di 440 GW di capacità installati in un solo anno, con un incremento del 58% rispetto all'anno precedente, portando così la capacità globale a oltre 1640 GW (International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS) 2024), a fronte di un ulteriore ribasso del costo medio dell'energia prodotta fino a circa 0,1 USD/W (International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS) 2024). Parallelamente alla crescita in termini di capacità, il settore sta anche vivendo un boom non solo dal punto di vista delle grandi installazioni (con capacità >1MW, detti utility-scale), ma soprattutto nel ramo residenziale e commerciale sostenuto sia dal calo dei prezzi dei pannelli, che dalla necessità sempre più ingente di affrontare la questione dell'autoconsumo. Il fotovoltaico si è quindi affermato definitivamente come fonte rinnovabile principale, rappresentando circa il 73% delle installazioni di impianti energetici rinnovabili.

2.3 Panoramica a livello mondiale e nazionale

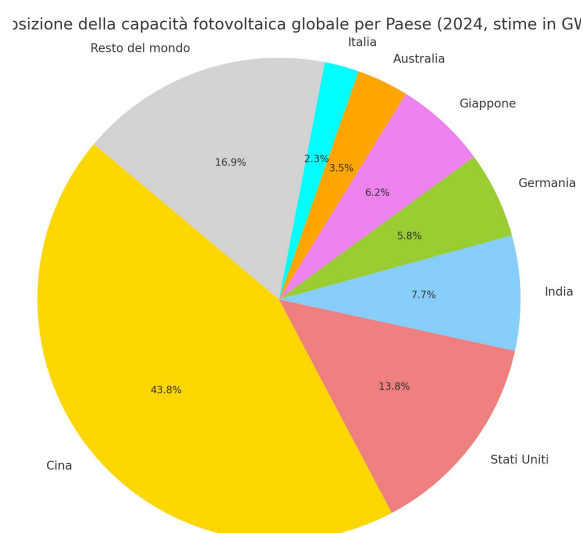


Figura 2.2: Composizione del venduto

Fonte: International Renewable Energy Agency (IRENA) 2024a

L'andamento di crescita del settore fotovoltaico precedentemente descritto si è verificato con intensità differente nelle varie aree geografiche (Figura 2.2): è infatti lampante che, per merito di una tecnologia avanguardistica unica al mondo, la Cina detiene saldamente il ruolo di leader globale del settore fotovoltaico, avendo da sola installato nel 2023 circa 216 GW di capacità, pari a quasi la metà di quella installata globalmente (International Renewable Energy Agency (IRENA) 2024a). Oltre al fattore tecnologico, il boom di questa fonte energetica rinnovabile

è dovuto anche sia a numerose politiche governative generali e locali a supporto delle installazioni, sia a costi di produzione delle celle competitivi, che hanno reso la Cina anche il primo esportatore al mondo di pannelli fotovoltaici. Oltre al mercato cinese, altri mercati in forte crescita sono quello indiano, statunitense, brasiliano ed europeo. In particolare, l'Unione Europea, nel 2023 ha visto un poderoso aumento della capacità installata con 56GW nel solo anno(+44% rispetto al 2022), dato largamente favorito dall'approvazione del piano REPowerEU, una politica europea atta a ridurre la dipendenza degli Stati membri dai combustibili fossili, andando così ad aumentare la quota delle fonti rinnovabili nel mix energetico di ogni singolo Paese (Solar Power Europe 2023a). Ponendo l'attenzione esclusivamente al settore fotovoltaico italiano, si osserva che l'andamento non si discosta da quello mondiale, essendo caratterizzato da una crescita repentina e costante nell'ultimo decennio. In particolare, secondo il Gestore dei Servizi Energetici, nel 2023 in Italia è stato installato un numero di impianti fotovoltaici tale da aumentare la capacità energetica di 5,2 GW, portando quella generale a 30,2 GW, distribuita su 1,4 milioni di impianti, che rappresenta una crescita del 45% rispetto al 2022 (Gestore dei Servizi Energetici (GSE) 2025). Al momento, gran parte delle installazioni fotovoltaiche italiane sono di piccola/media taglia, con una potenza di massimo 20 kW: tuttavia è in aumento il numero di progetti riguardanti soluzioni di grande taglia, specialmente del Centro e nel Sud Italia, dove per condizioni climatiche si può ambire ad una produzione energetica quasi costante per gran parte dell'anno.

2.4 Caratteristiche del mercato

A livello strutturale, il mercato fotovoltaico è un ambiente estremamente dinamico: presenta, infatti, numerose peculiarità che ne influenzano sviluppo, redditività e diffusione. Queste caratteristiche possono essere inquadrare come aspetti economici, tecnici, stagionali o normativi e sono:

2.4.1 Crescita esponenziale e scalabilità

Come già visto in precedenza, l'energia fotovoltaica è attualmente la fonte rinnovabile con il tasso di crescita maggiore. Ciò è dovuto non solo a fattori economici come riduzione dei prezzi di produzione e installazione delle celle ,ma anche ad una grande scalabilità: la tecnologia fotovoltaica può infatti essere installata sia nei grandi impianti industriali che nelle abitazioni, fornendo la possibilità di autogenerare l'energia anche ad un privato cittadino nella propria abitazione . La modularità dei pannelli consente inoltre una rapida espansione in funzione della domanda.

2.4.2 Stagionalità e variabilità della produzione

Una caratteristica peculiare del fotovoltaico è certamente la dipendenza dalla radiazione solare, la quale implica una produzione molto variabile sia nell'arco delle varie stagioni dell'anno, ma anche nel corso di una singola giornata. Nei mesi estivi la produzione energetica raggiunge il picco massimo, mentre in inverno risulta più limitata, compatibilmente con le condizioni climatiche e le latitudini. Questa variabilità richiede quindi il supporto di strategie di organizzazione della rete che consentano di gestire i periodi di scarsa produzione cercando di limitare al minimo il ricorso al razionamento. Esempi di tali approcci possono essere le installazioni di dispositivi di accumulo energetico come delle batterie, che permettono di immagazzinare l'energia di matrice solare prodotta quando le condizioni lo permettono e di utilizzarla nel periodo in cui la produzione è inferiore al fabbisogno, ma vi sono anche delle strategie che prevedono l'uso di particolari software "intelligenti" che consentono di pianificare l'immissione e il prelievo di energia in base alle previsioni metereologiche o al momento della giornata oppure di gestire il sistema supervisionando e gestendo eventuali guasti o funzionamenti non ottimali.

2.4.3 Elevata sostenibilità ambientale

Gli impianti fotovoltaici sono caratterizzati da una tecnologia a bassissimo impatto ambientale: nella loro attività, infatti, essi non necessitano di acqua per il raffreddamento (cosa che accade nelle centrali termoelettriche) né altri tipi di risorse e contengono quasi totalmente l'emissione di CO₂ e altri gas serra, avendo quindi un impatto quasi nullo sul cambiamento climatico. Si può quindi affermare che il ciclo di vita di un impianto fotovoltaico è generalmente sostenibile, con un unico punto debole, rappresentato dallo smaltimento complesso dei pannelli arrivati alla fine del loro ciclo vita. Anche in questo campo, però, sono stati fatti grandi passi avanti e, ad oggi, è possibile riciclare una percentuale pari a circa il 98% dei componenti di un pannello. Infatti, rientrando nella categoria di rifiuti RAEE (Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche), dai pannelli è possibile recuperare materiali come vetro, plastica, rame e silicio e alluminio. In caso di apparecchiature con potenza inferiore a 10KW lo smaltimento avviene presso centri specializzati ed è gratuito, mentre per impianti con potenza maggiore è leggermente più complesso e soprattutto a carico del proprietario (EconomiaCircolare.com 2023).

2.4.4 Produzione energetica decentralizzata

A differenza delle centrali collegate alla rete nazionale, il fotovoltaico consente di avere una produzione decentralizzata e delocalizzata, facendo così a meno della rete di trasporto dell'energia (nella quale spesso avvengono perdite durante la trasmissione) e aumentando la resilienza delle reti elettriche. Il fenomeno di produzione e consumo di energia elettrica da parte del privato cittadino è detto Prosumerismo (il consumatore diventa produttore).

2.4.5 Elevata dipendenza da incentivi

La crescita del mercato fotovoltaico nei vari Stati è influenzata direttamente da politiche pubbliche, che, se presenti, rendono l'installazione più appetibile. Si ha riscontro, infatti, del fatto che nei paesi in cui sono applicati incentivi come detrazioni fiscali, contributi a fondo perduto o tariffe incentivanti, la capacità installata è maggiore e soprattutto l'energia di matrice solare è fruibile ad una percentuale più ampia di popolazione, che senza un aiuto statale non può permettersi di operare un investimento per dotarsi di un impianto fotovoltaico.

2.4.6 Alta competitività e dinamiche globali

Il mercato fotovoltaico è caratterizzato da una forte competitività a livello globale, con la Cina che occupa una posizione di leadership nella produzione di pannelli e altri componenti, ma anche nell'installazione di impianti, possedendo la quantità più alta di capacità prodotta al mondo. Tuttavia, nell'ultimo quinquennio, si verificano sempre più frequentemente dei fenomeni di rilocalizzazione produttiva, specialmente in zone come Europa e Nord America che, così facendo, cercano eliminare o quantomeno ridurre il più possibile la condizione di dipendenza strategica che si manifesta verso il leader globale, che può far valere questo potere attraverso dinamiche geopolitiche aggressive, che comprendono dazi doganali per l'acquisto e l'importazione dei pannelli o dei componenti, ma anche politiche industriali come avanzamento tecnologico costante o razionamento della produzione, che rappresentano dei fattori chiave per influenzare il mercato.

2.5 Tendenze future

Se già ad oggi il mercato fotovoltaico può vantare una posizione di prestigio nel dibattito energetico, per il futuro il ruolo che esso rivestirà sarà sempre più centrale. Si stanno infatti sviluppando numerose nuove tendenze che portano a definire le prospettive future come estremamente interessanti, non solo dal punto di vista tecnologico, ma soprattutto in ambito di evoluzioni normative e nuovi modelli di business che si andranno a delineare e che porteranno ad un interesse sempre crescente da parte degli investitori. Le principali tendenze previste per i prossimi anni riguarderanno ambiti differenti.

Dal punto di vista tecnologico, ciò che è stato intrapreso in questo periodo riguardante lo studio e lo sviluppo di nuove celle (come quelle HJT, TOPCon, IBC e in perovskite descritte in precedenza) proseguirà nella stessa direzione, facendo largo anche a nuove soluzioni, come si nota da numerosi studi riguardanti celle costituire sia da silicio che da perovskite, che promettono di superare il 30% di efficienza, dato che le attuali soluzioni esistenti non consentono (Solar Power Europe 2023a). Altre migliorie apportabili in ambito tecnologico riguardano i pannelli

bifacciali, con miglioramenti possibili nel contesto della riflessione della luce che potrà portare ad un miglioramento delle performance, e dei nuovi pannelli flessibili e trasparenti detti BIPV (Building Integrated Photovoltaics), ideali per l'integrazione nel contesto urbano (International Energy Agency (IEA) 2023b). Un altro punto fondamentale che è destinato a cambiare il mercato fotovoltaico riguarda la digitalizzazione di esso: L'intelligenza artificiale sarà infatti una leva fondamentale per aumentare ulteriormente la competitività del fotovoltaico, attraverso nuove possibilità come il controllo e monitoraggio approfondito dell'impianto da remoto, manutenzione predittiva e ottimizzazione del funzionamento in base alle condizioni climatiche o al momento della giornata (International Renewable Energy Agency (IRENA) 2019).

Parallelamente agli sviluppi tecnologici, affinché il mercato fotovoltaico prosperi e produca una quantità di energia sempre maggiore, è necessario che esso venga integrato in contesti sociali e lavorativi in cui può rendere ulteriormente senza intaccare le attività che decideranno di adottarlo. Ad esempio, nel contesto edilizio, la diffusione capillare del concetto di edifici nZEB (nearly Zero Energy Building), ovvero con fabbisogno energetico bassissimo o nullo, totalmente coperto da fonti rinnovabili, richiederà sicuramente la presenza di pannelli solari (ENEA 2022). Un concetto che avrà larga diffusione nei prossimi anni sarà quello di comunità Energetica Rinnovabile (CER), ovvero un nuovo paradigma che consentirà a gruppi di utenti di produrre, condividere e utilizzare l'energia tutto localmente, migliorando così l'efficienza e riducendo i costi portando così ad una maggiore democratizzazione dell'energia (European Parliament and Council 2018). Nel settore dei trasporti, invece, si osserverà la presenza sempre maggiore di parcheggi solari o auto elettriche con tetto fotovoltaico, incentrate quindi sull'autosussistenza. Un altro settore in cui il fotovoltaico avrà un'importante crescita è quello agricolo, in cui avrà larga diffusione il concetto di agrivoltaico: Con questa parola vengono indicate delle installazioni di pannelli solari poste sopra delle coltivazioni, consentendo sia di proteggere le piante dalle radiazioni eccessive e quindi dallo stress idrico, che di migliorare la redditività degli agricoltori. In Italia questo fenomeno è già presente ed incentivato dal governo che ha destinato allo sviluppo di queste soluzioni una parte dei fondi del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (Ministero dell'Agricoltura 2023).

In ambito economico-finanziario, gli investimenti riguardanti le fonti energetiche rinnovabili nei prossimi anni avranno un grosso incremento, sostenuto da strumenti finanziari detti sostenibili. A questo gruppo appartengono sia le green bonds, ovvero obbligazioni che sono legate a progetti che hanno lo scopo di creare un qualcosa con finalità positive per l'ambiente, finanziando quindi progetti di sostenibilità ambientale, che gli investimenti ESG (Environmental, Social, Governance), il cui nome indica i parametri che gli investitori tengono sott'occhio prima di decidere se finanziare o meno un determinato progetto (BloombergNEF 2023). A seguito di tutti questi cambiamenti, è quindi chiaro che si stanno evolvendo anche i vari modelli di business, con una presenza sempre maggiore di nuove soluzioni, tra le quali vi sono il noleggio operativo (prevede che l'investimento sull'impianto venga fatto da una terza parte che si assume così i

rischi finanziari e creditizi, e sempre che quest'ultima ceda l'utilizzo del nuovo impianto in locazione ad un utilizzatore), il PPA (Purchase Power Agreement, è un accordo commerciale tra un fornitore di energia solare ed un acquirente, nel quale è possibile fissare termini riguardanti quantità di energia scambiata, durata del contratto e metodologia di fornitura di essa) e le piattaforme di crowdfunding energetico (con questa forma privati cittadini, investitori professionali o aziende possono contribuire mediante la donazione di una somma di denaro, anche piccola, alla realizzazione di un impianto fotovoltaico, ottenendo in cambio un ritorno dal punto di vista sia energetico che economico) (BloombergNEF 2023). Grazie a questi nuovi modelli di business si consente di accedere all'energia solare anche a coloro che non hanno le risorse per investire in un impianto.

A livello normativo, infine, vista la crescente importanza delle tematiche ambientali nel dibattito culturale e politico, nei prossimi anni ci si potrà sicuramente attendere un proliferare di norme e politiche a favore delle fonti energetiche rinnovabili. In particolare, con preciso riferimento al mercato fotovoltaico, si può affermare che sarà al centro di molte azioni dal punto di vista degli incentivi, essendo la strategia migliore nel processo di decarbonizzazione che gli Stati potranno affrontare. In Italia, il PNIEC (Piano Nazionale Italiano Energia e Clima) ha fissato degli obiettivi da raggiungere entro il 2030, come una capacità fotovoltaica pari a 79GW (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) 2024). Sul piano globale, invece, le politiche più importanti hanno come obiettivo quello di portare l'energia solare nei paesi in via di sviluppo, ad esempio attraverso piccoli impianti mini-grid in grado di fornire elettricità nei villaggi africani o asiatici. Di questi progetti si stanno occupando attraverso politiche economica e finanziarie sia l'IRENA che la Banca Mondiale. Attraverso tutte queste iniziative si stima, quindi, che la capacità di energia fotovoltaica mondiale possa addirittura triplicare entro il 2030, consolidando così il suo ruolo di principale fonte energetica rinnovabile, nonché prima alternativa ai combustibili fossili (International Renewable Energy Agency (IRENA) 2023).

Analisi della domanda

3.1 Segmentazione della domanda di mercato

Il primo aspetto da considerare nello studio della domanda in un mercato riguarda la segmentazione di essa, ossia l'individuazione di tutte le varie tipologie di consumatori differenti che popolano il macro-gruppo di coloro che sono interessati ad adottare la tecnologia oggetto dell'analisi. Affinché l'operazione porti ad avere un risultato veritiero è necessario scegliere con cure le variabili o gli aspetti secondo i quali osservare la domanda generale e successivamente da essa individuare dei raggruppamenti, detti propriamente segmenti, di individui che posseggono una certa similarità rispetto al parametro secondo il quale si opera la segmentazione. Questo processo è utilissimo per tutte le aziende in quanto consente loro, attraverso lo studio delle varie fasce della domanda, di pianificare in modo preciso e diversificato la strategia sia di produzione, ma soprattutto di marketing e vendita del prodotto al fine di ottimizzare la gestione delle risorse e l'esito delle varie iniziative organizzate per dare sostanza al piano messo in atto. Nel caso del mercato fotovoltaico, la grande scalabilità dei dispositivi porta la domanda ad essere estremamente variegata, partendo nel privato da utenze residenziali indipendenti, per passare a struttura più articolate come condomini fino ad arrivare ad esercizi commerciali, impianti industriali o anche imprenditori che hanno come core business l'investimento in grandi distese di dispositivi fotovoltaici. L'operazione di segmentazione della domanda è quindi abbastanza complessa data la grande quantità di sottogruppi presenti in essa: in questa situazione è fondamentale scegliere le corrette variabili di segmentazione in modo tale da individuare i raggruppamenti corretti a seconda della caratteristica che si vuole evidenziare. Le aziende fotovoltaiche, al fine di avere un quadro chiaro della situazione corrente, decidono nella maggior parte dei casi di operare diverse segmentazioni, e osservare l'evoluzione del mercato da diversi punti di vista. Le variabili più comunemente usate nel settore fotovoltaico sono la tipologia del consumatore, la dimensione dell'impianto, il modello di business e l'utilizzo dell'energia prodotta.

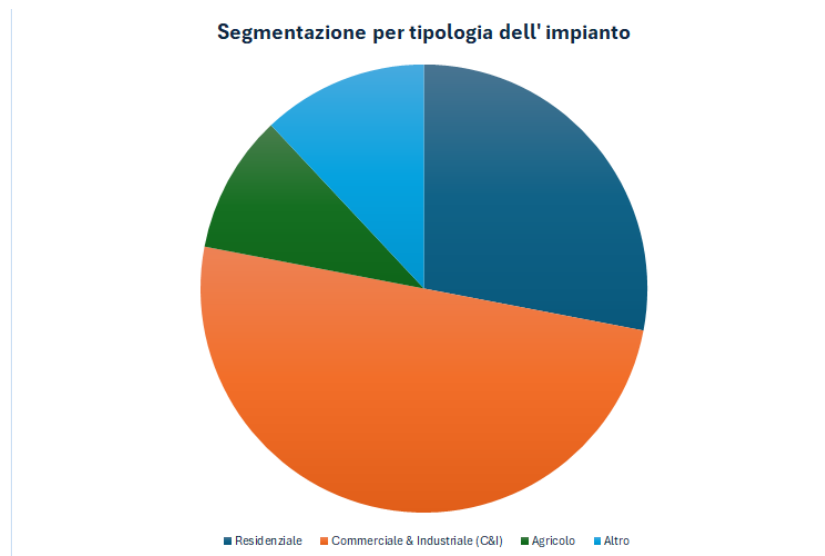


Figura 3.1: Segmentazione della domanda per tipologia di impianto.

Fonte: Gestore dei Servizi Energetici (GSE) 2023

3.1.1 Segmentazione per tipologia dell'impianto

Nella segmentazione per tipologia di impianto la variabile permette di identificare i vari sotto-gruppi in base alla loro natura. Da questa analisi viene fuori che sul territorio italiano il segmento dominante è quello residenziale: ad esso, infatti, appartengono circa il 28% delle installazioni fotovoltaiche presenti, con una potenza generata pari a 7031MW, ossia il 23,2% della potenza nazionale. Se si considerano solo le nuove installazioni, invece, gli impianti residenziali rappresentano il 40,4% del totale, a fronte del 37,4% coperto dagli impianti destinati ad applicazioni industriali e del restante 17,7% destinato al settore terziario (Gestore dei Servizi Energetici (GSE) 2022), come riportato in un report del GSE riguardante la diffusione del fotovoltaico nel 2022. Questo trend, sicuramente incrementato e rafforzato da alcuni vantaggi come detrazioni fiscali, riduzione in bolletta, incentivi pubblici come il Superbonus e la ridotta dipendenza dalla rete pubblica, ha portato ad una crescita significativa delle installazioni domestiche, con potenza oscillante tra 1kW e 20 kW. Il funzionamento di questi impianti è nella maggior parte dei casi supportato con sistemi di accumulo per la gestione efficiente dell'energia anche nei periodi di scarsa produzione. Oltre al segmento residenziale, all'interno della domanda generale costituisce un segmento degno di nota anche quello che rappresenta le installazioni industriali, che, a livello di potenza fotovoltaica nazionale occupa la prima posizione, con circa 14.530 MW, pari al 47,9% del dato nazionale (Gestore dei Servizi Energetici (GSE) 2023). Nell'ultimo quinquennio sempre più stabilimenti industriali, essendo attività energivore, che quindi hanno bisogno giornalmente di grosse quantità di energia elettrica, stanno convertendo il loro sovvenzionamento energetico virando su un mix incentrato principalmente su forme sostenibili e, tra le varie il fotovoltaico è

la scelta principale. Ciò comporta, oltre all'impegno sull'ecosostenibilità, anche una riduzione dei costi operativi e un aumento dell'efficienza energetica, a fronte della spesa per l'installazione e manutenzione periodica dell'impianto. Una forma alternativa al classico acquisto e gestione di un impianto fotovoltaico che consente ad aziende che non hanno le risorse economiche per un investimento significativo è rappresentata dai contratti di PPA (Power Purchase Agreements), ossia degli accordi che legano produttori di energia e consumatori di essa attraverso un meccanismo nel quale il produttore costruisce e gestisce l'impianto, mentre si impegna ad acquistare per tutta la durata del contratto l'energia prodotta ad un prezzo fisso o variabile che può essere stabilito attraverso clausole presenti nell'accordo. Un altro segmento importante della domanda secondo la classificazione per tipologia di consumatore è costituito da tutte le imprese che appartengono al settore terziario (uffici, negozi, attività commerciali varie, strutture ricettive), le quali, come il settore industriale (insieme coprono circa la metà delle opere fotovoltaiche presenti sul territorio), installano principalmente impianti di taglia media che vanno da 20kW a 500kW di potenza prodotta. A livello statistico, gli impianti presenti in strutture di questo settore producono circa 5.878MW, pari al 19,4% della potenza totale e, nel 2023 le nuove installazioni in questo segmento costituiscono il 17,8% degli impianti attivati nell'anno solare (Figura 3.1). Queste realtà sono spinte ad affidarsi al fotovoltaico oltre che da ragioni di sostenibilità, principalmente da fattori inerenti l'ottimizzazione a livello di costo energetico o talvolta anche da obblighi normativi interni oppure per ottenere una certificazione ESG (Environmental, Social, Governance), un documento attestante il fatto che il beneficiario rispetta tutti gli obblighi di conformità richiesti per l'ottenimento, tra i quali figura anche l'auto-sostenibilità energetica, consentita per tutto l'anno anche attraverso sistemi di accumulo a monitoraggio dell'energia prodotta che porta così ad un miglioramento in termini di efficienza degli impianti. Negli ultimi anni le stime del GSE testimoniano che è in grande crescita anche il segmento che prende in considerazione le strutture appartenenti al settore agricolo (ad oggi il 10% del totale), la cui potenza fotovoltaica prodotta si attesta intorno al 9,5% sul complessivo (2.877MW), così come la produzione nazionale è pari più o meno allo stesso valore percentuale (2,95GWh) (Gestore dei Servizi Energetici (GSE) 2023). Questo andamento crescente è sostenuto, come visto in precedenza dallo stanziamento dei fondi del PNRR destinati alla sostenibilità ecologica, che vengono quindi utilizzati per la costruzione di impianti sia integrati in strutture agricole che isolati. Infine, un altro segmento di interesse è rappresentato dal settore pubblico, ossia l'insieme degli enti locali, pubbliche amministrazioni o plessi scolastici che, anch'essi incentivati da fondi europei aderiscono a modificare il mix energetico di fornitura puntando maggiormente sulle rinnovabili e soprattutto sul fotovoltaico.

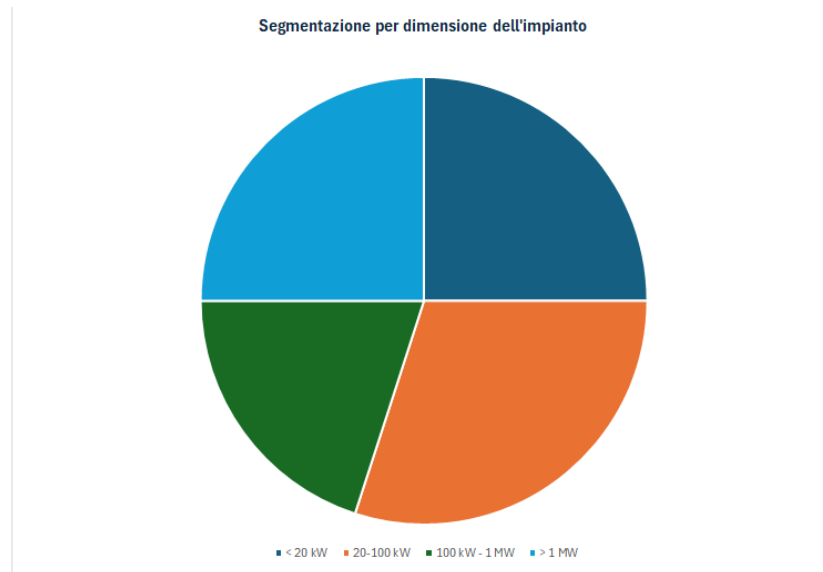


Figura 3.2: Segmentazione della domanda per dimensione dell' impianto.

Fonte: Gestore dei Servizi Energetici (GSE) 2022

3.1.2 Segmentazione per dimensione dell'impianto

Dopo aver scomposto la domanda a seconda della tipologia di impianto, un'altra variabile utilizzabile per una segmentazione è la dimensione degli impianti: questo criterio è fondamentale in quanto principio base in fase di progettazione, data l'esigenza di dimensionare la struttura in base allo spazio a disposizione o alle eventuali necessità di associare i dispositivi fotovoltaici con ulteriori sistemi ad essi connessi che ne migliorano l'efficienza. In base a questo criterio, il segmento predominante all'interno della domanda totale è quello dei piccoli impianti (capacità minore di 20 kW), presenti soprattutto in contesti domestici, che rappresentano circa il 29% della potenza totale e il 94% delle installazioni effettuate a fine 2023 (Gestore dei Servizi Energetici (GSE) 2022). A seguire vi sono gli impianti medi, con potenza compresa tra 20 kW e 500 kW, utilizzati in contesti affini al settore terziario o agricolo in quanto perfetti per equilibrare auto-consumo ed eventuale vendita di energia. Altro segmento molto importante è quello caratterizzato dagli impianti grandi (potenza compresa tra 500 kW e 1 MW), utilizzati nelle grandi realtà industriali e quindi con diffusione non uniforme in tutto il territorio, ma concentrati nella realtà più densamente ricche di stabilimenti produttivi di grandi aziende che possono permettersi di investire in questo tipo di strutture. Infine, vi sono i cosiddetti impianti utility-scale (potenza superiore a 1 MW), che comprendono parchi a terra e altre installazioni in grado di generare una grandissima quantità di energia (a fine 2023 corrispondeva al 30% della potenza complessiva installata) col principale fine di metterla in commercio (Gestore dei Servizi Energetici (GSE) 2022) (Figura 3.2).

3.1.3 Segmentazione per modalità di utilizzo dell'energia

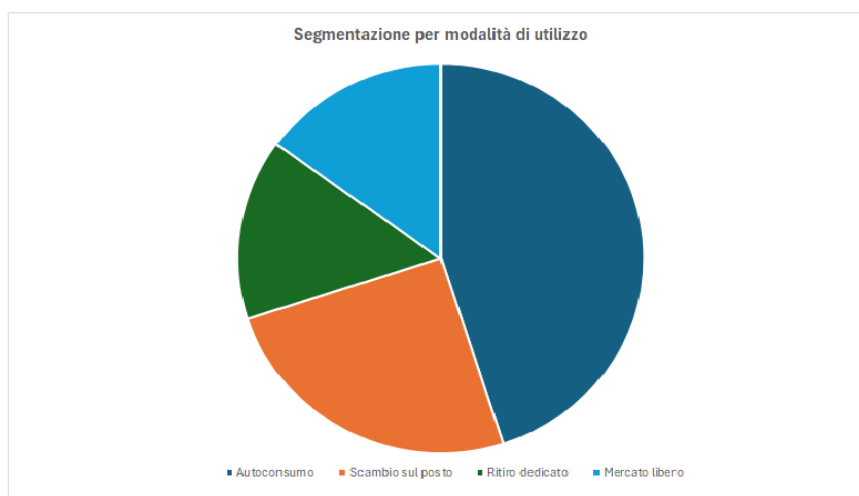


Figura 3.3: Segmentazione della domanda per modalità di utilizzo dell'energia.

Fonte: Ricerca sul Sistema Energetico (RSE) 2021

Un altro tipo di segmentazione della domanda che può essere operato si basa sulle differenze di utilizzo che l'energia creata può avere, criterio che incide fortemente sia sulla domanda stessa che sulle scelte tecniche riguardanti le caratteristiche dell'impianto che dovrà essere prima progettato e poi costruito. Tra le varie modalità di utilizzo dell'energia i segmenti principali riguardano l'autoconsumo (rappresenta il 45% dell'utilizzo totale di energia), sia individuale, che quindi comprende l'ambito residenziale e delle piccole imprese (spesso supportate con sistemi di accumulo) che collettivo, con quest'ultimo che rappresenta un fenomeno in espansione, nel quale vi sono diverse configurazioni operative di gestione e consumo dell'energia che tengono del contesto in cui ci si trova (ad esempio condomini, uffici...), ma anche il concetto di Scambio Sul Posto (SSP), una metodologia che consente di "compensare" la quantità energia immessa nella rete dall'impianto con la quantità di prelevata, ed un ulteriore conguaglio economico da parte del GSE (Gestore dei Servizi Energetici). Questa forma di utilizzo attualmente è applicata per i sistemi di medio-piccole dimensioni, ed impatta sul 25% delle possibili casistiche, anche se questa percentuale è destinata a diminuire in favore di nuovi regimi di utilizzo che potranno rendere il lavoro dell'impianto più efficiente (Ricerca sul Sistema Energetico (RSE) 2021). Un altro segmento importante è quello rappresentante una tipologia di utilizzo definita come Ritiro Dedicato (RID), locuzione che riassume un processo di acquisto dell'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico ed immessa della rete, nel quale il GSE svolge il ruolo di attore principale, formalizzando l'acquisto direttamente in prima persona attraverso il pagamento di un prezzo zonale orario, mentre il produttore riceverà un conguaglio in base all'energia prodotta dal proprio impianto (Ricerca sul Sistema Energetico (RSE) 2021). Questo processo rappresenta ad

oggi circa il 15% dell'utilizzo totale dell'energia prodotta, stessa percentuale riservata alle attività di mercato libero, dominanti per gli impianti utility-scale, che producono grandissime quantità di energia con l'unico scopo di metterla sul mercato(Figura 3.3). La vendita di quest'energia può avvenire attraverso il mercato elettrico mediante figure operanti in questo contesto come i trader, sia attraverso le borse, che sono regolamentate e gestite dal da un ente definito Gestore dei Mercati Energetici(GME).

3.1.4 Segmentazione per modello di business

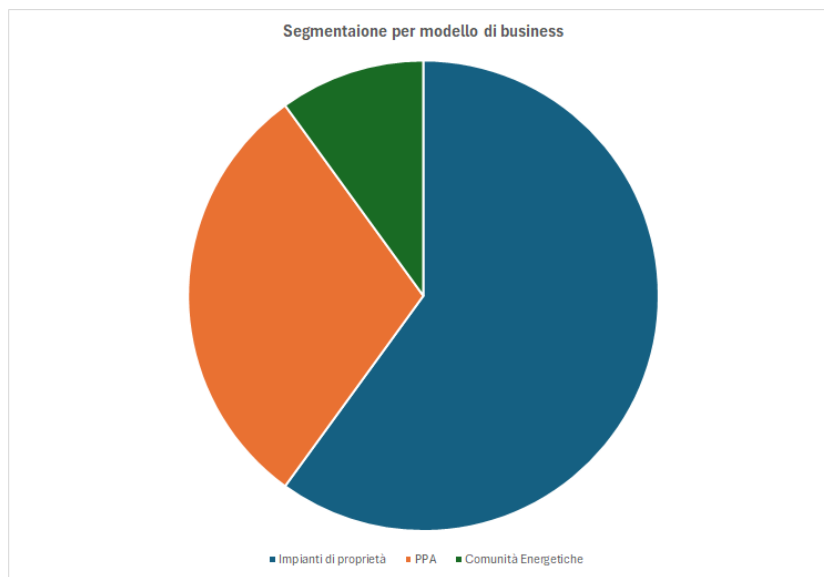


Figura 3.4: Segmentazione della domanda per modello di business.

Fonte: BloombergNEF 2023

La scelta di installare un impianto fotovoltaico è spesso influenzata, oltre che dall'utilizzo dell'energia prodotta e dalle questioni di sostenibilità, anche dal modello di business che si vuole perseguire attraverso questo investimento. L'acquisto dell'impianto può infatti avvenire secondo diverse forme, ognuna delle quali sottintende un piano che l'acquirente ha per questo progetto: in primis vi è sicuramente la proprietà diretta, presente nel 60% dei casi, nella quale il finanziatore dell'opera è anche proprietario di essa e fruitore del prodotto(forma più diffusa in ambito commerciale e residenziale), ma vi sono anche molti casi di leasing operativo(soprattutto in attività commerciali o piccole e medie imprese) nel quale il fruitore paga una tassa periodica ad un terzo, che ha investito le proprie risorse per costruire l'impianto. In questo modo si evita di fare un investimento significativo, sostituendolo con un pagamento periodico che consente di usufruire ugualmente di energia rinnovabile prodotta dall'impianto. Importanti sono anche i modelli cooperativi, tra i quali spiccano le Comunità Energetiche Rinnovabili(CER), nelle quali si cerca di raggruppare la domanda energetica di tutti coloro che ne fanno parte(privati

cittadini, esercizi commerciali, enti locali, pubblica amministrazione) e, in base al fabbisogno richiesto, si acquista la quantità di energia totale richiesta da stabilimenti produttivi basati su fonti rinnovabili, tra le quali il fotovoltaico ricopre un ruolo di primo piano e la si consuma in maniera congiunta, come un vera comunità. Questo assetto al momento ricopre una percentuale pari a circa il 10%(Figura 3.4), ma sarà oggetto di una grande crescita nei prossimi anni, anche accompagnata da una maggiore regolamentazione dal punto di vista normativo. Infine, in un 20% dei casi, l'adozione dell'energia fotovoltaica è favorita mediante la redazione di contratti di tipo PPA(Purchase Power Agreement), i quali, consentendo pianificazione energetica a lungo termine, costituiscono la forma di gestione migliore per gli impianti fotovoltaici di aziende del settore industriale o utility-scale. Si distinguono tra PPA locali (impianto installato nella stessa locazione del consumatore, ma finanziato e gestito da un'altra parte, con il consumatore che ha esclusiva facoltà di acquisto dell'energia previo pagamento di un prezzo stabilito) o PPA Off-site(impianto costruito in un'altra località, con energia fornita tramite la rete).

3.2 Comportamento e preferenze dei consumatori

I vari tipi di segmentazione mostrati sono utili per far comprendere quanto il fotovoltaico sia un settore profondamente versatile, che si dimostra essere compatibile con innumerevoli contesti abitativi, lavorativi o finalizzati esclusivamente alla produzione di energia. Questa varietà di applicazioni, unita al contesto della sostenibilità, fa sì che le installazioni fotovoltaiche siano da diversi anni in continua crescita, culminando nel 2024 con una potenza totale installata in Italia pari a 37GW(+30% rispetto al 2023). A questo valore fa da contraltare il fatto che il numero di impianti totali installati sia diminuito, che porta a notare che l'incremento di potenza ottenuto sia frutto delle dimensioni dei nuovi siti produttivi, sempre più grandi e meno orientati all'utilizzo residenziale(-21% in potenza installata nel settore rispetto al 2023) (Analytics Arts 2024). Questi dati consentono di far risaltare delle caratteristiche riguardo ai consumatori e al loro modo di comportarsi e approcciare ad una realtà alternativa come quella dell'energia fotovoltaica. Al fine di descrivere con accuratezza il comportamento e le preferenze dei consumatori nel mercato fotovoltaico vengono utilizzate differenti tecniche di analisi, tra le quali spiccano la Conjoint Analysis e la Cluster Analysis.

3.2.1 Comportamento del consumatore secondo la Conjoint Analysis

La Conjoint Analysis è una tecnica analitica applicata soprattutto nel marketing che si propone di capire l'importanza dei vari attributi o caratteristiche di un prodotto nella decisione di acquisto. Questa procedura è composta da diversi passaggi: nella fase preliminare, gli incaricati individuano un insieme di caratteristiche ritenute portanti nella scelta che il consumatore deve compiere circa l'adottare o meno la tecnologia in questione. Successivamente, vengono propo-

ste agli stessi consumatori delle combinazioni tra i diversi attributi identificati in precedenza e si osservano le loro preferenze. Infine, attraverso i risultati ottenuti, si assegna ad ogni caratteristica il relativo peso, ossia un valore numerico che rappresenta l'importanza nel contesto della scelta. In ambito fotovoltaico, nel 2024 il blog Analytics Arts ha svolto una Conjoint Analysis del settore nell'ambito di una ricerca volta ad esaminare le tendenze future delle energie rinnovabili (Analytics Arts 2024). Gli input scelti durante la fase preliminare spaziano da caratteristiche "fisiche" dell'impianto come la dimensione di esso, passando per fattori fiscali come tempo di rientro dell'investimento, incentivi fiscali e garanzia di rendimento e chiudendo con i servizi accessori, ossia tutte le attività secondarie connesse all'adozione della tecnologia (installazione, assistenza, manutenzione periodica...). I risultati della fase analitica, nella quale sono stati posti ad un campione di consumatori italiani delle combinazioni fra i vari criteri al fine di identificare le preferenze, hanno fatto emergere il fatto che ognuno dei criteri è visto dal campione in maniera diversa e quindi associato ad un peso di valore differente (Tabella 3.1). Dai valori otte-

Caratteristica	Peso attribuito
Servizi inclusi	+0,455
Dimensioni dell'impianto	+0,399
Ritorno atteso dell'investimento entro 8 anni	+0,201
Garanzia 90% di rendimento su 10 anni	+0,111
Incentivi fiscali (50% sulla fattura)	+0,150

Tabella 3.1: Caratteristiche e pesi utilizzati nella Conjoint Analysis

Fonte: Analytics Arts 2024

nuti si evince che, per i consumatori italiani, la caratteristica principale che viene osservata al momento della scelta riguardante l'adozione del fotovoltaico è la presenza di eventuali attività secondarie connesse all'adozione della tecnologia. A seguire, la preferenza vira sulle dimensioni dell'impianto che, dal sondaggio hanno mostrato una tendenza leggere verso soluzioni di piccola portata connesse ad usi residenziali, mentre il terzo criterio in ordine riguarda il ritorno sull'investimento effettuato entro un lasso temporaneo quantificato in otto anni. Sono risultate più di nicchia, invece, sia le garanzie circa il rendimento dell'impianto in ottica decennale che gli incentivi natura fiscale (Figura 3.5).

3.2.2 Comportamento del consumatore secondo la Cluster Analysis

Una volta terminata la Conjoint Analysis e ottenuti i pesi medi rappresentanti l'importanza delle varie caratteristiche all'interno del campione analizzato, è possibile svolgere un'ulteriore analisi che permette, sempre all'interno del medesimo campione, di individuare delle ricorrenze simili e di raggrupparle in modo tale da ottenere dei sottogruppi di consumatori che posseggono le medesime preferenze o comunque lievemente differenti. I sottogruppi che si generano vengono definiti cluster, dando così il nome alla procedura, conosciuta come Cluster Analysis. Nel

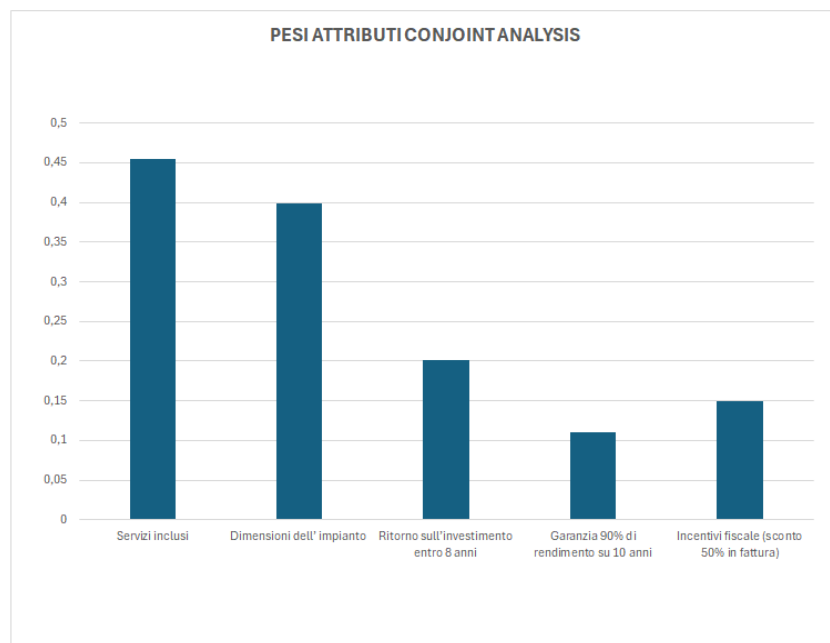


Figura 3.5: Grafico riassuntivo di attributi e valori della Conjoint Analysis.

Fonte: Analytics Arts 2024

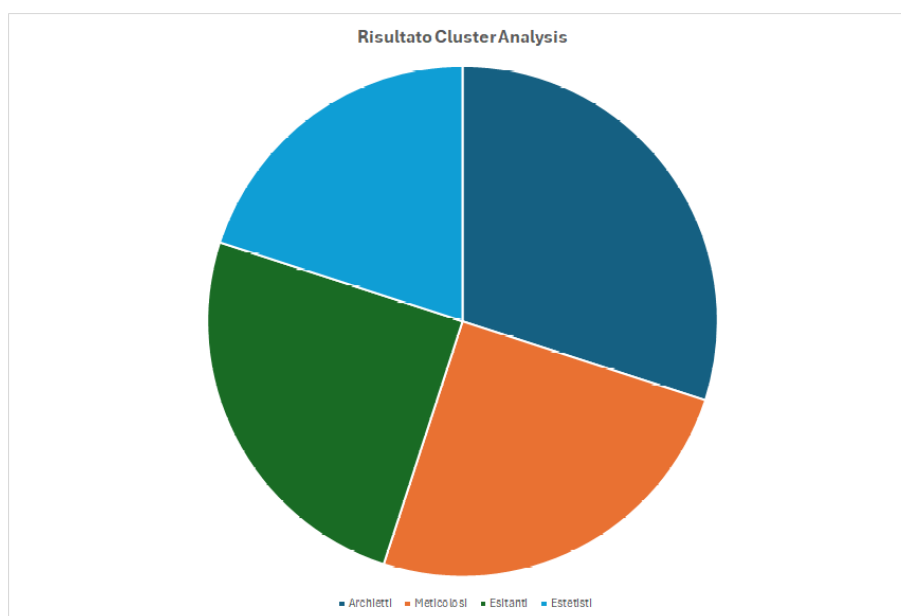


Figura 3.6: Grafico esplicativo del comportamento del consumatore emerso dalla Cluster Analysis.

Fonte: Analytics Arts 2024

caso del campione analizzato da Analytics Arts, vengono individuati numerosi sottogruppi di consumatori che sembrano avere preferenze analoghe tra i diversi criteri. Il cluster più numeroso (circa 30% del totale) rappresenta i cosiddetti “architetti”, ovvero coloro che prestano grande

attenzione agli aspetti finanziari come prezzo, incentivi e un ritorno rapido della somma pagata. Si evince quindi che, i facenti parte di questo gruppo giudicano il passaggio ad una fonte energetica rinnovabile come il fotovoltaico essenzialmente un investimento, e non una scelta dettata da ragioni etiche. Appartengono a questo cluster professionisti, ma anche piccole e medie imprese. Leggermente meno numeroso (25% del totale) è il cluster dei “meticolosi”, comprendente famiglie con redditi medio-alti e stabili di proprietà. Chi appartiene a questo sottogruppo cerca sia un pacchetto completo di servizi secondari come assistenza e installazione, ma anche ottime garanzie di rendimento, per le quali sono disposti a pagare anche cifre ulteriori. Stessa numerosità (25% del totale) è associata agli “esitanti”, comprendenti principalmente famiglie con redditi medio-bassi, che temono costi e iter burocratico, ma allo stesso tempo necessitano di informazioni chiare e sono interessati agli incentivi fiscali proposti. Ultimo, ma comunque molto numeroso (20% del totale), è il cluster degli “estetisti”, raggruppamento che include tutti coloro che scelgono di adottare il sistema esclusivamente se questo è integrato esteticamente, e quindi poco visibile (Figura 3.6). Fanno parte di questo gruppo i proprietari di strutture il cui aspetto è parte fondamentale del valore della struttura stessa, come ad esempio nel caso di ville di lusso o di stabili immersi in contesti naturalistici. In sintesi, quindi, il risultato di queste due analisi ci porta ad affermare che secondo la Conjoint Analysis gli aspetti più importanti sono i servizi inclusi, tipo di impianto e ritorno sull’investimento, mentre attraverso la Cluster Analysis osserviamo l’eterogeneità del mercato, all’interno del quale vi sono consumatori che pongono l’accento su aspetti diversi, rendendo necessario modulare le offerte per ogni singolo gruppo, al fine di ampliare sempre più il numero di utilizzatori.

3.3 Fattori che influenzano la domanda

Nella precedente sezione si è dimostrato come i consumatori siano sensibili in maniera differente a tanti fattori o caratteristiche. Partendo da questo concetto è quindi chiaro che anche la domanda rappresentativa del settore fotovoltaico è tutt’altro che costante, bensì è fortemente variabile ed influenzata da fenomeni e peculiarità appartenenti a numerosi ambiti profondamente diversi tra loro. Tra questi, spiccano per importanza i fattori economici, tecnologici, normativi, sociali, e ambientali.

3.3.1 Fattori economici

Per accedere alle risorse energetiche generate da un impianto fotovoltaico è necessario compiere un investimento iniziale connesso alla dotazione dei pannelli e di tutta la struttura in grado di produrre energia. Spesso, però, l’investimento non è alla portata di tutti, motivo per il quale l’accesso al fotovoltaico, pur essendo sempre più diffuso, è ancora considerato come dipendente dai fattori economici. Tra le diverse variabili che a livello finanziario devono essere osservate

da coloro che desiderano adottare la tecnologia solare sicuramente quella che fa da padrone è il prezzo dei pannelli solari e della struttura ad essi connessa. In questo caso, più cresce il prezzo e più diminuisce la possibilità di aumentare la domanda e quindi la diffusione della tecnologia (International Energy Agency 2024). Discorso opposto è quello riguardante il prezzo dell'energia convenzionale, ossia l'energia elettrica che si acquista dall'operatore e che transita attraverso la rete pubblica: infatti, più aumenta il prezzo di essa e più un cittadino è incentivato a cercare soluzioni alternative, tra le quali spiccano le energie rinnovabili e in particolare il fotovoltaico. Un altro vettore di crescita della domanda ricollegabile alla sfera economica è rappresentato dagli incentivi che si possono ottenere installando un impianto fotovoltaico: all'acquisto infatti seguono diverse detrazioni come superbonus, tariffe incentivanti un maggiore utilizzo e sconti consistenti sulla bolletta elettrica. Da menzionare, infine, i già citati meccanismi alternativi di consumo collettivo come le comunità energetiche, ma anche il leasing che permette ugualmente l'utilizzo dell'energia elettrica di origine fotovoltaica pur non possedendo un impianto di proprietà. Più queste opportunità alternative sono diffuse e più la domanda sarà consistente.

3.3.2 Fattori tecnologici

Parallelamente ai fattori economici, un aumento della domanda può anche essere ricondotto ad un miglioramento dal punto di vista tecnologico. I progressi fatti dal punto di vista strutturale nel campo del fotovoltaico hanno infatti portato ad avere una vita utile degli impianti molto più alta, garantendo quindi ai consumatori un incremento di affidabilità, coincidente con una diminuzione del numero di interventi di manutenzione necessari. Oltre a ciò, altri fattori tecnologici fondamentali che portano ad una variazione della domanda riguardano l'autonomia delle batterie, ad oggi sempre maggiore e l'efficienza dei pannelli solari, diventati ormai altamente produttivi e con un periodo di vita tale da permettere ai proprietari di vedere l'investimento come fattibile da punto di vista della differenza tra guadagni e costi. Infine, rivestono un ruolo importante anche le nuove tecnologie riguardanti le installazioni in contesti nei quali normalmente non sarebbe stato possibile costruire un impianto fotovoltaico: appartengono a questa categoria sia il fenomeno dell'agrivoltaico, ma anche le installazioni fotovoltaiche galleggianti (realizzate costruendo una piattaforma sul livello dell'acqua e posando sopra ad essa l'impianto) o i nuovi pannelli integrati direttamente nei tetti, che permettono di aumentare il numero di abitazioni nelle quali si può adottare l'energia solare.

3.3.3 Fattori normativi

Nell'ambito dello sviluppo e della diffusione delle energie rinnovabili, rivestono un ruolo centrale anche le politiche nazionali e internazionali, così come le norme da esse derivanti. Al fine di diminuire le quantità di scorie nocive emesse nell'aria, infatti, la Comunità Europea si è fatta

promotrice di numerose politiche a livello ambientale, tra le quali si ricordano il Green Deal, il PNIEC o gli obiettivi massimi di decarbonizzazione da raggiungere entro una predeterminata data. Al fine di raggiungere ciò, gli Stati membri hanno promulgato diverse norme legate sia all'edilizia che all'urbanistica allo scopo di supportare le installazioni rinnovabili come quelle fotovoltaiche, promuovendo tra le altre cose sia degli incentivi che delle semplificazioni dal punto di vista fiscale e burocratico (International Energy Agency 2024). Tuttavia, il continuo cambiamento delle regole dovuto al fatto che le politiche europee hanno spesso un lasso di tempo finito, porta il consumatore a frenare l'investimento o a limitarlo in un lasso di tempo nel quale può usufruire delle agevolazioni ad esso dedicate. Ci si trova quindi di fronte ad armi a doppio taglio, capaci sia di incrementare ma anche di decrementare la domanda se ad esse non viene dato un seguito.

3.3.4 Fattori ambientali

Pur avendo descritto l'importanza dei fattori economici, tecnologici e normativi, è evidente il fatto che, alla base della crescente attenzione verso le energie rinnovabili vi sia una consapevolezza e attenzione alle tematiche ambientali sempre più forte, tanto da occupare un ruolo importante nel dibattito pubblico quotidiano. Ciò si deve sicuramente al crescente numero di manifestazioni atmosferiche intense che si dimostrano essere figlie di fenomeni dovuti al riscaldamento globale e agli effetti che esso ha sull'ecosistema del pianeta. Partendo da questo principio, e considerando i già citati miglioramenti tecnologici e di affidabilità degli impianti, è quindi facile osservare come la domanda sia in crescita, specialmente nei paesi in cui le tematiche ambientali sono supportate da interventi governativi sia nazionali che locali, che cercano di diffondere nel tessuto sociale i principi dell'ecosostenibilità attraverso iniziative che coinvolgano ad esempio le scuole (progetti extra scolastici, incontri focalizzati sulla sensibilità ambientale) e altre istituzioni che occupano un ruolo importante nella società.

3.3.5 Fattori geografici

In ultimo, è ovviamente importante considerare la posizione geografica nella quale si vuole adottare la tecnologia a funzionamento solare. Vi sono infatti zone in cui la disponibilità di radiazione solare è elevatissima e soprattutto costante per gran parte dell'anno, come nel caso delle zone in prossimità dell'equatore o comunque dove il clima è prettamente caldo o mediterraneo. Più rare sono invece le installazioni fotovoltaiche nelle zone prossime ai poli, in cui la radiazione solare è assente per gran parte dell'anno o comunque, se presente, è poco intensa per cui l'investimento non garantirebbe un ritorno adeguato. In queste zone, però si può fare affidamento ad altre forme di energie rinnovabili. Importante è anche la fisionomia del territorio che, se regolare consente l'installazione di grandi stabilimenti a produzione continua di energia in grado

di alimentare intere comunità o grandi contesti commerciali, mentre può essere anche considerato un fattore determinante della domanda anche la capacità della rete elettrica che, se limitata o comunque sottodimensionata rispetto alla domanda, può portare alla ricerca di altre fonti di energia al fine di colmare il fabbisogno necessario alla popolazione.

3.4 Dipendenza della domanda dal prezzo

Tra tutti i fattori appena elencati, il prezzo è sicuramente quello centrale, in quanto la limitata disponibilità economica dei consumatori è lo scoglio principale da superare, che porta spesso essi a desistere dall'installazione di un impianto fotovoltaico, anche se sussistono tutte le volontà di operare questo cambiamento verso la transizione energetica. In questo contesto, il concetto di prezzo è molto ampio: esso, infatti, può essere associato a diverse manifestazioni, ognuna delle quali può costituire un motivo per adottare l'energia fotovoltaica o una causa per la quale non farlo. In primis vi è sicuramente il costo di investimento iniziale: come affermato in precedenza, dotarsi della struttura e dei componenti necessari (pannelli, inverter, installazione e iter burocratico) per poter produrre energia elettrica di natura fotovoltaica richiede un investimento iniziale oneroso. In ottica di un miglioramento, uno sviluppo tecnologico diretto verso un aumento della produzione, così come una semplificazione dell'iter burocratico porterebbero questo prezzo a diminuire e a rappresentare sempre meno una barriera all'ingresso nel settore, aumentando così la domanda di adesione all'energia solare (Figura 3.7). Viceversa, se ciò non dovesse avvenire la domanda tenderebbe a non aumentare, soprattutto in assenza di ulteriori motivazioni per entrare in questo mercato, come incentivi o detrazioni. Un'altra area in cui viene valutato il prezzo riguarda la differenza di acquisto che intercorre tra l'energia solare e le fonti tradizionali non rinnovabili, come combustibili fossili o gas naturale (Figura 3.8). Queste ultime, essendo infatti di importazione, comportano una dipendenza costante dai Paesi fornitori e, di conseguenza, anche dal contesto geopolitico in cui ci si trova, che è una variabile fondamentale nella fase di contrattazione del prezzo di importazione. In tali situazione, quando il prezzo sale, risulta estremamente vantaggioso affidare la produzione energetica alle fonti rinnovabili, nelle quali il fotovoltaico rappresenta l'alternativa più percorribile. Se invece il prezzo delle fonti tradizionali non subisce aumenti, generalmente la domanda fotovoltaica rimane costante o comunque la variazione è minima. Infine, si nota l'effetto che il prezzo ha sulle economie di scala: infatti, diminuendo i prezzi medi delle componenti dell'impianto (e quindi dell'impianto stesso), le aziende produttrici possono sfruttare il fenomeno dell'economia di scala, secondo il quale, all'aumentare della produzione, il costo medio di essa diminuisce, per cui è molto più conveniente produrre in larga scala piuttosto che in piccole quantità. Questo aumento di produzione porta inevitabilmente le aziende ad abbassare ulteriormente i prezzi in quanto, secondo la legge dell'equilibrio tra domanda ed offerta, per riuscire a vendere tutta la merce prodotta, il

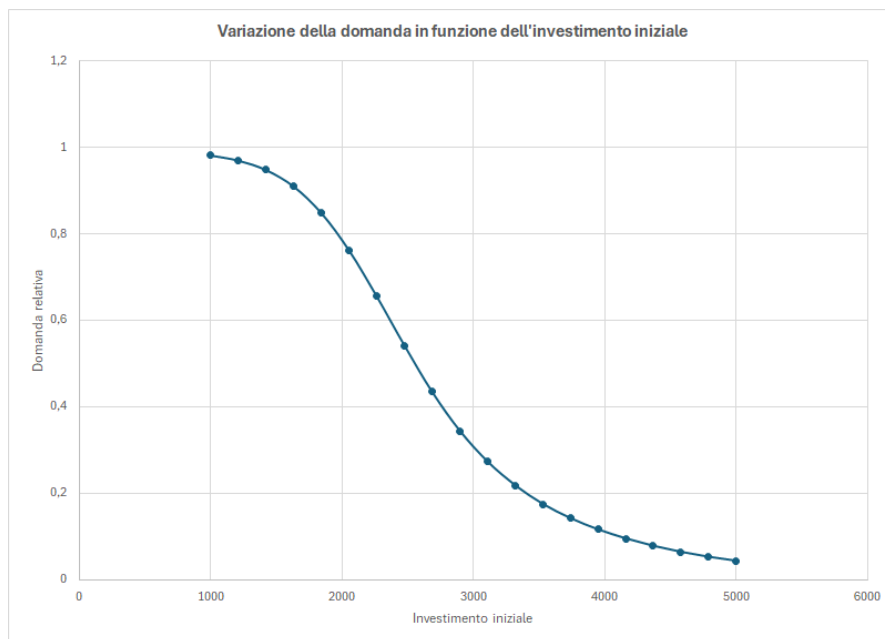


Figura 3.7: Stima dell'andamento medio della domanda in base all'investimento iniziale.

Fonte: Gestore dei Servizi Energetici (GSE) 2023

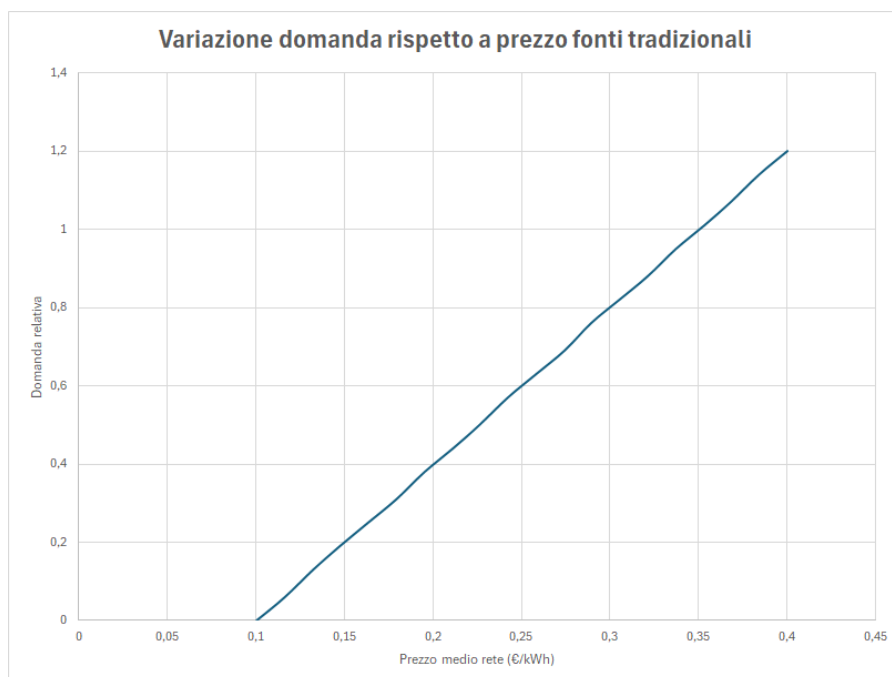


Figura 3.8: Stima dell'andamento medio della domanda fotovoltaica al variare dei prezzi delle fonti tradizionali.

Fonte: Gestore dei Servizi Energetici (GSE) 2023

prezzo deve diminuire, così da ampliare il bacino di clienti disposti ad acquistare la tecnologia in questione. Tutti questi effetti portano a definire la domanda di adesione all'energia solare come

elastica rispetto al prezzo: infatti, ad una variazione dei costi riguardante non solo l'investimento iniziale, ma anche costo unitario delle componenti o prezzo delle fonti tradizionali, si osservano notevoli cambiamenti nel numero delle installazioni.

3.5 Previsioni di crescita della domanda

Osservando la panoramica di sviluppo che il settore fotovoltaico ha avuto dal momento della prima commercializzazione sino ai nostri giorni, si nota che l'andamento della domanda è sempre stato di tipo crescente, anche se in un primo momento con ritmi lenti date le scarse applicazioni a cui era destinato e con una tecnologia ancora non tanto all'avanguardia da permettere un ingresso di questa fonte alternativa nella vita di tutti i giorni. La vera svolta è iniziata nei primi anni '90 per poi avere un forte slancio nel primo decennio del 2000 e il boom definitivo dal 2010 fino ai nostri giorni, nei quali il fotovoltaico è considerato un pilastro della transizione energetica globale. Come descritto nella precedente sezione, questa traiettoria è stata sostenuta da numerosi fattori di origini diverse, tra i quali spiccano per importanza la riduzione dei costi, la crescente sensibilità ambientale ed un aumento dell'efficienza. A supporto di questo fenomeno vi sono numerosi documenti stilati dalle massime autorità mondiali nell'ambito energetico. In primis, l'AIE (Agenzia Internazionale dell'Energia) ha descritto il fotovoltaico come la fonte energetica rinnovabile più competitiva, dati i costi molto inferiori non solo rispetto alle fonti tradizionali come gas e carbone, ma anche rispetto alle altre fonti rinnovabili. Su scala mondiale, nel 2025 la produzione di energia solare è arrivata a coprire la metà dell'aumento del fabbisogno energetico verificatosi tra 2024 e 2025 (International Energy Agency 2025), arrivando fino a tre quarti considerando la produzione eolica. A livello di capacità cumulata, l'attuale valore, attestatosi oltre i 2,5 TW, si stima possa avere un incremento fino a 3,5 TW entro la fine del 2027 (Solar Power Europe 2023b), mentre le installazioni annuali sono destinate a rimanere nel range compreso tra 500GW e 700GW per i prossimi 3 anni. In ambito economico, il trend di crescita previsto per il prossimo quinquennio porterà il mercato fotovoltaico, valutato circa 51 miliardi di dollari nel 2022, ad avere un valore prossimo ai 300 miliardi entro il 2030, con un tasso di crescita annuale del 16% (International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS) 2025) circa (Figura 3.9). Affinché quindi il fotovoltaico diventi la fonte energetica più diffusa al mondo entro la fine del decennio, però, è necessario che lo sviluppo tecnologico avvenuto fino ad oggi continui a questo ritmo, al fine di poter avere componentistica sempre più facile da realizzare e meno costosa, reti elettriche adeguato ad un carico maggiore e sistemi di accumulo sempre più integrati. In ogni caso, nei prossimi anni il contributo che l'energia di produzione fotovoltaica darà, sarà fondamentale sia per la riuscita degli obiettivi di decarbonizzazione stabiliti dagli accordi internazionali che per una minore dipendenza dai combustibili fossili, portando ad un miglioramento della sicurezza energetica dei singoli Stati. Ponendo l'at-

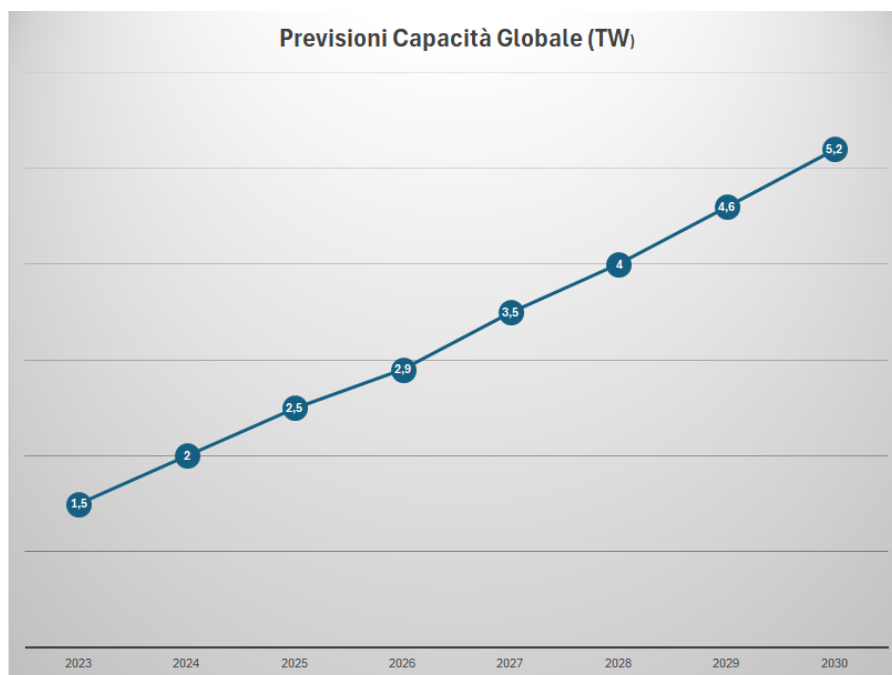


Figura 3.9: Previsione di crescita della capacità fotovoltaica globale

Fonte: Solar Power Europe 2023b

tenzione sulla situazione presente in Italia, invece, si nota che il fotovoltaico, pur mantenendo comunque un ruolo di prim'ordine nel contesto energetico, non rispetta la quota che occupa al livello globale. Infatti, a fine 2023, il Paese contava circa 36GW di capacità installata, equivalente a circa il 12% della produzione nazionale. Al fine di migliorare questa situazione, è stato varato il Piano Nazionale Integrato Energia e Clima (PNIEC), il quale, attraverso degli interventi pianificati, pone come obiettivo principale quello di raggiungere entro il 2030 i 79GW di capacità installata, ossia più del doppio di quella registrata nel 2023 (Figura 3.10). Per fare ciò, è necessario aggiungere circa 7GW di capacità annualmente, un dato molto ambizioso guardando al passato, ma fattibile se si osservano gli ultimi anni, nei quali la crescita ha rispettato queste previsioni, anche grazie ad una posizione geografica ideale che garantisce una disponibilità di irraggiamento solare tra le più alte in Europa, a politiche di sostegno sia nazionali che internazionali (Decreto FER1, Superbonus 110%) e alla diffusione sempre più imponente delle modalità di consumo comunitario. Nonostante ciò, restano comunque molte difficoltà legate al consolidamento del fotovoltaico sul territorio italiano, a cominciare dal settore industriale, nel quale l'Italia ha perso gran parte della filiera produttiva di pannelli, ad oggi concentrata prevalentemente in Asia (International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS) 2025). Nonostante ciò, rimane all'avanguardia dal punto di vista tecnologico e progettuale, per cui, se supportata da piani industriali ambiziosi e con il supporto statale, è possibile pensare nel lungo termine di riacquistare una posizione importante in ambito produttivo. Dal punto di vista ambientale, la sfida maggiore è quella di conciliare l'installazione degli impianti

fotovoltaici con la preservazione dell'ecosistema, dell'agricoltura e dei paesaggi. Ad oggi, le soluzioni migliori in questo campo sono rappresentate dal fotovoltaico integrato nelle strutture o dall'agrivoltaico, che garantiscono al contempo sia sostenibilità che conservazione dell'ambiente. Infine, gli ostacoli maggiori da superare rimangono sempre connessi alla burocrazia e alle infrastrutture: infatti, nonostante le recenti norme, i tempi dell'iter autorizzativo per la costruzione di grandi impianti fotovoltaici sono tutt'ora proibitivi. Inoltre, la rete elettrica necessita di grandi investimenti per essere potenziata e supportare un aumento della produzione e della distribuzione elettrica. Per concludere, possiamo quindi affermare che, se tutti questi problemi venissero risolti o attenuati, il fotovoltaico potrebbe diventare per l'Italia la fonte principale per la transizione energetica, che porterebbe sia ad essere sempre più indipendente dall'importazione di gas che a creare una nuova filiera produttiva e con essa tutti i vantaggi economici e sociali che ne derivano.

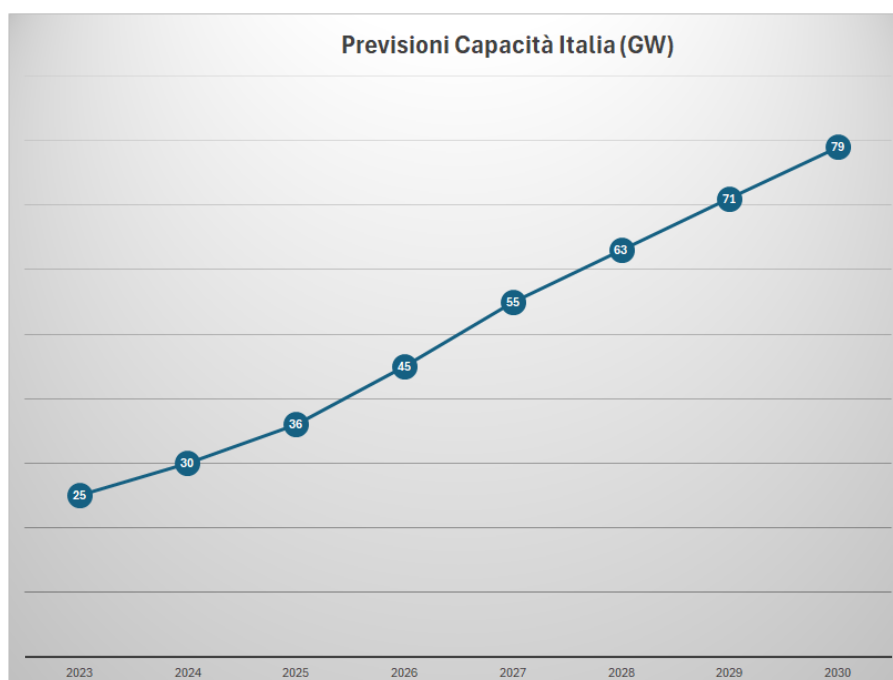


Figura 3.10: Previsioni dell'andamento di crescita della capacità fotovoltaica in Italia

Fonte: Gestore dei Servizi Energetici (GSE) 2023

3.6 Beni sostituti o complementari

A valle della sezione riguardante l'analisi della domanda nel mercato fotovoltaico, è opportuno valutare l'impatto di altri beni o servizi come i beni complementari, che arricchiscono il servizio base di produzione e utilizzo di energia elettrica di origine solare con ulteriori miglioramenti che portano il consumatore ad usufruire di un servizio sempre più completo e funzionale. Non

si può, però, trascurare la presenza e l'importanza dei beni sostituti, ovvero tutti quei beni e servizi che sfruttano le debolezze del settore, cercando di proporre un'alternativa che fornisca sia la richiesta base che i servizi supplementari necessari affinché il consumatore possa giudicarla superiore rispetto all'offerta principale, come è nel nostro caso l'energia fotovoltaica.

3.6.1 Principali beni complementari nel settore fotovoltaico

Analizzando la struttura un impianto fotovoltaico (Figura 12) nella sua completezza, si nota che esso è costituito da alcuni elementi imprescindibili affinché il servizio di produzione energetica e utilizzo dell'energia prodotta sia garantito. Appartengono a questo gruppo i pannelli solari necessari alla ricezione della radiazione solare, la loro struttura di sostegno, perché possano essere orientati nel modo corretto per massimizzare l'area di assorbimento delle radiazioni, il sistema di cablaggio per consentire il passaggio della corrente prodotta nella rete domestica o di distribuzione pubblica, e infine l'inverter, un elemento elettronico di fondamentale importanza in quanto permette di trasformare la corrente elettrica continua prodotta dai pannelli solari in corrente elettrica alternata, compatibile con la struttura delle reti elettriche domestiche. Esso rappresenta quindi una parte importante dell'impianto, senza la quale l'energia prodotta si potrebbe solo immagazzinare ma non utilizzare. Tuttavia, il servizio di base fornito dall'impianto può essere migliorato da numerosi altri beni complementari, che svolgono il compito di migliorare il servizio, andando a colmare delle zone nelle quali il servizio originario non ha modo di operare, consentendo quindi un miglioramento dell'esperienza per gli utenti. Passando in rassegna alcuni dispositivi annoverati come complementari, il più diffuso è il sistema di accumulo: esso, infatti, consente di immagazzinare l'energia in eccesso prodotta dai pannelli solari, con lo scopo di utilizzarla in un momento della giornata nel quale la produzione è scarsa o nulla (ad esempio di sera o giornate temporalesche), ma anche di garantire indipendenza energetica, permettendo di ridurre l'utilizzo di energia prelevata dalla rete tradizionale, e di fruire dell'energia autoprodotta anche in momenti di blackout o guasti alla rete di distribuzione. I sistemi di accumulo possono essere di tipologie differenti, a seconda del materiale del quale sono costituiti: esistono, infatti, sistemi costituiti da batterie a litio, caratterizzati da elevata efficienza, lunga durata e un ridotto impiego di spazio, ma anche batterie piombo, più economiche ma meno prestanti in termini di durata e di ingombro. Un'altra possibile soluzione è quella di integrare il sistema di accumulo con l'inverter, in modo da ottimizzare il rendimento e la liberazione nella rete di eventuale energia in eccesso. Oltre al sistema di accumulo, sono presenti diversi altri elementi complementari: ad esempio, in contesti nel quale l'impianto può essere soggetto a fenomeni di ombreggiatura che ne possono compromettere la qualità e la quantità della produzione energetica, non è raro trovare dei componenti come gli ottimizzatori di potenza, dei dispositivi che, se collegati ai pannelli permettono di massimizzare la produzione anche in situazioni caratterizzate non solo da ombreggiamenti, ma anche da orientamenti differenti tra moduli dello stesso

impianto o contesto di locazione non esattamente adatto alla corretta ricezione delle radiazioni solari. Inoltre, in questi contesti, si può constatare anche la presenza di strutture aggiuntive, atte a modificare l'orientamento dei pannelli a seconda del periodo dell'anno, garantendo la massima ricezione anche nelle stagioni con sole basso. Ponendo particolare attenzione sul contesto domestico, è sempre più frequente constatare la presenza di colonnine di ricarica per auto elettriche come bene complementare di un impianto fotovoltaico, in quanto permettono di sfruttare l'energia prodotta per alimentare la mobilità elettrica, tema fondamentale nel contesto della sostenibilità. Infine, è frequente anche l'utilizzo di software di monitoraggio e gestione elettrica degli impianti, che consentono di monitorare costantemente la produzione e di programmare interventi o manutenzioni al fine di ottimizzare la produzione.

3.6.2 Principali beni sostituti del settore fotovoltaico

In un contesto in cui l'energia prodotta attraverso il settore fotovoltaico costituisce circa il 7% del totale prodotto, è evidente che, oltre ai beni complementari, anche i beni sostituti hanno un ruolo centrale nell'andamento della domanda fotovoltaica. Con questa accezione vengono infatti indicate tutte le alternative tecnologiche che consentono di soddisfare lo stesso bisogno utilizzando tecniche e dispositivi alternativi. I beni sostituti sono raggruppabili in due categorie differenti: le fonti energetiche tradizionali non rinnovabili e le fonti energetiche rinnovabili. A livello di composizione energetica, la Figura 3.11 mostra che le fonti tradizionali non rinnovabili costituiscono ancora il mezzo di approvvigionamento energetico principale, nonostante la tendenza sia in netto calo: ad oggi l'energia elettrica proveniente dalla rete di distribuzione nazionale, che viene prodotta nelle grandi centrali utilizzando principalmente risorse come i combustibili fossili (gas, carbone o petrolio), che costituiscono la risorsa con la quale viene prodotto circa il 60% del fabbisogno energetico totale (International Energy Agency 2025), dato che, però, è destinato a subire una drastica diminuzione nei prossimi anni. Una voce rilevante nelle fonti tradizionali è anche l'energia nucleare, che rappresenta circa il 10% dell'energia prodotta globalmente, valore destinato a restare costante in quanto non influenzato da trend né accrescitivi né diminutivi (International Energy Agency 2025). In alternativa, sono assimilabili anche come fonte tradizionale i generatori funzionanti attraverso gasolio o metano, che producono corrente elettrica alimentando un motore che utilizza il combustibile per produrre energia. Oltre alle fonti tradizionali, vengono annoverate tra i beni sostituti anche le fonti energetiche rinnovabili che stanno avendo ampia diffusione specialmente per uso domestico o industriale: tra queste, la più impattante è l'energia idroelettrica (circa 14% del fabbisogno energetico globale (Aenert Energy News 2025), che sfrutta la potenza dei corsi d'acqua per azionare delle turbine generatrici di energia elettrica. Un altro bene sostituto del settore fotovoltaico è rappresentato dall'energia eolica (circa il 9% del totale energetico prodotto), la quale può anche essere prodotta su piccola scala attraverso un impianto mini-eolico che utilizza il vento per azionare le pale

di una turbina, la cui rotazione attiva un generatore elettrico produttore di energia in corrente continua, trasformabile in alternata (e quindi utilizzabile in contesti industriali o domestici) tramite un inverter (Gestore dei Servizi Energetici (GSE) 2012). Infine, tra le fonti rinnovabili in crescita, ma ancora di nicchia che costituiscono alternative al fotovoltaico, vi sono le biomasse, ossia materie organiche di origine animale o vegetale che possono essere usate come combustibile per la produzione di energia. Questo processo può avvenire sia per combustione diretta, ovvero bruciando la biomassa e utilizzando il calore prodotto per riscaldare direttamente acqua e ambienti, ma anche per digestione anaerobica (le biomasse vengono fatte fermentare con batteri in assenza di ossigeno per produrre biogas) o gasificazione (si riscalda la biomassa con poco ossigeno producendo syngas, una miscela di CO, H₂ e CH₄, successivamente bruciato per produrre energia e calore) (Gestore dei Servizi Energetici (GSE) 2021). Oltre alle biomasse, sono in crescita anche gli impianti di tipo solare termico (ENEA 2018), da non confondere con quelli fotovoltaici: in un impianto solare termico, infatti, la radiazione solare non viene raccolta da un pannello fotovoltaico, bensì da un connettore, che svolge la funzione di assorbitore e la converte in calore necessario a riscaldare un fluido termovettore (acqua o glicole) che, attraverso una rete idraulica finirà in un serbatoio nel quale verrà conservata fino a che il calore al suo interno verrà passato tramite uno scambiatore di calore all'acqua sanitaria.

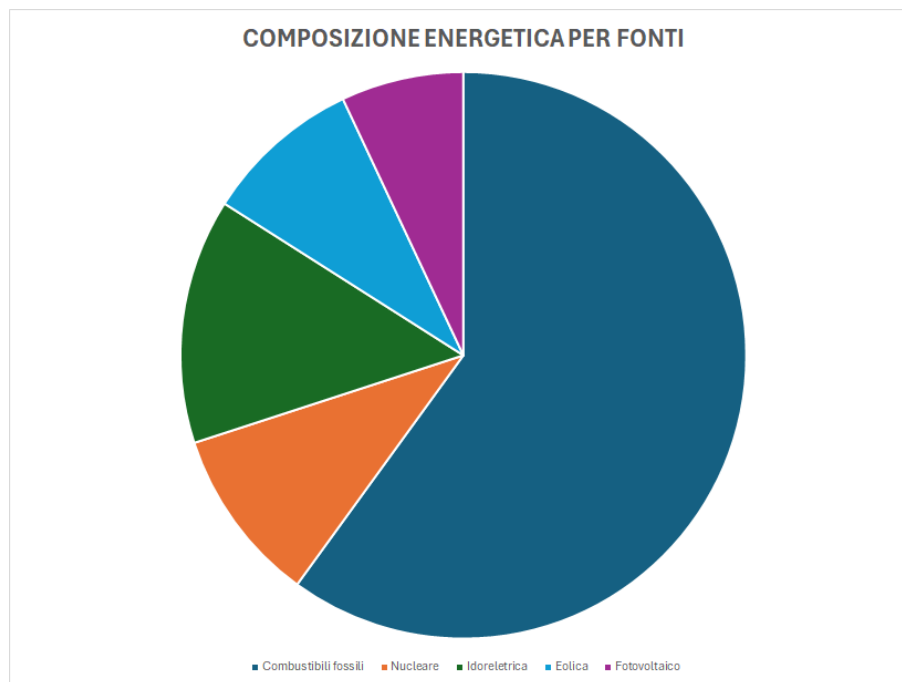


Figura 3.11: Composizione del fabbisogno energetico a seconda delle fonti di produzione

Fonte dati: Aenert Energy News 2025 International Energy Agency 2025

Analisi dell'offerta

4.1 Catena del valore

La grande espansione che il settore fotovoltaico ha avuto è sicuramente frutto anche del lungo e articolato processo industriale che è alla base del suo funzionamento. La sua catena del valore è infatti costituita da numerose fasi ed è regolata da dinamiche regolatrici dei rapporti tra i vari attori. Nella sua configurazione più diffusa, la catena del valore del settore fotovoltaico si basa in partenza sul silicio cristallino, e le varie fasi vengono distinte tra fasi upstream (produzione e fornitura di materie prime o materiali di base) altamente specializzate, tra le quali vi sono l'estrazione e la raffinazione delle materie prime ma anche la produzione di semilavorati come silicio e wafer. A questi passaggi seguono delle fasi midstream (trasformazione dei materiali di base in prodotti chiave), caratterizzate da un altissima intensità tecnologica, come la fabbricazione delle celle e dei vari componenti dell'impianto, congiuntamente all'assemblaggio dei moduli. Per concludere, la catena del valore presenta delle fasi downstream (fasi di installazione, utilizzo dei servizi e riciclo) dedicate sia all'installazione del sistema che alle attività di gestione e utilizzo di esso, fino al suo fine vita e il conseguente processo di riciclo. Ognuna di queste fasi contribuisce in maniera indipendente al costo totale che alla qualità del prodotto finale, così come ognuna di esse è soggetta a vincoli differenti in base all'andamento del mercato, ma anche alle tecnologie usate e al grado di sviluppo logistico che le caratterizza.

4.1.1 Fasi upstream

Come tutte le catene del valore, anche quella del fotovoltaico ha origine dalla fase di approvvigionamento delle materie prime, determinanti per la sostenibilità economica del settore. La risorsa più critica è rappresentata dal silicio metallurgico, essendo esso la base per le successive operazioni di fabbricazione di lingotti e wafer. Per ottenere il silicio è necessario partire dalla silice (SiO_2), e lavorarla attraverso una serie di processi metallurgici ad alta intensità energetica. Accanto al silicio altre materie prime importanti sono il rame (per connessioni elettriche e cablatura dell'impianto), l'argento (per la metallizzazione delle celle), ma anche alluminio e acciaio (per telai e strutture dei moduli). A questi materiali di base si aggiungono anche altri polimeri

tecnici che il vetro solare ad alta trasmittanza, utili per la protezione e per l'efficienza dei moduli fotovoltaici (I. E. Agency 2022b).

Produzione del polisilicio

Successivamente all'approvvigionamento delle materie prime, la prima vera fase industriale del processo è rappresentata dalla produzione del polisilicio, materiale che viene considerato di congiunzione tra le materie prime e i componenti semiconduttori di base. Il processo di produzione ha come input il silicio metallurgico, che viene purificato attraverso il processo Siemens (I. E. Agency 2022b), durante il quale i composti clorati del silicio vengono decomposti a temperature elevatissime per depositare del silicio puro su delle barre riscaldate. In alternativa a questo processo, particolarmente dispendioso dal punto di vista sia energetico che economico, negli ultimi anni si è diffuso il metodo del Letto fluido (Fluidized Bed Reactor, FBR), una tecnica nuova che consente di ottenere dei granuli di polisilicio utilizzabili ugualmente nelle fasi successive. Grazie a questa fase è quindi possibile ottenere del polisilicio con livelli di purezza prossimi al 100%, requisito indispensabile per la massimizzazione delle prestazioni dell'impianto. Da contraltare a ciò, però, vi è il fatto che, data la grande quantità di energia necessaria per lo svolgimento dei passaggi (circa 60 KWh di energia per chilogrammo di polisilicio, con impatti notevoli sulle emissioni di CO₂), non è fattibile localizzare gli impianti di produzione di polisilicio ovunque, bensì bisogna scegliere zone nelle quali è possibile ottenere una grande disponibilità di energia a basso costo, il che ha favorito la concentrazione degli impianti in specifiche aree del globo, in primis la Cina.

Produzione di lingotti e wafer

Dopo aver ottenuto il polisilicio, la successiva fase della catena del valore consiste nel trasformare esso prima in lingotti e poi in wafer, portando così il materiale ultra-puro a diventare il supporto fisico sul quale verranno realizzate le celle solari. Nel caso di lingotti monocristallini (costosi ma molto efficienti), il primo passaggio è la cosiddetta fase di cristallizzazione del polisilicio, nel quale si utilizza il processo di Czochralski, una tecnica che consiste nell'immergere un piccolo "seme" di silicio in un contenitore con all'interno del silicio fuso e successivamente viene estratto lentamente, generando così un cristallo unico di dimensioni notevoli (Tech 2020). Nel caso si lavorasse invece con lingotti policristallini (più economici ma meno efficienti), questi vengono ottenuti attraverso una colata di silicio liquido all'interno di appositi stampi. Una volta ottenuti i lingotti, questi vengono tagliati in wafer sottili da seghe a filo diamantato. Lo spessore dei wafer nel tempo si è ridotto da oltre 200 micron ad una misura attuale che oscilla attorno ai 150 micron, permettendo quindi di ridurre il consumo del materiale e aumentare la competitività economica del settore (I. E. Agency 2022b). Di contro, è stato dimostrato che il progressivo assottigliamento dei wafer ha portato a numerose complicazioni sia legate alla fra-

gilità e manipolabilità del materiale, che ad una dipendenza dalle attrezzature di taglio ad alta precisione, necessarie per minimizzare lo spreco di silicio durante le fasi di taglio, che costituisce uno dei fattori più dispendiosi di tutta la catena del valore, nonostante in questi ultimi anni si sono sviluppati numerosissimi processi di recupero degli scarti di silicio. Tutte queste caratteristiche di processo appena descritte rendono questo step della catena del valore una delle fasi più strategiche in ambito economico, ambientale e tecnologico.

4.1.2 Fasi midstream

Con la produzione delle celle fotovoltaiche termina la sezione delle fasi upstream della catena del valore, un percorso caratterizzato da processi ad alta complessità tecnologica ed operativa, per passare alla successiva sezione, quella delle fasi midstream. In questa area i processi sono costituiti da operazioni altamente dispendiose dal punto di vista non solo tecnologico, ma anche economico ed operativo.

Produzione delle celle fotovoltaiche

Il terzo step della catena del valore è rappresentato dalla produzione delle celle fotovoltaiche a partire dai wafer di silicio. Data la numerosità e la complessità delle operazioni insite nei vari passaggi, questa fase è considerata quella centrale nella catena del valore, ossia quella nella quale la differenza di valore tra input e output di processo è più marcata. La prima operazione del processo di produzione delle celle fotovoltaiche consiste nel trattamento superficiale dei wafer, che, dopo essere stati puliti da eventuali impurità residue delle operazioni di taglio, vengono trattati mediante testurizzazione, un processo chimico grazie al quale si formano delle microstrutture capaci di massimizzare l'assorbimento superficiale della luce solare (consente riflessioni multiple all'interno del materiale, aumentando la probabilità della luce di essere assorbita e quindi trasformata in corrente elettrica) e allo stesso tempo minimizzare le perdite per riflessione. La testurizzazione ha caratteristiche diverse a seconda che il silicio sia monocristallino o policristallino: in caso di monocristallino le incisioni usate sono di tipo alcalino, mentre per il silicio policristallino sono incisioni acide. Successivamente vi è la fase di drogaggio, durante la quale si introduce un elemento "drogante" (fosforo per le celle di tipo n e boro per le celle di tipo p) che penetra nella struttura del wafer attraverso una diffusione termica a temperature elevatissime (tra 800°C e 900°C) o mediante impianto ionico. Attraverso questo processo si crea la giunzione p-n, punto centrale del funzionamento della cella, grazie alla quale vengono separate le cariche generate dalla luce assorbita (Tech 2020). Alla fine del processo, le parti superflue vengono rimosse tramite un'incisione chimica e solo dopo questa fase si passa al successivo processo di passivazione, con il quale vengono applicati alla superficie dei rivestimenti antiriflesso al fine di ridurre le perdite ottiche e ricombinazioni superficiali degli elettroni, svolgendo quindi la

funzione di passivante. Successiva alla passivazione, vi è la fase di metallizzazione, fondamentale in quanto durante essa si serigrafano sulla parte frontale delle griglie metalliche e si aggiunge una superficie di contatto continuo sul retro. Questi elementi sono costituiti da rame o pasta d'argento, cotti ad alta temperatura per permettere la formazione dei contatti ohmici, e presentano contatti metallici sottili per minimizzare l'ombreggiamento. Una volta terminata la fase di metallizzazione, l'ultima parte del processo di creazione delle celle fotovoltaiche consiste nel sottoporre il prodotto delle precedenti fasi ad una serie di test elettrici per misurarne i parametri fondamentali per il corretto funzionamento, come la tensione a circuito aperto, la corrente di corto circuito e l'efficienza, per poi classificare le celle appena prodotte in categorie differenti in base ai risultati ottenuti. A questo processo di produzione delle celle appena descritto si possono aggiungere ulteriori fasi volte a migliorare ulteriormente alcuni aspetti funzionali delle celle: infatti, alla cella PERC (Passivated Emitter Real Cell), che ha dominato il mercato nell'ultimo decennio, si sono affiancate nuove tipologie che costituiscono tecnologie in rapida espansione, tra le quali le celle TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact), HJT (HeteroJunction Technology) e IBC (Interdigitated Back Contact) le quali, variando il processo base con passaggi supplementari (doppia passivazione, strati amorfi, contatti posteriori..) riescono e produrre un aumento di efficienza dell'ordine del 25% rispetto al prodotto leader di mercato (ISE 2016).

Produzione componenti Balance of Plant System (BOS)

Con la dicitura Balance Of System si indicano tutti gli elementi di un impianto fotovoltaico che, pur non facendo direttamente parte del modulo solare, sono fondamentali per garantirne il corretto funzionamento, la sicurezza e l'integrazione della produzione elettrica sia nei sistemi di accumulo che nella rete. Appartengono a questa classe tutte le categorie di inverter (centralizzati, string inverter e micro inverter, ognuno di essi con vantaggi specifici in termini di affidabilità e prestazioni), i power optimizer, ossia dispositivi elettronici che ottimizzano la produzione di ogni modulo dell'impianto, ma anche le strutture di supporto e ancoraggio (garantiscono resistenza meccanica e stabilità a seconda della superficie di installazione dell'impianto), e i sistemi di cablaggio e sicurezza elettrica, che prevengono eventuali situazioni di cortocircuito, incendi o sovratensioni che possono scaturire in importanti pericoli a persone e infrastrutture (NREL 2021). Questa fase è importantissima all'interno della catena del valore, dato che i BOS rappresentano circa il 40% del costo totale di un impianto, specialmente se residenziale. Inoltre, è proprio su di essi che si sta concentrando un importante ramo di ricerca del settore, al fine di generare futuri prodotti che permettano una maggiore digitalizzazione per le installazioni e il monitoraggio, ma anche un ciclo vita più consistente e meno dipendente da manutenzioni, che comporterebbe una netta riduzione dei costi (NREL 2021).

4.1.3 Fasi downstream

Successivamente alle fasi midstream, che permettono di dare un quadro definito circa tutti i componenti necessari al funzionamento dell'impianto fotovoltaico, si passa all'ultimo gruppo di fasi, le cosiddette fasi downstream, che rappresentano tutte le attività di installazione, distribuzione e utilizzo finale dell'impianto, inclusa la fase fondamentale del riciclo una volta che i vari componenti giungono alla fine del loro ciclo vita.

EPC e installazione degli impianti

Una volta completate le produzioni di tutti i singoli pezzi presenti nell'impianto, la prima fase downstream è rappresentata dalle procedure di EPC (Engineering, Procurement & Construction). Sotto questo acronimo sono infatti racchiuse tutte le attività della sfera della progettazione tecnica, fornitura dei componenti e installazione dell'impianto, operazioni che richiedono conoscenze ingegneristiche, logistiche e gestionali. In ordine di esecuzione, la prime attività da svolgere riguardano il ramo dell'Engineering, ossia la progettazione ingegneristica dell'impianto. In questo passaggio si definiscono infatti tutte le caratteristiche che l'opera deve avere in termini di dimensionamento attraverso parametri come l'irraggiamento solare, i vincoli normativi e le caratteristiche dell'area di costruzione, il tutto sempre tenendo a mente le esigenze del cliente finale (NREL 2021). Una volta definite queste variabili, si passa alla scelta della configurazione elettrica e dei componenti che meglio si sposano con l'idea di impianto da realizzare, al fine di massimizzare il rendimento energetico dell'opera e di ridurre i costi di manutenzione. La componente successiva della fase di EPC riguarda il Procurement, ossia tutto ciò che concerne l'approvvigionamento dei materiali. In queste operazioni si definisce una nuova figura, quella del EPC contractor, un ruolo strategico necessario per selezionare tra le varie proposte, quelle dei fornitori affidabili e redigere con essi dei contratti volti ad ottenere dei materiali conformi ai vari standard di sicurezza e qualità, nonché ad ottimizzare la supply chain garantendo il rispetto del budget e dei tempi di consegna. Dopo aver concluso queste operazioni, lo step finale della fase di EPC è incentrato sulla Construction, termine che racchiude tutte le operazioni di posa delle strutture sui supporti, installazioni dei moduli e dei componenti di BOS, nonché di cablaggio elettrico e collegamento alla rete. Di particolare importanza sono anche le operazioni successive, volte a verificare la conformità dell'impianto appena installato sia con i valori limite dettati dalle normative, che con i parametri stabiliti in fase di progettazione.

Operazioni di controllo e manutenzione (O&M)

Una volta terminata l'installazione dell'impianto e reso esso attivo, è essenziale accompagnare il normale funzionamento con periodiche operazioni di controllo e manutenzione volte a garantire la massimizzazione delle prestazioni e la sostenibilità economica nel lungo periodo, consi-

derato che la vita utile di un impianto fotovoltaico di medio-piccola dimensione è stimata in un intervallo compreso tra 25 e 30 anni. Analizzando le varie mansioni appartenenti ai due macro-raggruppamenti di questa fase, si note che nell'area delle operazioni di controllo sono comprese tutte le attività di monitoraggio delle prestazioni dell'impianto sia attraverso metodi tradizionali riguardanti il controllo manuale, che attraverso i nuovi sistemi digitali e le piattaforma SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), il cui utilizzo consente di raccogliere e processare dati in tempo reale riguardanti la produzione energetica e le variabili prestazionali dell'impianto come tensioni o correnti, consentendo quindi di disporre nell'immediato di quadri di dati e grafici capaci di identificare eventuali anomalie o cali performativi (International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS) 2024). È inoltre sempre più diffusa l'integrazione di queste fasi con l'intelligenza artificiale, in grado di anticipare il manifestarsi di un'anomalia e consentire la programmazione di un intervento preventivo volto ad evitare il verificarsi del problema. Tutti gli interventi di questo tipo rientrano, però, nella seconda macroarea della fase, ossia quella riguardante le operazioni di manutenzione, che può essere successivamente divisa in due sottogruppi di attività, quelle preventive e quelle correttive. La manutenzione preventiva, come spiegato in precedenza è volta ad evitare la futura manifestazione di un problema garantendo così un alto rendimento per tutta la durata del ciclo vita dell'impianto. Operazioni di questo tipo possono essere le ispezioni periodiche dei collegamenti elettrici, ma anche le pulizie dei moduli e le verifiche riguardanti gli elementi strutturali o i BOS. La manutenzione correttiva, invece, si rende necessaria nel momento in cui si manifesta un guasto di un componente o un'anomalia prestazionale dell'impianto, che necessita di un intervento per tornare a performare correttamente. In media, gli interventi più comuni riguardano guasti a componenti come gli inverter, i cablaggi o altri componenti principali, che possono essere sia riparati che sostituiti a seconda dell'entità del danno che viene individuato attraverso tecniche basate su raggi infrarossi o elettroluminescenza (International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS) 2024).

Riciclo e fine vita dei moduli fotovoltaici

Anello conclusivo della catena del valore è rappresentato dalle procedure di riciclo dei componenti dell'impianto, una volta che questi vengono danneggiati o raggiungono la fine del loro ciclo di vita. Questa fase avrà nel tempo sempre maggiore importanza, data la recente stima affermando il fatto che, a causa dell'aumento delle installazioni, entro il 2030 sarà necessaria una filiera specializzata per il recupero e riutilizzo di questo tipo di rifiuti. Negli impianti attuali, un modulo fotovoltaico è composto per il 70-75% da vetro, il 10-15% da alluminio, il 3-5% da polimeri, e in piccola parte da materiali considerati preziosi come argento e rame (ISE 2025). Data quindi questa varietà di materiali, è fondamentale per la valorizzazione economica del riciclo, riuscire a differenziare il più possibile tutti i componenti, così che ognuno di essi possa essere

destinato al suo percorso di riciclo specifico. Per avere un'ottima differenziazione, ad oggi vi sono differenti tecniche che consentono di avere un risultato efficiente: tra queste spiccano processi di tipo meccanico, come separazione magnetica, frantumazione o macinazione, ma anche processi termici (pirolisi, utili per rimuovere i polimeri incastonati) e chimici (lisciviazione, spesso usata per l'estrazione dei materiali di valore). In Europa il tema del riciclo dei moduli fotovoltaici è regolamentato da diverse normative come la direttiva RAEE (2021/19/UE), la quale annovera i moduli fotovoltaici tra le apparecchiature elettriche ed elettroniche, destinando essi anche allo stesso percorso di smaltimento (I. E. Agency 2022b).

4.2 Attori principali

La catena del valore appena descritta delinea il processo di formazione di un impianto fotovoltaico come un iter estremamente complesso, nel quale ogni singola fase possiede peculiarità che la rendono un micro-settore caratterizzato da dinamiche intrinseche indipendenti dalle fasi sia precedenti che successive. Si può quindi affermare che, all'interno del processo che definisce l'offerta del settore fotovoltaico operano attori profondamente diversi tra loro sia per dimensioni che per specializzazioni. Tra le figure centrali identifichiamo sia i produttori delle materie prime e delle celle necessarie alla costruzione dell'impianto, ma anche le aziende che realizzano componentistica generale, tra cui pannelli, inverter e sistemi di accumulo, fino ad arrivare alle realtà aziendali che si occupano di EPC(Engineering, Procurement & Construction) e sviluppatori vari. Per comprendere al meglio le dinamiche intrinseche del settore, ognuno di questi rami va analizzato in maniera indipendente dagli altri, al fine di individuare i player principali e le dinamiche di mercato.

4.2.1 Attori principali fasi upstream

Il primo passo nel percorso produttivo inizia con la produzione sia dei materiali necessari alla costruzione degli impianti che delle celle fotovoltaiche, che svolgono il ruolo di materie prime dell'impianto. In questo ramo la situazione del mercato è caratterizzata da una forte concentrazione geografica e industriale: come in gran parte delle fasi di produzione, la Cina detiene il ruolo di leader tecnologico, seguito da Stati Uniti e paesi Europei. In particolare, nel settore di produzione di materie prime come polisilicio e le prime trasformazioni in lingotti e wafer, tra i pochi player che dominano il mercato, occupano posizioni di spicco sia l'impresa cinese GCL-Poly che la tedesca Wacker Chemie.

GCL-Poly Energy Holdings Unlimited



Figura 4.1: Logo GCL-Poly Energy Unlimited

Fonte: Limited 2025

GCL-Poly Energy Unlimited è un colosso cinese operante nel settore delle energie rinnovabili e, in particolare nell'area della produzione di materiali per il fotovoltaico. Appartenente al gruppo Golden Concord Group, una holding attiva dal 1996, si è affermato nel tempo come uno dei principali produttori mondiali di polisilicio e wafer, gli elementi alla base dei moduli fotovoltaici. Sin dai primi anni 2000, l'azienda ha avuto una rapida crescita fino a diventare uno dei fornitori principali di materia prima fotovoltaica al mondo, con specializzazione nella produzione di polisilicio ad alta purezza e wafer monocristallini e multicristallini. Questo fenomeno si è verificato sia a causa dell'aumento della domanda globale che per le condizioni favorevoli che lo Stato Cinese consentiva di avere per le imprese operanti nel settore energetico: infatti, il governo cinese, infatti, attraverso interventi indiretti (tariffe agevolate o sussidi di carattere regionale) permette di differenziare il costo dell'energia, consentendo quindi alle aziende operanti in settori ad alto fabbisogno energetico di accedere alla risorsa ad un costo inferiore per garantire uno sviluppo rapido e la massima efficienza. Tuttavia, nell'ultimo periodo questa posizione di leadership che GCL-Poly ha occupato è stata messa fortemente in discussione da un pesante periodo di crisi dovuto sia a variabili insite nel settore come il prezzo fluttuante del silicio e la sovracapacità settoriale, ma anche dagli effetti collaterale dei forti investimenti compiuti negli anni precedenti, che hanno generato una situazione debitoria elevata. Tutto ciò si è tradotto in una serie di annate caratterizzate da utili molto bassi e pesanti perdite, che hanno spinto il management a ricalibrare l'organizzazione dell'azienda, riorganizzando le attività al fine di attrarre nuovi capitali per ottenere rapida liquidità (Limited 2025). Nonostante ciò, la GCL-Poly ha comunque mantenuto una posizione importante nel settore di competenza, soprattutto grazie al predominio del settore industriale cinese e le politiche a sostegno di esso varate dal governo di Pechino.

Wacker Chemie



Figura 4.2: Logo Wacker Chemie

Fonte: Chemie 2024

Uscendo dalle complesse dinamiche del mercato cinese, che nonostante tutto continua ad essere leader del ramo concernente la produzione delle materie prime fotovoltaiche, un'azienda che detiene una buona quota di mercato è la tedesca Wacker Chemie, con sede a Monaco di Baviera, fondata nel 1914 inizialmente allo scopo di produrre

sostanze chimiche di base per i processi industriali, come acidi o solventi. Nei successivi decenni, l'azienda ha avviato un percorso di diversificazione che l'ha portata ad addentrarsi in mercati alternativi come quello del silicio, dei semiconduttori e delle biotecnologie, tanto da essere considerata al giorno d'oggi come una delle massime aziende produttrici di silicio ad alta purezza al mondo, un ruolo chiave alla base della catena del valore del settore fotovoltaico, dove recita il ruolo di antagonista delle grandi potenze industriali dell'Oriente. Dal punto di vista economico, i risultati degli ultimi esercizi non hanno fatto emergere un andamento costante, bensì al 2022 dove si è registrato un solido fatturato di 8 miliardi di euro, sono seguiti gli esercizi 2023 e 2024 dove la situazione è peggiorata (Chemie 2024). Questo si spiega con la continua fluttuazione dei parametri fondamentali del mercato e, in particolare della domanda globale e del prezzo di mercato del silicio, che hanno portato Wacher Chemie ad avallare dei piani di ristrutturazione finanziaria per evitare di incappare in periodi di crisi finanziaria che avrebbero potuto mettere in discussione lo status della società. Osservando il contesto fuori dal core business, la Wacher Chemie si distingue dagli altri competitor principalmente per una spiccata sensibilità ambientale, evidente in molti progetti e obiettivi che si pone, su tutti il Net Zero By 2045, con il quale l'azienda si impegna ad avviare processi volti sia alla decarbonizzazione che all'ecosostenibilità in generale (Reuters 2025).

4.2.2 Attori principali fasi midstream

Nell'ambito delle fasi midstream, l'andamento visto nel precedente blocco non cambia, con la Cina che continua ad essere leader incontrastato del mercato che in questo caso riguarda la produzione di celle fotovoltaiche e dei componenti BOS che completano l'assetto dell'impianto. Al predominio cinese cercano di costituire delle alternative alcune realtà europee ed americane.

LONGi Green Energy



Figura 4.3: Logo LONGi Green Energy

Fonte: L. G. Energy 2023

LONGi-Green Energy Technology, fondata nel 2000 nella regione cinese dello Shaanxi, muove i primi passi inizialmente nel settore del polisilicio monocristallino, allora un'attività di nicchia rispetto al silicio policristallino. Con la progressiva discesa dei costi e i nuovi vantaggi offerti dal monocristallino, la scelta si rivelò vincente, tanto da portare l'azienda ad una posizione di leadership globale in questo settore, venendo considerata a tutti gli effetti iniziatrice di una nuova tendenza che sarebbe diventato dominante. Dal 2017 l'azienda decide di allargare le proprie competenze,

spostandosi anche sulla produzione sia di wafer che di celle fotovoltaiche, diventando anche qui in pochissimo tempo il più grande produttore presente sul mercato, essendo riusciti a sfruttare al massimo le competenze sviluppate nei passaggi precedenti della catena del valore basata sulle tecnologie del polisilicio monocristallino (L. G. Energy 2023). Un altro punto di forza è inoltre costituito dai nuovi investimenti che LONGi sta facendo nell'ambito dell'idrogeno verde e dei sistemi integrati, puntando così a diversificare il business e ad affermarsi sempre più come leader mondiale del settore. In ambito finanziario, LONGi nel 2022 ha registrato dei ricavi ingenti, pari a circa 17 miliardi di euro con ampi margini di guadagno, riuscendo a sfruttare al massimo le economie di scala derivanti dalla grande crescita della domanda (L. G. Energy 2023). Tuttavia, nel successivo biennio, la sovracapacità produttiva ha portato ad un crollo dei prezzi delle celle fotovoltaiche, comprimendo così i margini di profitto. A questo va anche considerato il fattore della concorrenza, sia interna (Tongwei, Jinko, JA Solar), che esterna, costituita da dazi e politiche proibizioniste dei paesi europei e degli Stati Uniti (L. G. Energy 2023).

Sungrow Power Supply



Figura 4.4: Logo Sungrow Power Supply

Fonte: Sungrow Power Supply Co. 2024

Nell'ambito della produzione dei componenti BOS, invece, un'azienda che detiene un'importante quota di mercato è la Sungrow Power Supply, fondata in Cina nel 1997 e fin da subito focalizzata completamente sulla produzione di dispositivi appartenenti a impianti fotovoltaici, in particolare inverter, senza i quali la corrente continua prodotta dai pannelli non sarebbe utilizzabile nelle reti elettriche, impostate in regime di corrente alter-

nata. Grazie ad un rapido percorso di crescita, in poco tempo Sungrow è diventata leader del settore prima in Cina e poi a livello globale, nonostante la concorrenza di altre grandi aziende come Huawei, Fimer e SMA Solar Technology. Sul piano economico, la recente crescita della domanda, ha portato i bilanci di Sungrow ad avere performance molto solide, in particolare nel 2023, dove l'esercizio si è chiuso con un utile di circa 8 miliardi di euro, con un utile netto incrementato di circa il 150% rispetto all'anno precedente (Sungrow Power Supply Co. 2024), dato rafforzato dalla grande presenza anche nel mercato estero, pur mantenendo comunque la filiera produttiva interamente in Cina.

4.2.3 Attori principali fasi downstream

A differenza dei contesti analizzati fino ad ora nelle fasi upstream e midstream, per le fasi downstream il mercato appare profondamente frammentato, senza un vero leader a livello globale

ma più che altro con alcune realtà aziendali che tendono ad avere il predominio a livello locale. In queste fasi, quindi, coesistono sia le grandi utilities globali che gli sviluppatori indipendenti che operano a livello locale. Tuttavia, la situazione è tutt'altro che definitiva, bensì sarà oggetto di forti cambiamenti nei prossimi anni, in accordo con lo sviluppo tecnologico che si verificherà in ambito di digitalizzazione e gestione professionale degli impianti.

Enel Green Power



Figura 4.5: Logo Enel Green Power

Fonte: Enel 2024

Data la frammentarietà del mercato appena citata, concentrandoci sul mercato europeo e, in particolare italiano, la posizione di leadership del settore è occupata da Enel Green Power, un'azienda appartenente al gruppo Enel dedicata allo sviluppo di impianti basati sulle energie rinnovabili. Fondata nel 2008, ha permesso ad Enel di entrare di diritto nella lista dei grandi player mondiali delle fonti

rinnovabili, anticipando l'attenzione politica e mediatica sull'argomento. Dal punto di vista dell'attività, Enel Green Power incentra il suo operato sulla progettazione, costruzione e gestione di impianti rinnovabili, quindi non solo fotovoltaici, ma anche eolici, idroelettrici e geotermici. Con le sue ramificazioni, è attiva in oltre 20 Paesi e gestisce una produzione energetica che rappresenta una importante percentuale del fabbisogno del Paese nel quale opera (Enel 2024). Oltre a questo, negli ultimi anni Enel Green Power sta ampliando la sua gamma di funzione spingendosi indietro nella catena del valore e cercando così di entrare con forza nel mercato della produzione di moduli fotovoltaici: a tal fine è stata aperta lo stabilimento 3Sun a Catania, un enorme centro di produzione e ricerca volto a creare una tecnologia tale da entrare in concorrenza con il predominio cinese (Power 2025). Tutto ciò è accompagnato da ottime performance economiche, che portano l'azienda ad essere uno dei principali motori di crescita del gruppo Enel: infatti, nei primi nove mesi del 2024, il fatturato ha registrato un valore pari a 94 miliardi di euro, incrementato del 16% rispetto al precedente esercizio, nonostante gli investimenti che risultano essere i più corposi di tutto il settore (Enel 2024).

4.3 Struttura dei costi

La precedente analisi della catena del valore è la base della comprensione dei meccanismi che ruotano attorno all'offerta del settore fotovoltaico: infatti, come è stato descritto, ogni fase della sequenza rappresenta una sorta di "microcosmo" a sé stante, con le proprie caratteristiche e dinamiche regolatrici. Tra questi fattori rientra sicuramente quello dei costi: essi, infatti, sono profondamente diversificati per importanza a seconda della fase che si sta affrontando. È possi-

bile, per facilitare la comprensione, classificarli in macro-gruppi, ognuno dei quali è riassuntivo di una o più specifiche fasi del processo (Figura 4.6).

4.3.1 Costi di fornitura

Il blocco principale dei costi presenti nell'offerta del settore fotovoltaico è sicuramente rappresentato dai costi di fornitura (si stima un impatto di circa il 45% sui costi totali per l'impianto), sotto la cui dicitura sono racchiuse tutte le spese necessarie per produrre i vari componenti che consentiranno di costituire un impianto in grado di produrre e convertire energia elettrica (NREL 2023) . In questo gruppo, la voce di costo più onerosa è utilizzata per la produzione dei moduli fotovoltaici, ossia i pannelli, ossia i collegamenti in serie o in parallelo delle varie celle fotovoltaiche, che vengono poi racchiuse in una struttura rigida e protettiva costituente il pannello. Per questa voce di costo, i valori possono oscillare a seconda di differenti fattori, tra i quali spiccano la tecnologia usata per le celle (silicio monocristallino, policristallino o perovskite) e alcuni parametri di efficienza che si possono verificare, come l'efficienza di conversione, e la durata media del componente. Grande rilievo nel valore dei costi di fornitura hanno anche gli elementi racchiusi sotto il nome di BOS, tra i quali spicca l'inverter, che, data la sua importanza all'interno dell'impianto incide significativamente sul costo iniziale e sull'affidabilità del sistema, appurato che un suo malfunzionamento preclude l'utilizzo a scopo domestico e industriale dell'energia prodotta dall'impianto. Proprio per questo motivo si tende ad allocare per questo prodotto un livello di costo importante, tale da produrre un componente in grado di garantire affidabilità ed efficienza (RatedPower 2023). Altre voce significativa dei costi di fornitura riguarda i sistemi di supporto che, oltre a garantire stabilità e resistenza ai componenti, sono soggetti anche a valutazioni di tipo architettonico ed estetico, specie nel caso di contesti residenziali o cittadini. Ultima voce ingente dei costi di fornitura riguarda le strutture di cablaggio e, più in generale, tutto l'apparato elettrico dell'impianto che, sebbene meno oneroso comparato ad altri elementi, costituisce un punto di notevole interesse dato la sua centralità per i sistemi di sicurezza e di monitoraggio delle prestazioni.

4.3.2 Costi di installazione

Dopo i costi di fornitura, la seconda quota maggiore dei costi è occupata dai costi di installazione. Sotto questa voce sono racchiusi tutti gli esborsi per necessari per svolgere le attività volte a trasformare i materiali forniti in un impianto funzionante. Tra le varie attività annoverate come costi di installazione, normalmente quella più onerosa è rappresentata dai costi per la manodopera specializzata, necessaria per svolgere operazioni delicate come cablaggio elettrico, posa delle strutture o montaggio dei moduli. Essendo quindi fasi cruciali, è richiesto che gli operatori siano qualificati ed esperti, al fine di minimizzare i rischi durante lo svolgimento del lavoro.

Possono essere considerati costi di installazione anche i costi legati alle opere civili e edili che spesso si rendono necessarie per supportare la costruzione dell'impianto, come ad esempio il rinforzo delle coperture nel caso di moduli costruiti su un tetto che, senza questo passaggio non reggerebbe l'ulteriore peso delle installazioni (RatedPower 2023). Fanno parte dei costi di installazione anche quelli destinati al noleggio delle attrezzature specialistiche (gru, ponteggi, mezzi di sollevamento), senza i quali le operazioni di montaggio non potrebbero essere svolte, e anche i costi per la sicurezza sul lavoro, destinati all'acquisto di dispositivi di protezione, formazione del personale lavoratore e applicazione delle misure di prevenzione (NREL 2023).

4.3.3 Costi di progettazione

Un'altra categoria dei costi necessari alla costruzione di un impianto fotovoltaico è rappresentata dai costi di progettazione e per i servizi correlati ad esso, una categoria cruciale in quanto sono associati ad attività indispensabili sia per la messa in esercizio legale dell'opera che per la riduzione dei rischi legati ad eventuali errori di dimensionamento dell'impianto. In ordine di esecuzione, la prima voce è quella dei costi di progettazione preliminare, che inglobano i vari studi di fattibilità dell'opera, tra i quali sono incluse varie simulazioni di produzione, realizzate attraverso software avanzati come PVsyst, che cercano di stimare la produzione annua e il probabile ritorno ottenuto dall'investimento (RatedPower 2023). Segue la fase di progettazione esecutiva: in queste fasi le attività si concentrano sul dimensionamento dei vari componenti (inverter e moduli fotovoltaici), sulla scelta dei cavi per il cablaggio e sull'impostazione dei quadri elettrici. Infine, rientrano nei costi di servizio anche quelli sostenuti per la direzione dei lavori e il coordinamento della sicurezza (gestiti solitamente con figure professionali che assicurano il rispetto della tabella di marcia, del budget e delle norme di sicurezza) e per il disbrigo delle pratiche autorizzative che compongono il complesso iter burocratico, tra le quali compaiono le varie domande ai Comuni di appartenenza, alla rete elettrica e agli enti interessati se si utilizzano politiche di incentivi.

4.3.4 Costi accessori e finanziari

Altra categoria di costo impattante sul prezzo è quella dei costi accessori e finanziari, sotto il cui nome sono raggruppati gli esborsi che incidono sul costo totale dell'investimento, anche se non direttamente connessi alle attività di fornitura dei componenti e installazione di essi. Appartengono a questa categoria le assicurazioni stipulate al fine di garantire la protezione dell'impianto da eventuali imprevisti come guasti elettronici, danneggiamenti atmosferici, furti o incendi. Molto spesso le assicurazioni, oltre che necessarie, costituiscono anche un requisito richiesto dagli istituti di credito per poter accedere ad un finanziamento. Un'altra voce di impatto è rappresentata dai costi da sostenere con i fornitori e necessari ad attivare garanzie plurienna-

li sui componenti principali dell'impianto, ma anche collaudi di essi prima di essere spediti, al fine di fornire agli acquirenti un'ulteriore tutela riguardo la qualità della merce acquistata. In ambito finanziario, invece, i costi inclusi in questa categoria variano a seconda della modalità di acquisizione stabilita al momento della sottoscrizione del contratto di acquisto: ad esempio, in caso di acquisto in leasing finanziario, si generano dei costi finanziari legati a spese di gestione amministrativa e interessi passivi. Analogamente, in caso di leasing operativo o di contratti di PPA, le condizioni economiche variano a seconda della tipologia di impianto che si sta costruendo (RatedPower 2023). Infine, sono costi finanziari anche quelli connessi alle consulenze legali e fiscali, che forniscono un supporto fondamentale per essere sicuri di seguire tutti gli standard stabiliti dagli organi competenti.

4.3.5 Costi di gestione e manutenzione

L'ultima categoria di costi è rappresentata dai costi di gestione e manutenzione: essi sono associati ad attività sia periodiche che straordinarie dislocate su tutto il ciclo vita dell'impianto fotovoltaico, fondamentali per garantire la funzionalità e l'efficienza di ogni elemento, così da mantenere inalterata la redditività dell'opera a lungo termine. In ambito di manutenzione, rientrano tra gli oneri di questa categoria sia le attività di manutenzione ordinaria (interventi di pulizia dei filtri, manutenzione dei fili o degli apparati di sicurezza), che vengono pianificate con largo anticipo e la cui frequenza incide sull'ammontare dei costi di questa categoria, ma anche le attività di manutenzione straordinaria (sostituzione componenti usurati o guasti) che si rendono necessarie in maniera imprevista (U. D. o. Energy 2022). Un ulteriore elemento è rappresentato dai costi di monitoraggio: a seconda del tipo di sistema utilizzato, l'ammontare di questa voce può variare in maniera significativa: si può infatti passare da un costo ridotto per un sistema basico, come un semplice contratto con un ente di servizio pronto intervento, fino ad arrivare a cifre onerose per pacchetti completi che includono monitoraggio remoto sia della sicurezza che delle performance, attraverso l'osservazione di parametri importanti che, attraverso i valori numerici che assumono, descrivono la situazione dell'impianto e consentono attraverso la loro interpretazione di prendere decisioni immediate in caso di valori anomali.

4.4 Barriere all'ingresso del settore fotovoltaico

Gli aspetti dell'offerta del settore fotovoltaico analizzati finora ci hanno restituito l'immagine di un ambito in profonda crescita, nella quale il progresso tecnologico e una crescente sensibilità ambientale hanno creato le giuste condizioni per poter immaginare un futuro di grande espansione anche dal punto di vista economico. Tuttavia, sebbene sembri un contesto nel quale un'azienda possa investire le sue risorse per poter generare un ritorno elevato, l'accesso al settore è ricco di ostacoli. Le dinamiche dell'offerta sono infatti influenzate dalla presenza di ingenti

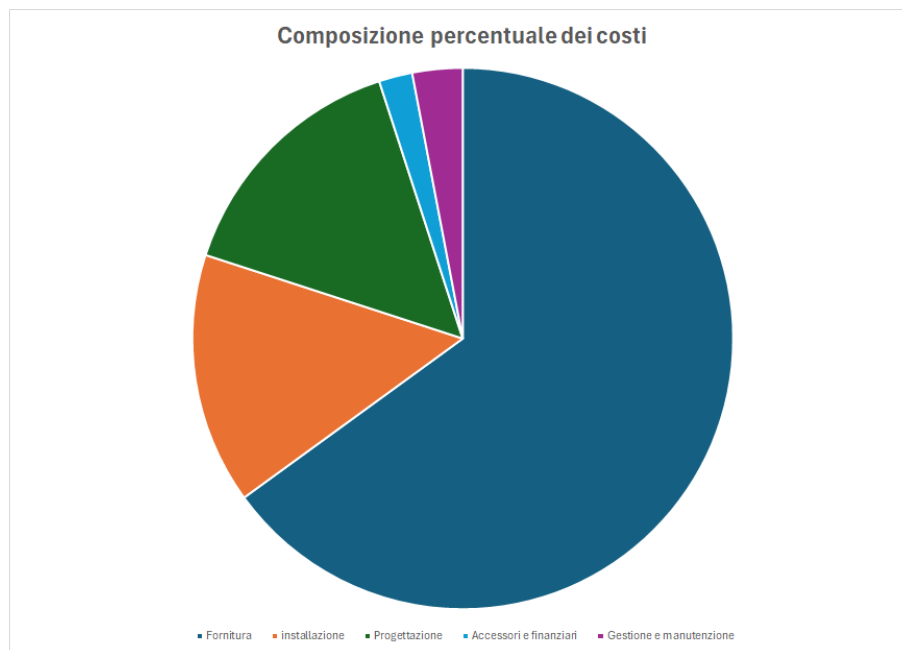


Figura 4.6: Composizione percentuale dei costi di un impianto fotovoltaico

Fonte: U. D. o. Energy 2022

barriere all'ingresso, che limitano fortemente la capacità delle nuove imprese del settore di competere con coloro che già operano in esso. Queste barriere si manifestano in vari ambiti: possono appartenere all'area economico-finanziaria, ossia legati ad un investimento iniziale necessario per poter competere, oppure alla necessità di dover produrre in ampie quantità per poter sfruttare le economie di scala. In secondo luogo, possono anche appartenere all'area tecnologica e della conoscenza, quindi connessi all'elevato grado di innovazione e rapidità con il quale è necessario fornire soluzioni (coperte anche da una eventuale protezione con brevetti). Accanto a queste barriere, si collocano anche quelle concernenti l'area normativa, l'area di approvvigionamento dei materiali e quella reputazionale (collegata alla reputazione dei vari marchi). Tutti questi fattori appena enunciati costituiscono delle ragioni di vantaggio che creano potere di mercato per le imprese già presenti sul mercato nei confronti di chi invece vorrebbe entrare, rendendo il contesto assimilabile ad un oligopolio piuttosto che ad un mercato perfettamente concorrenziale.

4.4.1 Barriere all'ingresso di tipo economico-finanziario

L'accesso al settore fotovoltaico per le imprese che vogliono affacciarsi a questo mercato è fortemente condizionato da ostacoli di tipo economico-finanziario, che incidono sulla possibilità dei potenziali entranti di competere efficacemente contro le imprese che sono già nel mercato. Una prima limitazione riguarda gli investimenti iniziali: infatti, in alcune aree della catena del

valore (specialmente nella produzione di moduli fotovoltaici e in quella della progettazione e installazione) sono necessarie ingenti somme di denaro per dotarsi dei macchinari e software necessari per competere con chi, invece, operando già nel mercato da tempo, ha il vantaggio da aver già sostenuto queste spese. Un ulteriore elemento di rilievo è rappresentato dalle economie di scala: Questo meccanismo favorisce i grandi produttori internazionali, che sono in grado di produrre elevatissime quantità di componenti e costi unitari medi relativamente ridotti, in contrapposizione a chi, essendo entrato da poco nel mercato e possedendo poca capacità produttiva, è in grado di sostenere una produzione limitata che sarà connessa a costi unitari medi molto più elevati (Mustafa, Hashim e Aliyu 2024). Un ultimo fattore che costituisce una barriera economico-finanziaria è l'accesso al credito, che risulta molto più semplificato per le aziende che operano da tempo sul mercato e sono quindi consolidati, godendo di una certa reputazione in confronto a chi, invece, si affaccia da poco alle attività del settore.

4.4.2 Barriere all'ingresso di tipo tecnologico

Come si è spiegato all'inizio di questo capitolo, la catena del valore del settore fotovoltaico è caratterizzata da un'enorme quantità di processi e nozioni necessarie per svolgere le varie fasi. Tutti questi requisiti conoscitivi costituiscono quindi una enorme barriera all'ingresso nel settore per potenziali nuovi operatori. Questo problema viene anche acuito dal fatto che il settore sta attraversando un periodo nel quale avvengono continue scoperte e migliorie dal punto di vista tecnologico, specialmente nell'ambito della componentistica, come nel caso dei pannelli (moduli in perovskite o ad assorbimento bifacciale). Tutto ciò porta le imprese a dover operare costanti investimenti in ricerca e sviluppo per poter rimanere al passo con i competitors, evenienza che un emergente del settore non potrebbe sostenere. Un altro grande ostacolo di tipo tecnologico è legato alla protezione brevettuale che le invenzioni hanno: gran parte delle innovazioni più avanzate sono infatti protette da brevetti posseduti da poche aziende, principalmente situate in Asia (Li, Wang e Zhang 2025), dove l'evoluzione tecnologica fotovoltaica è la più avanzata. Per cui, un nuovo entrante, l'assenza di accesso a queste tecnologie comporta ulteriori costi per l'ottenimento della licenza di utilizzo o per cercare di brevettare una tecnologia alternativa attraverso una fase di ricerca e sviluppo. Infine, un altro punto fondamentale è rappresentato dal "know how" operativo, ossia l'insieme delle conoscenze ingegneristiche e gestionali avanzate che sono necessarie per portare avanti le attività di un settore così complesso. In questo ambito le imprese già presenti da tempo dispongono di personale qualificato e formato per ogni evenienza, mentre per un'impresa appena entrata vi sono grandi costi da sostenere per mettere sotto contratto del personale formato oppure per garantire la formazione di chi non lo è.

4.4.3 Barriere all'ingresso di tipo normativo

Il settore fotovoltaico è anche molto influenzato dal quadro regolatorio nel quale è inglobato: infatti, le attività di produzione, installazione e commercializzazione degli impianti richiedono il rispetto di una grande quantità di norme, tra le quali regole tecniche, standard di qualità e procedure organizzative differenti per ogni Paese. In primo luogo, vi sono le certificazioni che i moduli devono ottenere per poter essere commercializzati: le più diffuse sono la certificazione IEC e quella CE (Li, Wang e Zhang 2025), che garantiscono il rispetto dei requisiti di sicurezza ed efficienza dei dispositivi che le possiedono. Per ottenerle sono necessari diversi test e fasi di sperimentazione che richiedono costi che le aziende già presenti sul mercato hanno sostenuto per vendere i loro prodotti, a dispetto di chi invece non ha ancora commercializzato la propria tecnologia. In secondo luogo, un'ulteriore condizionamento a livello normativo è dato dal lungo iter burocratico da sostenere per la realizzazione degli impianti: i premessi necessari sono infatti diversificati tra loro a seconda di parametri come la potenza o la dimensione degli impianti e richiedono interazioni più o meno frequenti con i diversi enti preposti al rilascio delle varie autorizzazioni a procedere. Anche in questo caso, un'impresa già navigata, sapendo come procedere e possedendo già una certa reputazione, impiegherà sicuramente meno tempo e denaro rispetto ad un'impresa neoentrata nel mercato, che si troverà esposta ad una situazione che non conosce, con forte rischio di incappare in perdite di tempo e budget.

4.4.4 Barriere all'ingresso legate all'approvvigionamento

Un ulteriore elemento che tende ad ostacolare l'ingresso di nuovi fornitori nel settore fotovoltaico è rappresentato dalle barriere legate all'approvvigionamento dei materiali necessari alla produzione dei componenti. La realizzazione di moduli fotovoltaici richiede infatti l'accesso ad una serie di materie prime e componenti, come il silicio policristallino in alta purezza, le celle o gli inverter. Il problema principale è che, la disponibilità e il controllo di gran parte di queste risorse risulta essere particolarmente concentrata in pochi poli produttivi situati nelle zone in cui vi sono le condizioni migliori per generare progresso tecnologico (Paesi Asiatici al primo posto, in particolare la Cina). Questa concentrazione crea numerosi problemi ai nuovi player, che devono andare in concorrenza con aziende già consolidate che detengono da tempo contratti di lungo periodo con i fornitori e che quindi spesso possono usufruire di condizioni di fornitura migliori. A ciò si aggiungono i rischi dovuti alla situazione geopolitica che potrebbe mutare in qualsiasi momento: L'incidenza di questo fattore è elevatissima in quanto, quando si presentano situazioni di questo tipo, i primi interventi governativi si concentrano principalmente sull'istituzione di dazi doganali a penalizzare l'importazione dei prodotti dallo Stato con il quale si sono generate delle tensioni (U. D. o. Energy 2022). Questo fattore incide quasi ugualmente sia sui nuovi entranti che sulle aziende già presenti nel settore, anche se, spesso, queste ultime

posseggono un piano di alternativa o delle reti di contatto in grado di bypassare parzialmente il problema.

4.4.5 Barriere all'ingresso legate alla reputazione

Oltre alle barriere precedentemente elencate, il settore fotovoltaico presenta importanti ostacoli anche collegati alla reputazione dei marchi che operano nel settore già da tempo. Infatti, una delle principali barriere è rappresentata dalla fiducia: infatti, dato che la durata media di un impianto fotovoltaico si aggira intorno ai 25 anni, gli investitori tendono a preferire marchi già consolidati invece di affidarsi ad uno emergente cercando così di garantirsi un'affidabilità nel lungo periodo. Per sfruttare questo effetto una nuova azienda deve lavorare molto e in maniera qualitativa, tanto da essere all'avanguardia del punto di vista tecnologico, cercando così di procurarsi una posizione di rilievo che possa portare ad aumentare il valore del brand. È inoltre molto utile sviluppare dei servizi post-vendita che accompagnino il cliente anche durante l'esperienza di utilizzo dell'impianto, garantendo ad esempio continua assistenza tecnica, manutenzione e copertura assicurativa in caso di guasti (Mustafa, Hashim e Aliyu 2024). Queste caratteristiche appena elencate sono fattori che un marchio già rinomato nel settore può permettersi di implementare, creando vantaggio competitivo rispetto a coloro che, invece, entrano da poco in un mercato già collaudato e cercano di procurarsi una reputazione.

4.5 Innovazioni tecnologiche principali

Osservando l'analisi svolta sino ad ora sull'offerta del settore fotovoltaico, è evidente l'importantissimo impatto che le innovazioni tecnologiche apportano all'equilibrio del settore: essi sono, infatti, le principali fonti di vantaggio competitivo che le aziende possono sfruttare per ottenere una posizione migliore rispetto ai competitors nel perennemente mutevole equilibrio di mercato. I passaggi della catena del valore nel quale l'innovazione tecnologica può ricoprire un ruolo più centrale riguardano sicuramente le fasi di produzione in quanto, la scoperta di un metodo alternativo o di una tecnologia innovativa che permetta di ottenere performance più efficienti portando anche costi più contenuti e sprechi ridotti porterebbe l'azienda che ne detiene i diritti a guadagnare la leadership del segmento di mercato.

4.5.1 L'impatto della perovskite nella produzione delle celle

Nell'ambito della produzione delle celle fotovoltaiche l'utilizzo tradizionale del polisilicio risulta essere molto costoso a causa delle sue fasi di produzione, molto onerose sia dal punto di vista dei materiali da utilizzare che del fabbisogno energetico necessario per sostenerle. Al fine di trovare una soluzione a questi problemi, negli ultimi tempi si sono intensificati gli studi su nuovi

moduli fotovoltaici che utilizzano la perovskite, un materiale sintetico che consente di avere alte efficienze potenziali combinate con processi di lavorazione a bassa temperatura e costi ridotti rispetto al polisilicio. Ad oggi le applicazioni principali della perovskite sono “in tandem” con il polisilicio: secondo questa tecnica, sopra alla tradizionale cella in polisilicio viene posto uno strato assorbitore di perovskite che, essendo a bandgap maggiore, consente di sfruttare meglio lo spettro solare e perciò di migliorare l'efficienza delle celle tradizionali. In contemporanea, però, stanno proseguendo le ricerche scientifiche che porteranno ad avere moduli fotovoltaici costituiti interamente da perovskite, nei quali l'effetto “tandem” con silicio verrà sostituito da due strati di perovskite a bandgap differenti, così da generare un assorbimento solare migliore, eliminare l'integrazione col silicio e creare anche una soluzione più flessibile e leggera di quelle finora presenti (Magazine 2025). Ad oggi i punti critici da migliorare sono diversi, riguardanti aspetti cruciali come la resistenza a lungo termine della perovskite quando è sottoposta ad agenti atmosferici o la compatibilità di questo materiale con le successive fasi della catena del valore. Tuttavia, se questi problemi dovessero essere risolti senza aumentare troppo i costi di produzione, sicuramente l'approccio al fotovoltaico attraverso l'uso della perovskite potrebbe diventare una tecnologia di massa in grado di competere, se non di soppiantare l'utilizzo del silicio.

4.5.2 Moduli trasparenti, semitrasparenti e flessibili

Un'area in cui l'innovazione tecnologica garantita dalle perovskiti e dagli altri materiali alternativi al silicio è particolarmente utilizzata riguarda l'applicazione dell'ingegneria all'architettura. Infatti, questi materiali in grado di avere controllo del bandgap e della colorazione permettono di creare moduli fotovoltaici adattabili a soluzioni urbane come vetri o facciate, e producendo così energia sfruttando sempre meglio la luce naturale. Inoltre, la flessibilità dei nuovi materiali rende i moduli fotovoltaici prodotti applicabili a contesti sempre più ampi come superfici irregolari, carrozzerie dei mezzi pubblici, tende solari e molti altri. Gli esempi attualmente più diffusi sono i moduli in tandem perovskite e silicio flessibili, che garantiscono un'efficienza vicina al 30% (ArXiv 2025) e anche la possibilità di modulare colore e trasparenza, che apre la strada alla loro installazione su edifici o per caratterizzare il design urbano. Lato negativo di questa tecnologia è che l'efficienza è minore rispetto ai moduli rigidi, per cui, prima di procedere all'installazione su larga scala è necessario valutare attentamente tutti gli aspetti principali, come costo e valore architettonico dell'opera, ma anche fabbisogno energetico dell'edificio da rifornire di energia. Per ovviare a questi problemi, gli studi si stanno concentrando sulla fattibilità di realizzare dispositivi flessibili e semitrasparenti che garantiscano alta durabilità nel tempo ed efficienza tale da poter garantire performance energetiche e luminose tali da essere considerati migliori dei moduli rigidi.

4.5.3 Industrializzazione dei processi

Nel settore fotovoltaico un punto critico è il passaggio dei moduli fotovoltaici da prodotto di laboratorio a prodotto commercializzabile, che quindi rispetti tutti gli standard e soprattutto la quantità richiesta dal mercato. Se con il polisilicio sono necessarie tecniche complesse che richiedono molta energia e tempi di esecuzione, i nuovi materiali al centro delle ricerche permettono di provare approcci diversi che semplificano la produzioni. Tra questi, il metodo roll-to-roll è quello più utilizzato: esso consiste, infatti, nel far scorrere il materiale flessibile attraverso una serie di rulli che lo trasportano da una stazione di lavorazione a quella successiva per tutta la durata del processo. Grazie a questo approccio è possibile aumentare notevolmente la quantità di materiale lavorato arrivando fino a centinaia di metri all'ora, ottenendo inoltre celle sottili e leggere pronte per essere montate su contesti irregolari e vari riducendo anche i costi per la lavorazione e il fabbisogno energetico, che costituiscono i limiti principali della lavorazione del silicio (PV 2025). Nonostante gli enormi vantaggi che apporta al processo produttivo, il roll-to-roll non è un processo senza punti deboli: vi sono infatti diverse aree da migliorare, riguardanti specialmente il garantire l'uniformità su larga scala del materiale trasportato dalla sequenza di rulli, la stabilità di prestazione dopo essere stato sollecitato dagli sforzi del processo e la compatibilità con l'incapsulamento nella struttura modulare dei pannelli fotovoltaici. Altre aree chiave sulle quali la ricerca tecnologica si sta concentrando riguardano la brevettazione di processi che minimizzino o eliminino totalmente l'utilizzo di solventi industriali pericolosi e l'adattamento di algoritmi di processo rapidi anche per le linee di produzione di pannelli costruiti in silicio, sempre per le fasi nelle quali è possibile farlo (ArXiv 2025).

4.5.4 Riduzione dei materiali critici, riciclo ed economia circolare

Un'altra area della catena del valore nella quale la ricerca tecnologica deve necessariamente compiere dei passi in avanti riguarda il riciclo dei componenti dell'impianto quando essi raggiungono la fine del loro ciclo vita. Infatti, la crescente domanda di capacità che è stata registrata in questi anni rende necessario pensare a degli approcci di riciclo dei materiali del quale sono composti i moduli (Figura 4.7). In questo senso le strade che si stanno percorrendo riguardano essenzialmente l'eliminazione dei materiali critici che non è possibile riciclare (tellurio, argento e in minima parte indio) e lo sviluppo di processi di riciclo che estraggano materiali ad alto valore dai pannelli dismessi (R. Solar 2025). Parallelamente a ciò, si stanno sviluppando dei processi atti al recupero dei materiali principali dell'impianto, ossia alluminio, silicio e metalli vari attraverso processi termici e chimici, costruendo per queste attività degli stabilimenti dedicati per aumentare la capacità e ridurre i costi. Per facilitare tutto ciò, le associazioni dedicate e i governi stanno introducendo degli incentivi e delle politiche a sostegno del riutilizzo di questi materiali, come ad esempio dei requisiti e degli obblighi da rispettare per tutti i produttori che

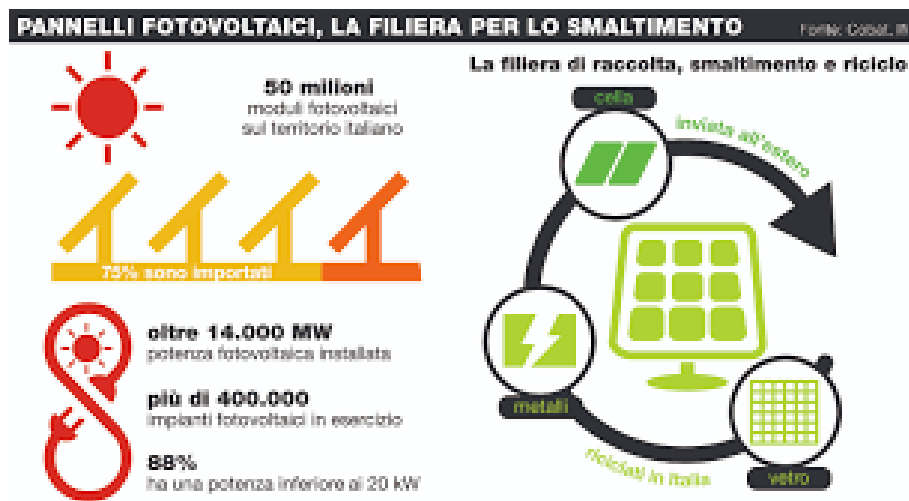


Figura 4.7: Macrodati concernenti lo smaltimento dei moduli fotovoltaici

Fonte: U. D. o. Energy 2022

comportano la comminazione di sanzioni amministrative se non rispettati (PV 2025). È quindi prevedibile che nei prossimi anni molte aziende produttrici si faranno carico di progetti volti al corretto smaltimento dei rifiuti e riciclo di componenti esauste, ma anche in alcuni casi della costruzione di infrastrutture di raccolta e smaltimento di esse.

Analisi economico-finanziaria del settore fotovoltaico

5.1 Dimensioni del mercato e quote del mercato fotovoltaico

Osservando gli andamenti dei vari settori energetici del panorama globale, è evidente che il fotovoltaico sia, ad oggi, quello soggetto alla crescita più importante. Infatti, alla fine del 2024, la capacità installata cumulativa ha raggiunto un valore pari a 2,4 TW, con incrementi globali annuali che raggiungono cifre comprese tra 550 e 600 GW (International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS) 2024), valori che non si sono mai osservati nel contesto delle energie rinnovabili. Questo andamento è specchio di una crescita impensabile se si pensa che, meno di 10 anni prima, nel 2015, il valore della capacità totale installata era pari a circa 230 GW (Figura 5.1. Parallelamente alla crescita di capacità, anche la dimensione economica del mercato è andata incontro ad una crescita esponenziale, raggiungendo al giorno d'oggi una valutazione di circa 270 miliardi di dollari, considerando solo le nuove installazioni, valore che posiziona il settore fotovoltaico in una posizione di rilievo rispetto a molti altri settori anche esterni al contesto energetico nell'ambito dell'attrattività all'occhio degli investitori. Questo enorme successo che il fotovoltaico ha avuto è descrivibile secondo vari aspetti: in primo luogo vi è il crollo del costo dei moduli, passato dal valore di 4\$/W del 2010, a 0,70 \$/W nel 2015, 0,25\$/W del 2020, fino ad un valore sotto gli 0,20\$/W del 2024, come si evince dalla Figura 5.2. Assieme al crollo dei prezzi, il fotovoltaico ha raggiunto la popolarità di cui gode attualmente anche grazie alla grande spinta politica e normativa che si è verificata nell'ultimo decennio, attraverso sistemi di incentivi diretti, programmi di supporto e investimenti pubblici, che, fornendo garanzie agli operatori del settore, hanno contribuito ad aumentare la bancabilità dei progetti. In terzo luogo, la crescente domanda di installazioni di unità fotovoltaiche è riconducibile a fattori di geopolitica internazionale: le crescenti tensioni che stanno governando la politica estera negli ultimi tempi hanno infatti portato gli Stati a sviluppare dei piani di sostegno per lo sviluppo di fonti energetiche sicure, che quindi riducano la dipendenza verso gli Stati for-

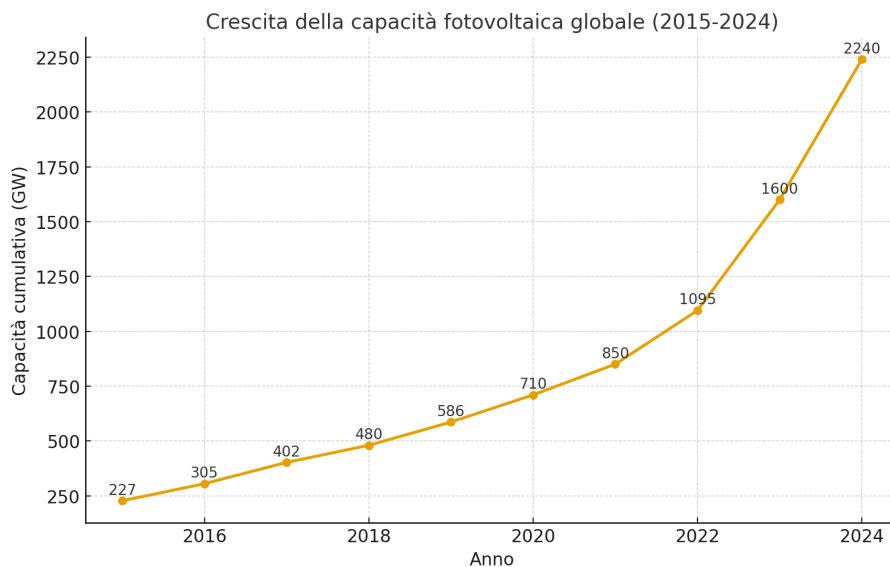


Figura 5.1: Curva di crescita della capacità fotovoltaica globale installata

Fonte: International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS) 2024

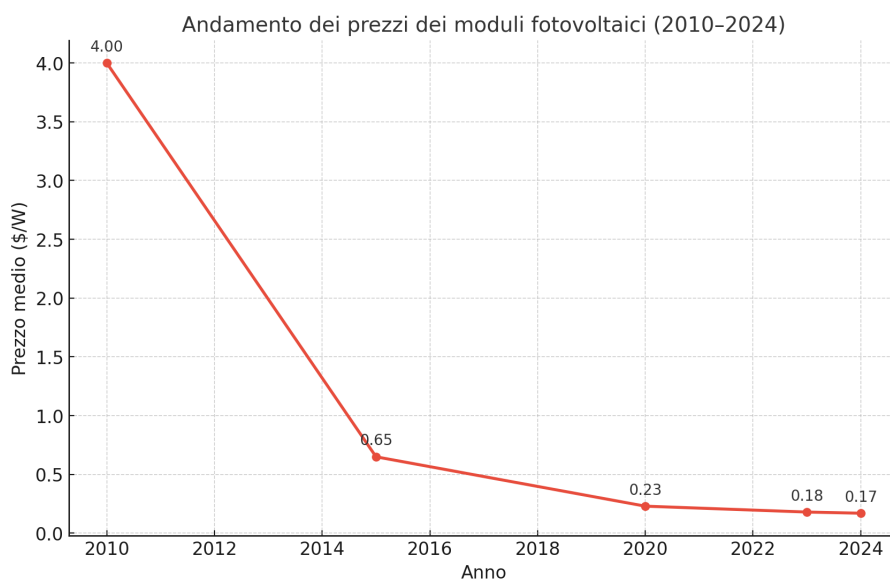


Figura 5.2: Curva di andamento del prezzo medio dei moduli fotovoltaici

Fonte: Research 2024

nitori di materia prima. Inoltre, un grande impatto sulla questione lo ha avuto anche la crisi energetica del 2021. Causa di essa fu l'aumento esponenziale del fabbisogno energetico richiesto per la ripresa economica globale successiva alla pandemia da COVID-19, a fronte di un'offerta che continuava ad essere rigida e limitata da interruzioni nel percorso di fornitura dovuti anche a scarsi investimenti compiuti negli anni precedenti (I. E. Agency 2021). A ciò si aggiunsero anche un crollo della produzione eolica in Europa Settentrionale, una contrazione dell'idroelettrico in

Brasile e una riduzione delle forniture di gas russo verso l'Europa (evento che causò un aumento delle tensioni tra i Paesi europei e il governo di Mosca) (I. E. Agency 2022a). Le conseguenze di quest'insieme di fattori furono immediate: i prezzi del gas naturale aumentarono di circa 6 volte tra gennaio e dicembre 2021, facendo schizzare i prezzi all'ingrosso dell'elettricità e generando così pressioni inflazionistiche (E. Commission 2021). Molti settori industriali energivori furono costretti a rallentare o bloccare la produzione, mentre i governi cercarono di dare sostegno alle imprese con sussidi diretti, tetti tariffari e riduzioni fiscali, facendo in modo che la situazione impattasse il meno possibile sui consumatori. In questo contesto, emerse sempre di più l'immagine del fotovoltaico come strumento di indipendenza energetica nel medio-lungo periodo (I. R. E. Agency 2022). In ambito finanziario, essendo la dimensione di un mercato direttamente proporzionale alla sua capacità di attrarre capitali, il settore fotovoltaico ha raccolto nel solo 2024 circa 380 miliardi di dollari in investimenti globali per nuove capacità, numeri superiori rispetto a quelli del settore petrolifero e del gas (International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS) 2024). Questo fenomeno è sostenuto da strumenti finanziari dedicati come i green bond o i fondi infrastrutturali dedicati, che considerano il fotovoltaico un asset sicuro e a lungo termine, dato che i ritorni sugli investimenti in questo settore si attestano tra il 5% e l'8% per progetti utility-scale con tempi di rientro stimati tra 8 e 12 anni, mentre nel segmento residenziale i ritorni raggiungono anche cifre comprese tra il 10% e il 15%, nonostante venga stimato un rischio maggiore data la frammentazione del mercato e l'affidabilità dei clienti non uniforme (Insights 2024). Analizzando, invece, le quote di mercato, il primo dato lampante riguarda il fatto che, dal punto di vista geografico, è netto il predominio sul settore della Cina che, con 357 GW di nuove installazioni del solo 2024, ha rappresentato circa il 60% del totale globale, consolidando così il ruolo di leader non solo nell'abito della produzione e installazione, ma anche come centro di innovazione tecnologica e industriale. Accanto alla Cina, anche altri mercati hanno mostrato dinamiche di espansione, sebbene con volumi più contenuti. Gli Stati Uniti, ad esempio, grazie a diverse manovre governative tra cui l'*Inflation Reduction Act* (garantisce incentivi fiscali e instabilità regolatoria) hanno raggiunto nel 2024 una capacità installata pari a 47 GW (11 della capacità totale), mentre l'India ha contribuito con quasi 32 GW, garantendosi il ruolo di Paese emergente nel contesto della transizione energetica (International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS) 2025). L'Unione Europea, invece, mantiene una percentuale pari a circa il 15% della capacità mondiale, anche se presenta forti differenze interne, con Germania, Spagna, Olanda e Italia a trainare il continente. (5.3).

Questa distribuzione non omogenea crea quindi una mappa del potere energetico fortemente sbilanciata, nella quale le avanzate economie energetiche occidentali dipendono fortemente dalle importazioni di moduli e componenti cinesi, come rappresentato nella Figura 5.4. Anche dal punto di vista industriale la caratteristica preponderante è una accentuata concentrazione di mercato: infatti, nel solo 2024, le prime dieci aziende produttrici di moduli fotovoltaici si sono

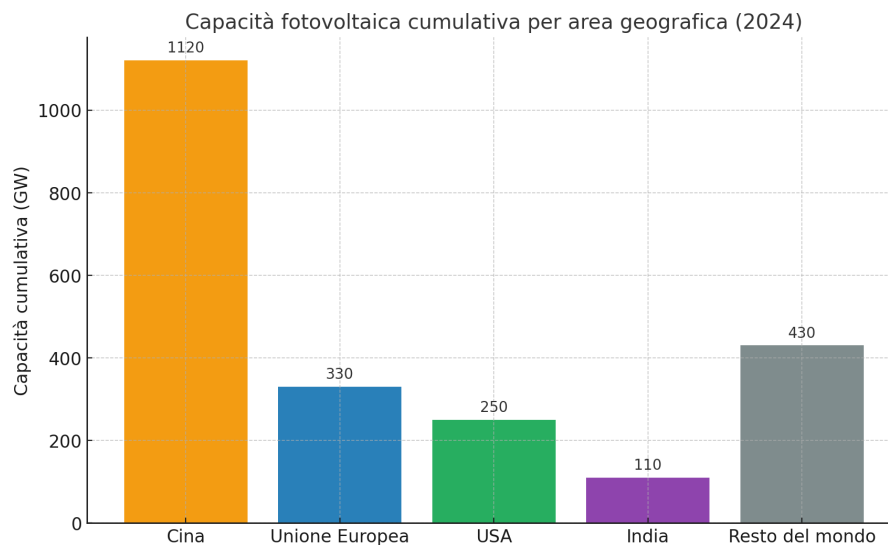


Figura 5.3: Rappresentazione grafica della capacità fotovoltaica cumulativa installata nei principali Stati

Fonte: International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS) 2025

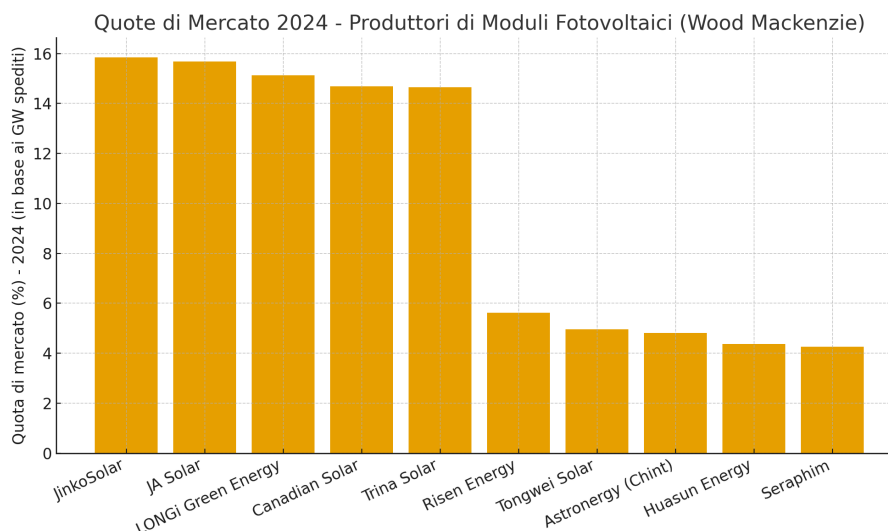


Figura 5.4: Panoramica dei principali produttori mondiali di moduli fotovoltaici

Fonte dati: Wood Mackenzie Power & Renewables 2025

occupate della realizzazione e della spedizione di circa 500 GW di prodotti, equivalente a quasi il 90% del mercato globale (TaiyangNews 2025). Tra le varie aziende, spiccano i nomi di colossi come LONGi Green Energy, Jinko Solar e JA Solar, tutte con sede in Cina, e capaci di creare un oligopolio basato su economie di scala, capacità di innovazione tecnologica e controllo delle materie prime. Questo dominio si riflette anche fuori da contesto nazionale cinese: in India, ad esempio, nel 2023 Jinko Solar deteneva il 20,5% delle quote del mercato di produzione dei moduli fotovoltaici, seguito dal 18,8% di LONGi e dall'8,7 da JA Solar (India 2024). Conte-

sto più o meno simile si presenta anche negli USA e nelle economie europee che, nonostante diverse iniziative volte a favorire il reshoring e la produzione interna, sono ancora dipendenti dall'importazione dei moduli provenienti dalla Cina.

5.2 Tipologie di concorrenza e strategie di prezzo

Spostando il focus della trattazione sulla tipologia di concorrenza presente nel settore fotovoltaico, è subito evidente che questa rappresenta al meglio la complessità di una filiera composta di numerose fasi, ognuna delle quali governata da dinamiche a sé stanti. È però possibile raggruppare tutte queste fasi in tre macroaree, all'interno delle quali si verificano fenomeni di concorrenza profondamente diversi tra di loro.

5.2.1 Area della produzione di moduli e componenti fotovoltaici

Come già affermato in precedenza, la produzione dei moduli fotovoltaici e in generale di tutte le componenti fisiche che fanno parte dell'impianto è dominata da un numero ristretto di imprese, localizzate principalmente nel Continente Asiatico. Tra queste sono presenti colossi della produzione come LONGi, Jinko Solar, JA, Trina Solar e Canadian Solar, che si stima detengano una quota di mercato circa il 70% della produzione globale (I. E. Agency 2023). Questa configurazione appena descritta è esemplificativa della condizione di oligopolio differenziato, all'interno della quale poche imprese competono in un mercato altamente concentrato offrendo prodotti atti a svolgere la stessa funzione, ma non perfettamente omogenei. In questo contesto, la competizione si può articolare su due campi fondamentali: la riduzione dei costi di produzione, resa possibile dall'applicazione delle economie di scala e dalla standardizzazione dei processi, e la differenziazione tecnologica, connessa alla continua spinta nel migliorare le performance degli impianti in termini di efficienza e durata attraverso l'introduzione di nuove tecnologie. Negli ultimi anni, ad esempio, il grande sviluppo delle celle ad alta efficienza ha reso la concorrenza in questo settore ancora più agguerrita e tendente verso una forma di oligopolio sempre più stringente a favore di quelle aziende che possiedono il vantaggio tecnologico in queste aree produttive.

5.2.2 Area dell'installazione e dei servizi

Il raggruppamento successivo alle fasi di produzione riguarda l'installazione e i servizi connessi all'impianto fotovoltaico. A differenza delle attività presenti nella fase precedente, in questi passaggi vi sono delle dinamiche che portano ad una struttura di mercato altamente frammentata e decentralizzata, tipica dei mercati caratterizzati da bassa concentrazione e quindi alta concorrenza. In Italia, come anche in gran parte dell'Unione Europea, il mercato dell'installazione e

dei servizi è principalmente costituito da piccole e medie imprese e artigiani specializzati nella realizzazione di queste attività, che operano su scala prettamente territoriale. Questa configurazione fa sì che le entità operanti in questo campo siano molte di più rispetto che nelle altre fasi, tanto da occupare, secondo il report IRENA del 2023, circa il 60% di coloro che operano nel settore fotovoltaico, evidenziando così il rilievo economico delle attività presenti in questo raggruppamento (International Renewable Energy Agency (IRENA) 2023). A livello di concorrenza, considerando il fatto che tutte le imprese offrono sostanzialmente lo stesso servizio, le variabili di differenziazione che possono portare il cliente a scegliere un'azienda piuttosto che un'altra, appartengono alle aree qualitative e dei servizi. Tra queste, le più importanti sono la tempestività dell'assistenza post-installazione, la reputazione e la fiducia nell'area di competenza, la gestione delle pratiche burocratiche connesse agli incentivi e la qualità della consulenza fornita. Quando un'impresa riesce a coniugare al massimo queste caratteristiche, è in grado di generare una differenziazione che le consente di mantenere una nicchia di mercato anche in un settore altamente concorrenziale.

5.2.3 Area della produzione e della vendita di energia

La fase finale della filiera riguarda le attività di produzione e commercializzazione dell'energia elettrica. A differenza della produzione dei moduli e dell'installazione, questo segmento è caratterizzato da una struttura di mercato oligopolistica mista nella quale coesistono sia i grandi operatori integrati (in Italia i più rilevanti sono Enel Green Power, ENI Plentiude, A2A, Edison) che i piccoli produttori indipendenti (ARERA, 2024). La differenza è che sei i primi sono in grado di gestire grandi quantità di impianti e di accedere alle aste pubbliche e ai mercati finanziari per aggiudicarsi il diritto di gestire energeticamente un dato blocco di capacità, i secondi tengono il loro raggio d'azione sulla produzione di energia in impianti di piccola e media taglia e sull'immissione di questa nella rete pubblica, che porta a benefici che si manifestano in tariffe incentivanti o nel meccanismo dello scambio sul posto, che consente al produttore di "scambiare" energia con la rete ottenendo in cambio una compensazione monetaria data dalla differenza tra l'energia immessa nella rete e quella prelevata, senza così dover vendere o acquistare energia sul mercato tramite transazioni separate. Una caratteristica centrale di questo ambito è sicuramente il fatto che la concorrenza tra le imprese è fortemente influenzata da fattori istituzionali e regolatori, che sono manifesto dell'importanza dell'intervento pubblico il quale, attraverso incentivi, aste competitive e interventi simili, contribuisce a determinare i livelli di redditività e la struttura competitiva del mercato (International Energy Agency (IEA) 2023b). In particolare, se fino a poco tempo fa la concorrenza si manifestava principalmente nell'ingresso al mercato più che nel mercato stesso (si competeva per l'assegnazione di quote di capacità o incentivi piuttosto che per la vendita diretta dell'energia), negli ultimi tempi la crescente frammentazione e liberalizzazione della produzione fotovoltaica (favorita dalla diffusione dei sistemi di autoconsu-

mo collettivo e delle Comunità Energetiche Rinnovabili)(Italiana 2021) ha fatto sì che potesse cominciare una graduale trasformazione del mercato verso una forma di concorrenza più aperta, nella quale i consumatori dell'energia sono anche i produttori di essa. Concentrandosi sull'aspetto strategico, invece, la competizione tra le aziende presenti in questo segmento di mercato si può sviluppare su due approcci principali: un approccio di costo, nel quale la competizione si basa sull'utilizzo di economie di scala, riduzione dei costi di finanziamento e accesso a tecnologie ad alte performance, oppure un approccio di competizione differenziata, spesso adottato dai piccoli produttori, essenzialmente basato sul creare un servizio personalizzato per il singolo cliente attraverso relazione diretta ed offerta personalizzata, spesso anche integrata con servizi di monitoring e accumulo.

5.3 Marginalità e redditività delle imprese

Dopo aver descritto i meccanismi di concorrenza presenti nelle varie attività della filiera produttiva del settore fotovoltaico, in questa sezione la trattazione verterà sull'analisi della marginalità e della redditività delle imprese che operano in questo mercato. Questo argomento assume un rilievo importante soprattutto considerando la tendenza che il fotovoltaico sta attraversando, caratterizzato da un crollo dei costi di produzione, dal raggiungimento della maturità tecnologica e da una serie di incentivi volti a sostenere lo sviluppo del rinnovabile, che hanno reso il settore sempre più competitivo nei confronti dei combustibili fossili. Nonostante ciò, però, fattori come redditività e marginalità rimangono fortemente eterogenei tra imprese che appartengono allo stesso settore, essendo parametri strettamente vincolati a concetti come il tipo di business, il grado di integrazione della filiera, le forme di finanziamento che le imprese utilizzano e il contesto regolatorio. Questa eterogeneità è visibile dal fatto che le aziende produttrici di moduli, specialmente in Europa, hanno subito una forte compressione dei margini data dal continuo calo dei prezzi dovuto alla concorrenza cinese e al continuo calo del prezzo medio dei moduli, che oggi si aggira intorno ai 0,15€/W (BloombergNEF 2025), un valore che rende molto complessa la sussistenza dei produttori locali su piccola scala. Diversa è invece la situazione per i developer e gli operatori di impianti, la cui redditività dipende dal prezzo di vendita dell'energia e dal tipo di contratto stipulato. Coloro che riescono a stringere rapporti di vendita con controparti affidabili basati su PPA a lungo termine possono infatti contare su flussi di cassa stabili e ritorni prevedibili, mentre per i "merchant", ossia coloro che operano vendendo energia direttamente nel mercato spot, la volatilità è maggiore, ma anche i potenziali guadagni che si possono ottenere in momenti di picco dei prezzi dell'elettricità. In media, la redditività delle imprese operanti in questo campo si aggira tra il 15% e il 25%, con picchi massimi per le utility integrate e minimi per i piccoli EPC e gli installatori locali (BloombergNEF 2025). Infine, le società che si occupano di manutenzione e monitoraggio mantengono margini contenuti, ma

stabili nel tempo, per merito sia della natura dei contratti che vengono stipulati in quest'area che per lo sviluppo tecnologico, che sta permettendo di avere macchinari e software in grado di garantire un servizio sempre più efficiente, fattore fondamentale anche per l'incremento della redditività.

5.3.1 Performance delle principali aziende globali

A livello mondiale, negli ultimi due anni (2023-2025), la dinamica del mercato globale è stata caratterizzata da una crescita esponenziale dei volumi e da una forte compressione dei margini, che ha spinto i prezzi dei moduli ai minimi storici, arrivando anche a toccare in alcuni casi il valore di 0,13€/W, riducendo anche la redditività per i colossi cinesi leader del mercato (BloombergNEF 2025). Osservando, ad esempio, la situazione di Jinko Solar, leader attuale nella produzione di moduli fotovoltaici, si attesta che nel 2023 l'azienda ha prodotto ricavi per 118,7 miliardi di yuan, equivalenti a circa 16,5 miliardi di dollari, con un incremento delle spedizioni del 77%, raggiungendo circa 79 GW di moduli consegnati. Nonostante questi dati, però, si è registrato un margine lordo medio del 14,2%, in calo rispetto agli anni precedenti, dovuto principalmente alla guerra dei prezzi con gli altri grandi produttori (Magazine 2024). Nel corso del 2024 la situazione è ulteriormente peggiorata, in particolar modo nel quarto trimestre, dove il margine lordo medio è crollato fino al 3,6%, valore che riflette un eccesso di offerta dovuto ai prezzi molto bassi (Magazine 2024). Anche un altro colosso cinese come LONGi Green Energy ha vissuto una situazione simile, con ricavi pari a 128 miliardi di yuan (17,5 miliardi di dollari) nel 2023, ma un calo del 30% rispetto all'esercizio precedente (L. G. Energy 2023). A ciò si aggiunge anche un andamento dei margini operativi della medesima entità di quello descritto in precedenza per Jinko Solar, con un valore medio di molto sotto al 10%, caratterizzato inoltre da un profondo crollo negli ultimi due trimestri del 2024, dove si attesta intorno al 2% (L. G. Energy 2024). Spostando il focus fuori dalla Cina, invece, l'impresa americana First Solar rappresenta un caso unico di alta redditività e autonomia tecnologica, data dall'utilizzo di moduli costituiti non in silicio ma in tellurio di cadmio, che consente di eliminare la dipendenza dalla materia prima tipica del settore. Nel 2023 First Solar ha registrato ricavi pari a 3,3 miliardi di dollari e un utile netto di 830 milioni di dollari, con un margine operativo di oltre il 25% (F. Solar 2023), valore molto elevato rispetto ai concorrenti asiatici. Alla base di questo successo vi è un modello industriale capital-intensive ma altamente efficiente, e un sistema di incentivi statali che supporta al massimo la diffusione della tecnologia.

5.3.2 Performance principali in Europa

Spostando l'attenzione sul contesto fotovoltaico europeo, le principali aziende presenti non appartengono al segmento di produzione delle componenti, bensì sono rappresentative del seg-

mento di produzione e distribuzione energetica. Tra queste occupa un ruolo rilevante Solaria Energia, un'azienda fotovoltaica spagnola che nel primo semestre del 2025 ha raddoppiato l'utile netto rispetto allo stesso periodo del 2024, raggiungendo un valore di circa 82 milioni di euro (+97%), con un fatturato che registra una crescita del 59% (Energia 2025). In termini di EBITDA semestrale, nella seconda parte del 2024 si è registrato un valore di 144 milioni di euro (+66% rispetto al semestre precedente), con previsioni per il 2025 che si attestano intorno ai 255 milioni di euro complessivi (Energia 2025). Questi risultati testimoniano un modello di business efficace, basato sulla combinazione tra impianti di proprietà e contratti di tipo PPA, soluzione che consente di avere valori di margini operativi che in alcuni trimestri si attestano tra il 40% e il 50% (Energia 2025), tra i migliori che si registrano nel settore. Un'altra realtà europea del mondo fotovoltaico è la portoghese EDP Renovaveis, un'azienda controllata dal gruppo EDP, uno tra i maggiori operatori mondiali in ambito delle rinnovabili. A livello finanziario, si è registrato un EBITDA pari a 1,29 miliardi di euro, in lieve calo rispetto all'anno precedente, ma con un utile netto in aumento pari a 210 milioni di euro (+163% rispetto al precedente semestre) (EDP Renovaveis, 2024). Oltre all'aumento della domanda e alla crescita del settore, questi risultati sono anche espressione di un percorso di riduzione dei costi iniziato nel 2024 e che dovrebbe durare fino al 2026 con l'obiettivo di tagliare 3 miliardi di euro di costi concentrandosi esclusivamente su progetti ad alto rendimento (Renovaveis 2024). Infine, occupa un ruolo di rilievo nel panorama europeo anche Enel Green Power che contribuisce in maniera fondamentale alle performance finanziarie del gruppo Enel: nel 2023, infatti, il gruppo ha registrato un EBITDA di 22 miliardi di euro, in aumento del 11,6% rispetto all'esercizio precedente, e un utile netto di 6,5 miliardi, pari al 20,7% (Enel 2024). In questo risultato, l'impatto l'apporto della divisione Green Power è stato determinante data la crescita che l'EBITDA di essa ha avuto, pari al 50%, principalmente dovuta all'espansione della capacità rinnovabile a l'installazione di nuovi impianti fotovoltaici di grandi dimensioni in Italia e Spagna (Enel 2024). L'andamento verificatosi nel 2023 si è ripetuto anche nel 2024, con un utile netto superiore ai 4 miliardi di euro che ha consentito al gruppo Enel di rafforzare la sua posizione di leadership non solo in Italia, dove è produttrice di circa il 73% dell'energia prodotta, ma anche in Europa (Group 2024).

5.3.3 Conclusioni dell'analisi

Riassumendo l'analisi economico finanziaria appena effettuata, è evidente la disparità di risultati a livello di margine operativo ottenuto tra le aziende produttrici di moduli fotovoltaici e gli operatori del settore, ossia coloro che si occupano di produrre energia attraverso gli impianti utilizzando una forma di impresa stile utility integrata. I grandi risultati ottenuti da Solaria Energia, Enel Green Power e EDP rappresentati in Figura 5.5 evidenziano infatti il valore aggiunto che la vendita di energia comporta rispetto alle spese sostenute per l'acquisto e l'installazione dei moduli. Discorso opposto è da fare, invece, per le aziende produttrici di componenti, come Jinko

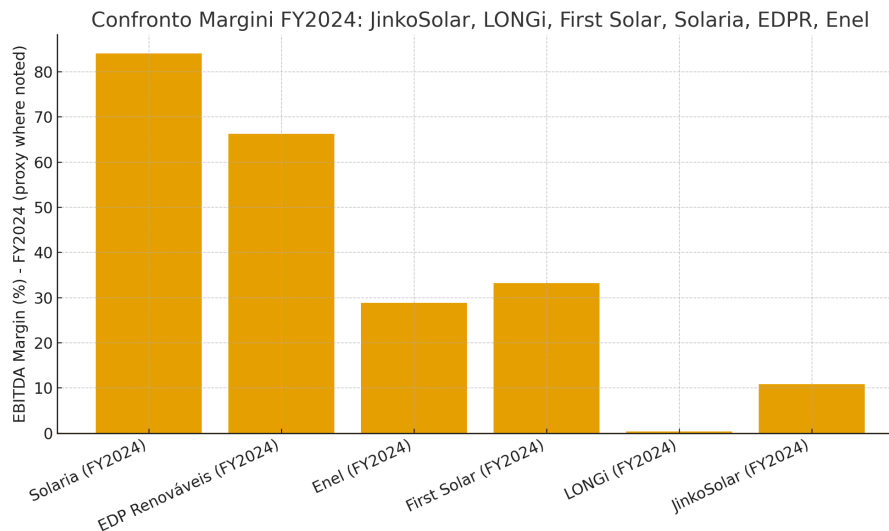


Figura 5.5: Confronto sui margini di guadagno delle principali aziende operanti nei vari ambiti del fotovoltaico

Fonte dati: Wood Mackenzie Power & Renewables 2025

Solar e LONGi, che registrano margini molto bassi, che in alcuni momenti raggiungono anche soglie negative dovute all'effetto combinato dell'aumento della domanda e della compressione dei prezzi. Diverso è il caso di First Solar, che, pur essendo un'azienda produttrice di moduli fotovoltaici e pur registrando fatturati minori rispetto ai leader di settore, è in grado di registrare un margine operativo di molto superiore se paragonato ai grandi colossi cinesi, in quanto riesce a coniugare al massimo l'apporto di una nuova tecnologia e l'aiuto statale fornito sia dagli incentivi che da una serie di norme regolatorie che ne favoriscono la diffusione. Un ulteriore

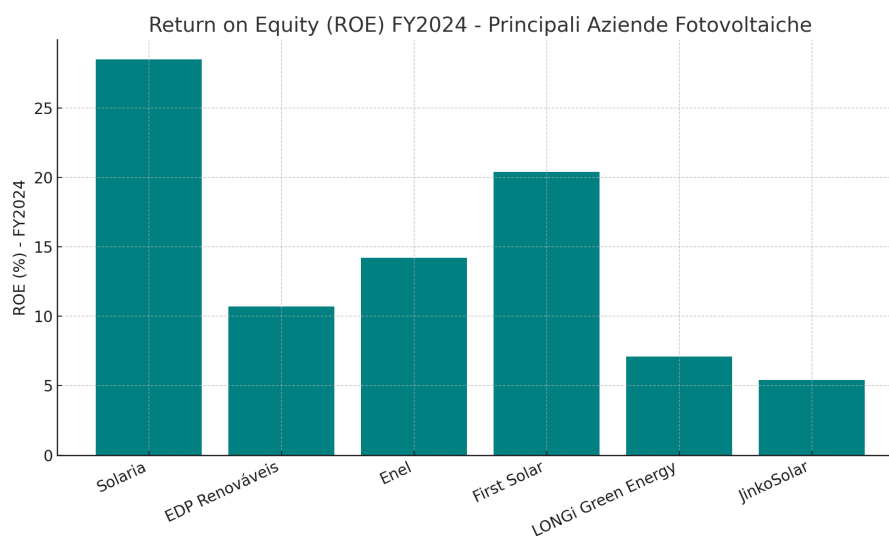


Figura 5.6: Confronto sul Return on Equity (ROE) delle aziende operanti nei vari ambiti del fotovoltaico

punto di vista sulla situazione è fornito dal confronto dei vari Return on Equity (ROE) che le aziende fanno registrare alla fine dell'esercizio. Dalla Figura 5.6, infatti, si evince che Solaria Energia presenta il ROE più elevato, pari al 28,5% (Energia 2025), valore figlio sia di caratteristiche interne, come una struttura operativa snella e una elevata efficienza operativa, ma anche di situazione esterne all'azienda, come il basso valore del prezzo dell'energia in Spagna e l'aumento della capacità installata. A seguire, First Solar registra un ROE pari al 20,4% (F. Solar 2023), un valore molto solido frutto della crescita delle vendite di moduli a film sottile e di un modello di business integrato verticalmente, alternativa valida ai colossi cinesi. Enel e EDP Renováveis mostrano invece valori medi, con il 14,2% (Group 2023) per la compagnia italiana e il 10,6% (Renováveis 2024) per l'azienda portoghese. Questi risultati, in linea con le utilities europee sono manifestazione di un business diversificato e con margini stabili, ma meno ampi rispetto ai casi precedentemente enunciati. Infine, le grandi aziende cinesi LONGi Green Energy e Jinko Solar, pur essendo i giganti mondiali della produzione dei moduli, registrano ROE inferiori al 7% (L. G. Energy 2024), figli di una elevatissima concorrenza interna nel mercato cinese e della pressione costante sui prezzi dei pannelli. Un altro punto distintivo dell'analisi è lo sguardo

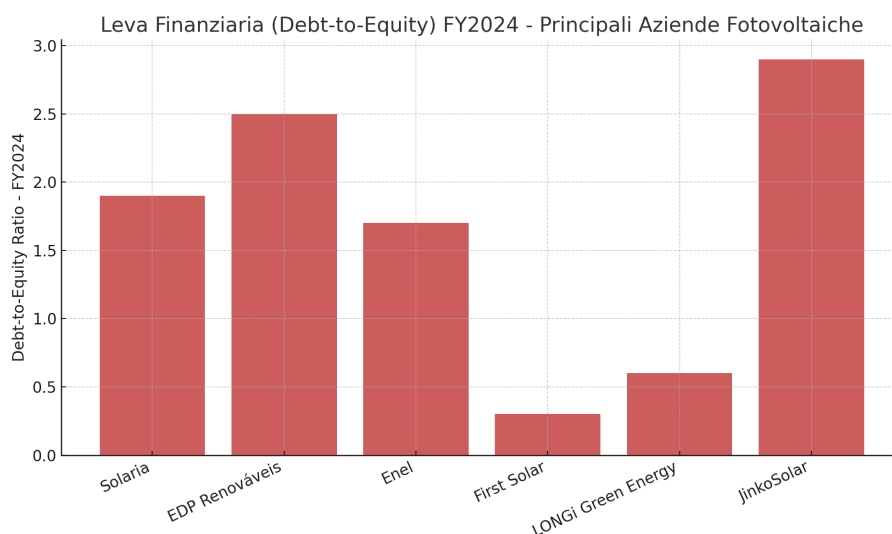


Figura 5.7: Confronto sulla leva finanziaria delle principali aziende operanti nei vari ambiti del fotovoltaico

alla leva finanziaria che le aziende fissano per finanziare le loro attività. Secondo la Figura 5.7, Jinko Solar, con un valore di Debt on Equity pari a 2,9 (Magazine 2024), risulta l'azienda più indebitata, riflettendo l'ingente ricorso ai finanziamenti per sostenere l'aumento della capacità produttiva e l'espansione globale. A seguire, EDP Renováveis con 2,5 (Renováveis 2024) e Solaria Energia con 1,9 (Energia 2025) mostrano un elevato valore di leva, come molti dei produttori di energia rinnovabile, mentre Enel mantiene un valore di 1,7 (Enel 2024), in linea con una strategia di riduzione del debito iniziata nel 2023 (Group 2023). In chiusura vi sono invece

First Solar e LONGi che, rispettivamente con valori di 0,3 (F. Solar 2023) e 0,6 (L. G. Energy 2023), evidenziano una solidità patrimoniale importante che consente loro di autofinanziare le attività attraverso i flussi di cassa o gli incentivi pubblici. In ultimo, la Figura 5.8 rappresenta il

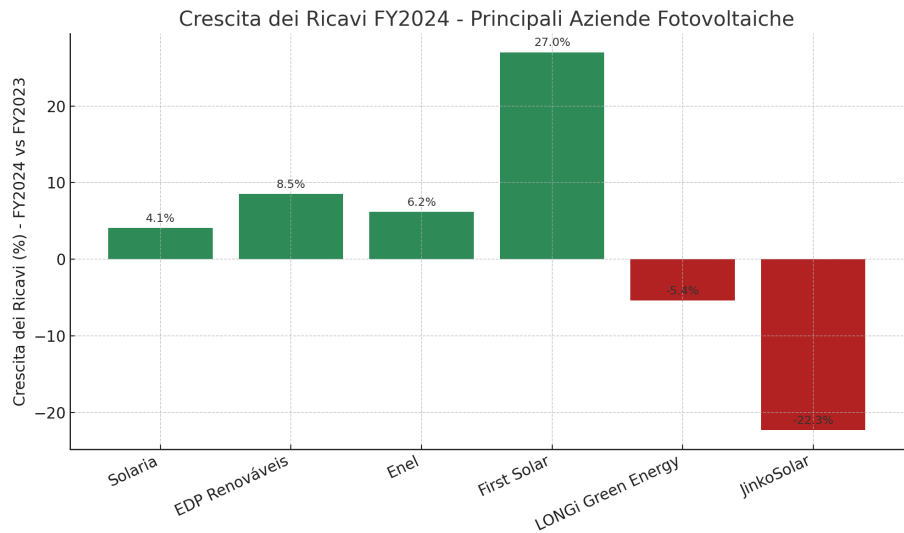


Figura 5.8: Confronto sull’andamento di crescita dei ricavi delle principali aziende operanti nei vari ambiti del fotovoltaico

trend dei ricavi nell’anno 2024: dal grafico si evince il dominio di First Solar che, con un +27% dovuto agli incentivi e alla crescita delle vendite, domina sui competitors. A seguire, EDP Renováveis (+8,5%), Enel(+6,2%) e Solaria Energia (+4,1%) fanno registrare valori in leggera crescita, segnalando così una fase di consolidamento. Discorso opposto per LONGi(-5,4%) e Jinko Solar (-22,3%), che registrano una diminuzione dei ricavi dovuta sia al calo del prezzo dei moduli che all’agguerrita concorrenza.

Regolamentazione e fattori esterni impattanti sul settore fotovoltaico

6.1 Normative e regolamentazione

La grande crescita che il fotovoltaico ha attraversato nell'ultimo decennio ha determinato, oltre ad un costante progresso tecnologico, anche una rapida espansione del mercato globale ad esso riferito. Tutto ciò ha avuto come conseguenza la necessità di sviluppare, parallelamente alla crescita del settore, un quadro normativo e regolatorio entro il quale fissare limiti e comportamenti concessi e non concessi sia lato produttori che lato consumatori. Si è quindi resa necessaria la scrittura, pubblicazione e messa in vigore di complessi sistemi di norme di tipo internazionale, ma anche comunitario e prettamente nazionale che riflettono la maturità del settore e il suo allineamento ai mercati energetici con prospettive di crescita a lungo periodo.

6.1.1 Quadro normativo a livello globale

A livello internazionale, la struttura della disciplina fotovoltaica non è lineare, bensì è costituita da una combinazione tra standard tecnici, iniziative di governance energetica e accordi internazionali che, pur non essendo un corpo normativo vincolante, svolgono la funzione di garantire dei riferimenti condivisi in materia di sicurezza, efficienza e qualità dei sistemi fotovoltaici (International Energy Agency 2024). Tra i vari enti che svolgono un ruolo centrale in ambito regolatorio, spicca sicuramente l'International Electrotechnical Commission (IEC), che, in collaborazione con l'International Organization for Standardization, ha elaborato i principali standard tecnici di riferimento per il fotovoltaico, rappresentati dalle norme IEC61215 e IEC61730, che costituiscono la base per l'ottenimento di certificazioni di qualità nonché un requisito essenziale sia per l'immissione dei moduli nel mercato internazionale che per l'accesso a incentivi e sovvenzioni di tipo economico (I. E. Commission 2016). Sul piano politico e strategico, svolgono un ruolo centrale sia l'International Energy Agency (IEA) che l'International Renewable Energy Agency (IRENA), che si occupano di promuovere obiettivi globali e di tracciare scenari di crescita per le capacità delle fonti energetiche rinnovabili, e in particolare per il fotovoltaico.

A questo proposito, nelle loro ultime pubblicazioni come il World Energy Outlook e il Renewables Global Status Report, IEA e IRENA hanno evidenziato la necessità di un incremento del tasso di crescita della generazione solare se si vuole rientrare all'interno delle scadenze contenute negli obiettivi per il risanamento climatico stabiliti dall'accordo di Parigi nel 2015 (Climate Change (UNFCCC) 2015). Parallelamente a ciò, hanno ottenuto sempre più rilievo tutte quelle norme e linee guida riferite alla sostenibilità della filiera produttiva: tra questi spiccano i criteri ESG (Environmental, Social, Governance), ossia dei parametri che valutano l'impatto di una tecnologia non solo dal punto di vista ambientale, ma anche sociale e governativo. Tutti questi criteri hanno portato le aziende produttrici a porre una maggiore attenzione nella catena di approvvigionamento, che in alcune zone come USA, Australia e Unione Europea ha significato la promulgazione di alcune norme per contrastare le pratiche non sostenibili e regolare le importazioni di moduli e componenti provenienti da fonti incerte o ad alto impatto ambientale (E. Commission 2022a). Infine, un ulteriore aspetto sul quale la regolamentazione si è soffermata riguarda l'antidumping: il mercato dei moduli fotovoltaici è infatti oggetto di continue dispute e misure protettive tanto da costringere gli Stati che, pur avendo grande concentrazione di imprese operanti nel settore (USA, Unione Europea, India), sono vittime della superpotenza della Cina, ad introdurre dazi nei confronti di essa, al fine di garantire condizioni eque di concorrenza (Organization 2023). Queste dinamiche impattano fortemente sui costi e sulla disponibilità delle componenti, influenzando così anche la potenziale diffusione della tecnologia fotovoltaica in un dato territorio.

6.1.2 Quadro normativo a livello nazionale

L'Italia, essendo uno dei Paesi a più alta incidenza di energia solare nel suo mix di risorse energetiche, ha sviluppato nel corso degli anni un articolato sistema di norme e procedure che, pur attenendosi alle normative europee, mantengono alcune peculiarità principalmente legate alla struttura amministrativa e alla spartizione delle mansioni tra Stato, Regioni e Comuni (Sicurezza Energetica (MASE) 2025). In ambito legislativo, sulla falsa riga della norma europea Red II, che si occupava di fissare obiettivi vincolanti circa la quantità di energia derivata da fonti rinnovabili nel totale prodotto e di promuovere principi come il diritto all'autoconsumo o la diffusione delle Comunità Energetiche Rinnovabili, venne emanato il Decreto Legislativo 199/2021, poi successivamente ampliato da Decreto Legislativo 190/2024, che ha snellito le procedure autorizzative e aggiornato la disciplina dell'Autorizzazione Unica (Italiana 2024), riducendo così i tempi di rilascio dei permessi, mentre per gli impianti di piccola taglia rimane la possibilità di realizzarli attraverso l'edilizia libera o mediante la normativa SCIA (Segnalazione Certificata di Inizio Attività), che consente di iniziare i lavori immediatamente, con il Comune di appartenenza che ha trenta giorni di tempo per effettuare i controlli (Regolazione per Energia Reti e Ambiente (ARERA) 2022). Una particolare attenzione è inoltre dedicata allo smaltimento dei

moduli fotovoltaici, regolato dal Decreto Legislativo 49/2014, in virtù del quale le aziende produttrici sono tenute a aderire a sistemi di raccolta, e a garantire la copertura economica mediante fondi dedicati. In questo contesto, il Gestore dei Servizi Energetici (GSE) trattiene una quota di garanzia destinata al corretto smaltimento dei rifiuti fotovoltaici per gli impianti incentivati da esso (Gestore dei Servizi Energetici (GSE) 2025). In ultima istanza, si menziona che i decreti sono anche accompagnati da regole di tipo tecnico che devono essere allineati ai principi internazionali redatti dallo IEC, che considera anche fattori come sicurezza elettrica, prevenzione degli incendi e connessione alla rete, che vengono controllati da enti quali CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano), ARERA e Terna (Regolazione per Energia Reti e Ambiente (ARERA) 2024).

6.2 Politiche governative e incentivi

Dopo aver trattato l'aspetto normativo del settore fotovoltaico, evidenziando le norme principali che ne regolano la diffusione sia a livello nazionale che internazionale, ora la trattazione verterà sulla descrizione delle principali politiche e degli incentivi che hanno influenzato la diffusione della tecnologia solare. Osservando la “mappa” globale del settore fotovoltaico, è infatti evidente che la diffusione non sia uniforme in tutte le zone, ma si constata la presenza di alcune aree in cui la diffusione degli impianti fotovoltaici è decisamente maggiore rispetto ad altre aree nelle quali la presenza è più rada. Le cause di ciò sono molteplici, ma sicuramente il ruolo dello Stato ha un peso importante: è infatti provato che il percorso di sviluppo del settore è stato fortemente influenzato dalle politiche governative e dagli incentivi economici che, sin dai primi anni Duemila, hanno costituito il principale motore di diffusione delle installazioni.

6.2.1 Quadro internazionale delle politiche di sostegno

A livello globale, per incentivare la produzione di energia fotovoltaica, i governi usano molteplici strumenti. Tra tutti, il più diffuso riguarda le tariffe incentivanti, anche definito come meccanismo feed-in-tariff (FiT), grazie al quale i produttori energetici possono usufruire di un prezzo fisso per ogni KWh di energia generato e immesso nella rete, indipendentemente dalle fluttuazioni del mercato elettrico. Questo strumento, introdotto in Germania nel 2000 con la Renewable Energy Sources Act, è ora presente in Spagna, Italia e molti altri Paesi dell'Unione Europea ed è considerato un precursore dei meccanismi di diffusione del fotovoltaico, nonostante negli ultimi anni sia stato parzialmente soppiantato dai feed-in-premium (FiP), con i quali la partecipazione al mercato elettrico viene incentivata attraverso un premio aggiuntivo per i produttori, che si va a sommare al prezzo di mercato dell'energia (E. Commission 2022b). Con la maturazione tecnologica che ha accompagnato la diffusione del fotovoltaico, molti Stati, oltre alle tariffe incentivanti, hanno varato dei sistemi di aste competitive, in cui le imprese presentano offerte

per fornire energia ad un prezzo determinato dal mercato (I. R. E. Agency 2022). Questo modello, accolto anche dall'IRENA, consente di abbattere i costi pubblici e migliorare l'efficienza allocativa, tanto da essere utilizzato sia nei Paesi dell'Unione Europea, ma anche in India, Cina e America Latina. Un altro strumento importante che i governi usano per stimolare l'adesione del fotovoltaico è rappresentato dai crediti d'imposta, che riducono il carico fiscale sull'investimento. Negli USA, attraverso l'Investment Tax Credit (ITC) consente di detrarre fino al 30% del costo di installazione degli impianti (U. D. o. Energy 2024), mentre con l'Inflation Reduction Act (IRA) del 2022 questi incentivi sono stati arricchiti con vari bonus legati a criteri come il rispetto delle condizioni salariali minime e l'utilizzo di materiali nazionali, promuovendo anche una trasformazione più sostenibile di tutto il settore industriale (Congress 2022). Sono molto diffusi, inoltre, anche i meccanismi di scambio sul posto (soprattutto nel fotovoltaico residenziale e nei Paesi con alte tariffe energetiche), che consentono ai piccoli produttori di compensare l'energia immessa nella rete con quella prelevata in momenti differenti, anche se nell'ultimo periodo si sta transitando sempre di più verso schemi più aderenti al mercato, come l'autoconsumo. Infine, è da notare l'incremento dell'utilizzo di sussidi diretti (finanziamenti agevolati o sussidi in conto capitale), che molti governi o enti istituzionali utilizzano per consentire il superamento della barriera di costo e favorire così la diffusione in aree in via di sviluppo.

6.2.2 Il sistema italiano

In ambito fotovoltaico, l'Italia è stata uno dei primi Paesi a adottare un sistema di tariffe incentivanti, attraverso i Conti Energia, cinque emendamenti dal 2005 al 2013 hanno promosso una rapida crescita del mercato fotovoltaico utilizzando un meccanismo a tariffa incentivante per ogni KWh di energia prodotta da impianti fotovoltaici connessi alla rete. Il livello delle tariffe era stabilito secondo un ordine decrescente a seconda della potenza dell'impianto in questione e dell'anno di entrata in esercizio dell'impianto. Gli effetti di questa politica furono subito importanti, tanto da portare la capacità installata nel territorio italiano da poche decine di MW a oltre 18GW, uno dei valori più alti d'Europa (Servizi Energetici (GSE) 2024). Tuttavia, questa crescita così repentina portò con sé diversi effetti collaterali: si sviluppò, infatti, una tipologia di mercato eccessivamente orientata verso i sussidi, oltre al fatto che si verificò un aumento degli oneri economici del settore lato consumatori. Questi fenomeni trainarono il settore verso una fase di rallentamento tanto che, dopo la chiusura del quinto Conto Energia nel 2013 il crollo degli investimenti fu tale da portare gli enti governativi a pianificare un'inversione di rotta nella politica degli incentivi, spostando il focus verso meccanismi fiscali e strumenti volti all'autoconsumo. Il nuovo sistema, vigente ancora oggi, si fonda su un articolato sistema di strumenti differenziati a seconda del tipo di utente e della portata dell'investimento. In ambito residenziale il principale meccanismo attualmente in vigore è la detrazione fiscale del 50% prevista dal Bonus Ristrutturazioni, che consente di recuperare la metà dell'investimento sostenuto per l'installa-

zione dell'impianto attraverso quote annuali di detrazione IRPEF. Questa agevolazione (valida fino al 31 dicembre 2025, salvo ulteriori proroghe) ha permesso negli ultimi anni di mantenere la domanda viva, nonostante l'assenza di tariffe garantite sul costo dell'energia (Entrate 2024). Un secondo pilastro è rappresentato dal meccanismo di Scambio Sul Posto (SSP), gestito dal GSE, che consentendo ai piccoli produttori di ottimizzare l'autoconsumo compensando l'energia usata con quella prodotta ha permesso di continuare la diffusione degli impianti di medio-piccola taglia sul territorio nazionale. Tuttavia, dal 2025 ha avuto inizio la fase di sostituzione del sistema basato sullo SSP in favore del meccanismo di Ritiro Dedicato o di altri meccanismi più aderenti al funzionamento del mercato, che responsabilizzano maggiormente i produttori circa la gestione dell'energia immessa nella rete. Parallelamente a ciò, il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) ha stabilito diversi aiuti volti alla realizzazione di impianti fotovoltaici innovativi e di grandi dimensioni: in particolare, vi è il programma "Parco Agrisolare", gestito dal Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE), che si concentra sul finanziamento di installazioni fotovoltaiche sui tetti di edifici agricoli e industriali, promuovendo al contempo la loro integrazione con le attività produttive e con il recupero di terreni già antropizzati e contribuendo quindi sia alla sostenibilità ambientale che alla tutela del paesaggio (Sicurezza Energetica (MASE) 2024b). Infine, un ulteriore elemento innovativo è rappresentato dalle Comunità Energetiche Rinnovabili, introdotte con il Decreto Legislativo numero 199 del 2021, che consentono a cittadini, imprese ed enti locali di "unirsi", creando una comunità volta alla condivisione e al consumo dell'energia rinnovabile. A supporto di ciò, il GSE fissa una tariffa più bassa per l'energia condivisa, calcolata sulla base dei KWh consumati collettivamente (Ufficiale 2021).

6.2.3 Limiti e prospettive future del fotovoltaico in Italia

Nonostante i numerosi progressi compiuti, il settore fotovoltaico in Italia è limitato da numerose criticità di tipo strutturale. Una delle principali è sicuramente il quadro organizzativo eccessivamente frammentato, con mansioni e competenze necessarie molto frammentate tra i vari enti Statali, Regionali e Comunali, che porta quindi ad una complessità dell'iter burocratico di approvazione dei progetti, provocando incertezza negli investitori (Legambiente 2024). Un'altra limitazione è rappresentata dalla dimensione della capacità di rete, che in alcune zone del Paese (specialmente nel meridione, data la maggiore potenzialità solare) non è in grado di assorbire la capacità prodotta dagli impianti fotovoltaici. A tal proposito, il potenziamento delle infrastrutture di produzione e trasmissione, così come dei sistemi di accumulo è sicuramente un punto che, in prospettiva rappresenta un intervento necessario per aumentare la quota solare all'interno del mix energetico (Sicurezza Energetica (MASE) 2024a). In ambito di politica pubblica, il governo sta cercando di snellire le complessità burocratiche ad oggi presenti attraverso diversi decreti, tra cui il Decreto Aree Idonee, promulgato dal MASE nel 2024. In ultima istanza, il

raggiungimento degli obiettivi fissati dal Piano Nazionale Integrato Energia e Clima (PNIEC), che prevede l'installazione di 80GW di capacità entro il 2030, richiederà un'accelerazione significativa rispetto ai ritmi attuali, che dovrà essere data attraverso una politica incentivante e di miglioramento delle infrastrutture, che miri ad attrarre un maggior numero di investitori, così da aumentare la capacità installata (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) 2024).

6.3 Impatto ambientale e sostenibilità

Successivamente alla trattazione riguardante gli incentivi e le politiche governative a sostegno del settore fotovoltaico, il focus della trattazione ora verterà sull'impatto ambientale e la sostenibilità che caratterizzano la tecnologia solare. Per comprendere a pieno la reale sostenibilità del fotovoltaico è infatti necessario analizzare l'intero ciclo vita della tecnologia, partendo dalla produzione dei componenti, passando per il funzionamento dell'impianto e fino ad arrivare alla fine del ciclo di vita e lo smaltimento, valutando, quindi, non solo i benefici ambientali, ma anche le criticità e i punti di miglioramento.

6.3.1 Fasi di produzione

Le fasi produttive della filiera fotovoltaica sono quelle che comportano gli impatti ambientali più significativi. In particolare, per la realizzazione dei moduli in silicio cristallino (circa il 90% del totale) sono richieste quantità di energia molto elevate, specialmente per le fasi di purificazione della materia prima e di fabbricazione del wafer. A ciò si aggiunge l'uso di materiali come vetro, alluminio, rame e piccole quantità di metalli preziosi o rari (argento, tellurio, indio e gallio) (Muteri et al. 2020). A livello quantitativo, Life Cycle Assessment (LCA) ha stimato che le emissioni di CO₂ legate alla produzione e all'intero ciclo vita del fotovoltaico oscillano tra 20g e 60g di CO₂ per KWh prodotto (NREL 2021). Un altro indicatore importante nello studio dell'impatto ambientale e della sostenibilità della tecnologia fotovoltaica è l'Energy Payback Time (EPBT), ovvero il tempo necessario affinché un impianto produca la stessa quantità di energia necessaria per fabbricarlo. Dalle osservazioni compiute dall'IEA, l'EPBT per un impianto fotovoltaico in silicio installato su un tetto di una località europea è in genere di circa due anni, in alcuni casi addirittura di un solo anno o meno (nel Sud Italia o nelle regioni mediterranee raggiunge anche valori vicini a 0,8 anni) (PVPS 2020). Considerando che la vita media di un impianto si aggira intorno ai 20-25 anni, ciò significa che oltre il 90% dell'energia generata nel corso della vita utile è effettivamente netta (PVPS 2020).

6.3.2 Fase operativa

Durante la fase di esercizio, i pannelli fotovoltaici rappresentano una tecnologia che non emette alcun tipo di gas serra né inquinanti atmosferici, non richiede combustibili né grandi interventi di manutenzione, per cui l'impatto ambientale diretto durante l'utilizzo è quasi trascurabile, senza contare i benefici che comporta la diffusione del fotovoltaico, tutti collegati alla riduzione della dipendenza dalle fonti fossili e al miglioramento della qualità dell'area, specialmente nelle zone urbane. Dal punto di vista della durabilità, la maggior parte dei moduli, anche dopo il periodo indicato di 20-25 anni, riesce a mantenere circa l'80% della capacità di generazione di energia, con un tasso di degrado che si aggira intorno allo 0,5% annuo (Parliament e Council 2012). Tuttavia, nonostante tutti questi benefici, vi sono anche delle criticità, essenzialmente legate all'utilizzo del territorio. Infatti, la costruzione degli impianti fotovoltaici di grandi dimensioni può interessare zone normalmente usate in campo agricolo o naturale, generando così conflitti d'uso o alterazione paesaggistiche. Una possibile soluzione a questi problemi è rappresentata dall'agrivoltaico, che prevede l'integrazione tra generazione di energia fotovoltaica in una determinata area e produzione agricola realizzata nella stessa area. Con questa configurazione si può mantenere la produttività agricola aumentando la sostenibilità complessiva del sistema.

6.3.3 Fine vita e riciclo

Tra tutti i temi connessi alla sostenibilità analizzati finora, quella del riciclo è sicuramente quello più attuale, considerato che i primi grandi impianti installati nei primi anni Duemila, stanno raggiungendo il fine vita. A livello di regolamentazione, nell'Unione Europea, i pannelli fotovoltaici sono classificati come RAEE (Rifiuti da Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche) e devono essere smaltiti secondo la direttiva 2012/19/UE (Parliament e Council 2012). Ad oggi, i processi di riciclo consentono di recuperare circa il 90-95% dei materiali che compongono un modulo in silicio cristallino, tra cui vetro, alluminio, silicio e rame. Tuttavia, risulta complicato e costoso il recupero di alcuni materiali preziosi come argento e indio, per cui, in ottica futura, una sfida potrebbe sicuramente essere rappresentata dalla creazione di una filiera dedicata esclusivamente allo smaltimento dei rifiuti fotovoltaici che permetta non solo di ridurre l'impatto ambientale di essi, ma anche di recuperare del materiale di valore che altrimenti verrebbe perso, tenendo in considerazione che nei prossimi anni la quantità di moduli fotovoltaici da smaltire crescerà rapidamente, fino a raggiungere i 60 milioni di tonnellate entro il 2050 (I. R. E. Agency 2019).

6.3.4 Prospettive future

Dall'analisi appena effettuata emerge quindi che il fotovoltaico, pur non essendo una tecnologia ad impatto zero è comunque una delle soluzioni più efficaci e sostenibili per la transizione ecolo-

Indicatore	Fotovoltaico	Fonti fossili
Emissioni	20-60 g CO ₂ /KWh	400-1000 g CO ₂ /KWh
Energy Payback Time	0,8-2 anni	-
Vita utile	25-30 anni	20-40 anni
Materiali Riciclabili	>90%	<50%

Tabella 6.1: Confronto parametrico tra il fotovoltaico e le fonti fossili

Fonte: PVPS) 2020

gica. Per il futuro, l'incremento della diffusione di questa tecnologia dipenderà da diversi fattori, tra i quali spicca l'innovazione tecnologica, che avrà come obiettivi principali quello di permettere di ridurre l'uso di materiale rari e di diminuire il consumo energetico. Oltre alla tecnologia, il focus futuro nel settore fotovoltaico sarà orientato sia verso la creazione di un'economia circolare, realizzabile attraverso moduli progettati per essere smontati e riciclati con facilità, ma anche verso la decarbonizzazione della catena di produzione, ottenibile attraverso l'utilizzo di energia rinnovabile nei contesti industriali e con l'acquisto di materie prime tracciate.

Conclusioni

L'analisi effettuata nel presente elaborato ha permesso di delineare il complesso e articolato quadro del settore fotovoltaico, evidenziano i vari aspetti cardine come rilevanza strategica nel processo di transizione energetica e le varie implicazioni economiche, tecnologiche e ambientali, mettendo così in luce la profonda dinamicità che caratterizza il mercato energetico e il ruolo centrale che il settore fotovoltaico ricopre in esso. In particolare, attraverso l'analisi della domanda è emerso come la crescita che ha avuto il fotovoltaico sia il risultato di un insieme di variabili di tipo economico, tecnologico e sociale. Negli ultimi anni, infatti, la crescente consapevolezza ambientale dei consumatori, unita alla riduzione dei costi di manutenzione e installazione dei moduli e al progressivo miglioramento delle prestazioni degli impianti, ha determinato una grande espansione della domanda sia nel segmento residenziale che in quello industriale. Tuttavia, oltre alla classiche dinamiche di mercato che influenzano la domanda (ad esempio variazioni di prezzo, beni sostituti e complementari), rimane centrale l'influenza di fattori esterni, come la stabilità normativa, la disponibilità di incentivi fiscali e la semplicità delle procedure amministrative, elementi che, se non opportunamente gestiti, possono rallentare la diffusione delle installazioni. L'analisi del segmento dell'offerta ha invece evidenziato la centralità del tema della globalizzazione di questo segmento e la concentrazione della produzione in pochi poli industriali, situati soprattutto in Cina o, più in generale, nell'Asia Orientale. A causa di ciò, i mercati situati in aree differenti del globo risultano profondamente dipendenti dalle importazioni di componenti fotovoltaici, e, in particolare, di moduli e celle di silicio. Tale contesto comporta necessariamente il porsi questioni rilevanti in termini di sicurezza energetica e autonomia industriale, specialmente in un contesto di instabilità geopolitica e di competizione tecnologica internazionale. Nonostante ciò, i principali mercati alternativi a quello cinese, ossia il mercato americano e quello europeo, stanno progressivamente orientando le proprie strategie verso il rafforzamento delle catene di fornitura interne attraverso lo sviluppo di tecnologie di nuova generazione, che puntino su altre materie prime e che quindi consentano di liberarsi dalla dipendenza delle importazioni puntando su innovazione, qualità e sostenibilità ambientale come elementi distintivi. Sotto il profilo economico finanziario, invece, è stata confermata la forte dipendenza del mercato globale dal segmento asiatico e, in particolare, da pochi produttori tutti localizzati in Cina, Paese che, oltre a possedere grandi risorse di materie prime, attua politiche in

grado di ridurre il costo dell'energia per le aziende operanti in settori con procedure altamente energivore come quelle concernenti la produzione di moduli e componenti fotovoltaici. Si evidenzia in questa sezione, inoltre, una forte eterogeneità di marginalità e redditività a seconda del segmento della filiera in cui si opera, con i grandi colossi della produzione di componenti che, pur detenendo gran parte delle quote di mercato, non riescono ad estrapolare grandi margini, cosa che invece riescono a fare le imprese che operano nel ramo della produzione e distribuzione di energia prodotta con l'utilizzo degli impianti fotovoltaici. Infine, con l'analisi delle quadro normativo e della sostenibilità si è voluto mettere in risalto l'importanza cruciale del quadro regolatorio come motore di sviluppo del settore. Inoltre, l'evoluzione delle politiche europee e nazionali (compresi gli incentivi derivanti dalla loro applicazione), ha fornito impulsi determinanti alla diffusione delle energie rinnovabili, ma ha anche evidenziato la necessità di una maggiore coerenza e stabilità nel tempo. Per ciò che concerne la sostenibilità, infine, è lampante che essa non si limiti più alla riduzione delle emissioni di CO₂, bensì essa implichi una visione più ampia che include l'intero ciclo di vita dei prodotti, l'impatto sociale degli investimenti e la governance etica delle imprese.

L'insieme di tutti i risultati ottenuti consente, quindi di formulare alcune considerazioni generali riguardo il settore fotovoltaico, a cominciare dal fatto che l'evoluzione di esso è il chiaro manifesto di come la competitività economica e la sostenibilità ambientale non siano più obiettivi contrapposti, ma dimensioni complementari di uno stesso processo. La riduzione dei costi tecnologici e la crescente efficienza dei sistemi fotovoltaici dimostrano, infatti, che la transizione ecologica può essere anche una opportunità economica e, in questo senso, il fotovoltaico si propone come volano per la creazione di nuove filiere produttive, occupazione qualificata e sviluppo di competenze tecniche avanzate. Altro tema centrale che emerge dall'analisi compiuta riguarda la regionalizzazione delle strategie energetiche. Per il fotovoltaico, infatti, nonostante il mercato sia fortemente globalizzato e dipendente dalle importazioni cinesi, la capacità di ciascun Paese di sfruttare il vantaggio fornito dal fotovoltaico dipende dalla qualità delle proprie politiche industriali, fiscali e normative. L'Italia, ad esempio, pur disponendo di condizioni climatiche particolarmente favorevoli e di un tessuto imprenditoriale dinamico, deve ancora affrontare diversi ostacoli legati alla burocrazia e alla scarsità di investimenti in ricerca. Attraverso il fotovoltaico, quindi, risulta possibile contribuire a ridurre le disuguaglianze energetiche, favorendo l'accesso all'energia in aree isolate o economicamente svantaggiate, svolgendo una funzione sociale oltre che di approvvigionamento energetico.

Nonostante tutte queste caratteristiche positive, il settore presenta numerose criticità strutturali che lo rendono fragile. In primo luogo, a dipendenza dalle catene di fornitura globali espone il comparto a rischi di approvvigionamento e a fluttuazioni dei prezzi delle materie prime. La recente volatilità dei mercati internazionali ha dimostrato quanto sia fragile un sistema industriale privo di una solida base produttiva locale. In secondo luogo, un'altra criticità importante che è

emersa dall'analisi effettuata riguarda la gestione del fine vita dei moduli: infatti, sebbene essi abbiano una durata operativa di 20-25 anni, la crescente quantità di impianti installati negli ultimi decenni porterà a un incremento significativo dei rifiuti solari. Ciò richiede l'implementazione di sistemi di riciclo efficienti e sostenibili, in grado di recuperare materiali preziosi come silicio, vetro e metalli rari, riducendo così l'impatto ambientale complessivo del settore. Infine, un'ulteriore criticità risulta essere l'integrazione del fotovoltaico nelle reti elettriche esistenti: l'aumento della produzione da fonti rinnovabili comporta la necessità di sviluppare strutture di accumulo complesse e sistemi di gestione intelligente dell'energia. In questo contesto, le smart grid, così come le tecnologie di accumulo elettrochimico, rappresenteranno una chiave per garantire stabilità e continuità nella fornitura di energia, sebbene richiedano investimenti consistenti e un adeguato coordinamento regolatorio.

Proiettando lo sguardo sul futuro, è quindi evidente che il settore fotovoltaico è destinato a svolgere un ruolo sempre più centrale nel sistema energetico globale. Le proiezioni dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA) indicano che, entro il 2050, l'energia derivante dalle installazioni fotovoltaiche potrebbe rappresentare la principale fonte di produzione elettrica nel mondo. Ciò sarà possibile solo se i principali vettori di crescita, come l'innovazione tecnologica e la digitalizzazione riusciranno a continuare sui sentieri di crescita già intrapresi nel presente: in particolare, l'innovazione tecnologica dovrà continuare a rappresentare il principale motore di crescita, attraverso le ricerche su nuove generazioni di celle ad alta efficienza, come quelle a perovskite, sui moduli bifacciali e sui sistemi integrati nei materiali da costruzione (Building Integrated Photovoltaics, BIPV), mentre digitalizzazione e integrazione con l'accumulo energetico consentiranno una gestione più efficiente e decentralizzata dell'energia prodotta. Dal punto di vista economico, il settore offrirà crescenti opportunità di investimento, sia per gli operatori istituzionali sia per i piccoli produttori. Tuttavia, per garantire una crescita sostenibile sarà necessario sviluppare strumenti finanziari innovativi (green bonds, fondi ESG, piattaforme di crowdfunding energetico). Infine, sul piano sociale, la sostenibilità ambientale continuerà ad essere la stella polare dello sviluppo fotovoltaico. Affinché ciò accada, però, sarà necessario rafforzare i criteri ESG, promuovere la circolarità dei materiali e tutelare le comunità coinvolte nella transizione energetica.

In sintesi, a conclusione dell'elaborato è possibile affermare che il settore fotovoltaico non rappresenta solo una componente strategica della transizione energetica, ma anche un campo di innovazione economica e sociale la cui evoluzione riflette l'interazione dinamica tra tecnologia, mercato e politica, e offre un esempio concreto di come la sostenibilità possa tradursi in valore economico.

Bibliografia

- Aenert Energy News (2025). *Global Electricity Review 2025: Coal remains the world's largest power source*. Aenert Energy News. URL: <https://aenert.com/news-events/energy-news-monitoring/n/global-electricity-review-2025-coal-remains-the-worlds-largest-power-source/>.
- Agency, International Energy (2021). *World Energy Outlook 2021*. Disponibile al link indicato. Paris: IEA Publications. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>.
- (2022a). *Gas Market Report Q1 2022*. Disponibile al link indicato. Paris: IEA Publications. URL: <https://www.iea.org/reports/gas-market-report-q1-2022>.
- (2022b). *Solar PV Global Supply Chains*. Paris: IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/solar-pv-global-supply-chains>.
- (2023). *World Energy Outlook 2023*. Disponibile al link indicato. Paris: IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>.
- Agency, International Renewable Energy (2019). *Future of Solar PV: Deployment, Investment, Technology, Grid Integration and Socio-Economic Aspects*. Abu Dhabi: IRENA. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA_Future_of_Solar_PV_2019.pdf.
- (2022). *Renewable Power Generation Costs in 2021*. Disponibile al link indicato, luglio 2022. Abu Dhabi: IRENA. URL: <https://www.irena.org/publications/2022/Jul/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2021>.
- Analytics Arts (2024). *Prospettive e sviluppo del mercato dei pannelli fotovoltaici in Italia: un'analisi approfondita delle tendenze future*. Analytics Arts. URL: <https://www.analyticsarts.it/it/post/prospettive-e-sviluppo-del-mercato-dei-pannelli-fotovoltaici-in-italia-unanalisi-approfondita-delle-tendenze-future>.
- ArXiv (2025). *Flexible perovskite/silicon monolithic tandem solar cells with 29.9% efficiency*. ArXiv. URL: <https://arxiv.org/abs/2504.20760>.
- BloombergNEF (2023). *Green Finance Report*. BloombergNEF. URL: <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/global-clean-energy-investment-jumps-17-hits-1-8-trillion-in-2023-according-to-bloombergnef-report/>.

- BloombergNEF (2025). *Global PV Market Outlook 2025*. Disponibile al link indicato. BloombergNEF. URL: <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/new-energy-outlook/>.
- Chemie, Wacker (2024). *Preliminary Figures: WACKER Closes 2023 Below Previous Year Amid Weak Market Environment*. Comunicato stampa. Wacker Chemie. URL: <https://www.wacker.com>.
- Climate Change (UNFCCC), United Nations Framework Convention on (2015). *Paris Agreements*. Paris: UNFCCC Publications.
- Commission, European (2021). *Communication on Energy Prices and Security of Supply*. Comunicazione pubblicata a ottobre 2021. Brussels: European Commission. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0660>.
- (mag. 2022a). *EU Solar Energy Strategy (COM(2022) 221 final)*. Bruxelles: European Commission. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022DC0221>.
- (2022b). *Guidelines on State aid for climate, environmental protection and energy 2022 (CEEAG)*. Bruxelles: EC Publications. URL: https://competition-policy.ec.europa.eu/public-consultations/2021-ceeag_en.
- Commission, International Electrotechnical (2016). *IEC 61730 1:2023 – Photovoltaic (PV) module safety qualification – Part 1: Requirements for construction*. Genève: IEC. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/59803>.
- Congress, U.S. (2022). *Inflation Reduction Act of 2022, Public Law 117–169*. Washington D.C.: U.S. Congress Publications. URL: <https://www.congress.gov/117/plaws/publ169/PLAW-117publ169.pdf>.
- EconomiaCircolare.com (2023). *Riciclo pannelli fotovoltaici*. EconomiaCircolare.com. URL: <https://economiecircolare.com/riciclo-pannelli-fotovoltaici/>.
- ENEA (2018). *Solare termico per usi domestici e industriali*. ENEA. URL: <https://www.efficientzaenergetica.enea.it/detrazioni-fiscali/ecobonus/vademecum/collettori-solari.html>.
- (2022). *nZEB Report 2022*. ENEA. URL: https://iris.enea.it/retrieve/46b719aab43-457d-b14f-064f17b7a085/Rapporto2022_web_221031.pdf.
- Enel (2024). *Solid results in 2024: positive evolution of integrated business*. Enel. URL: <https://www.enel.com/content/dam/enel-common/press/en/2025-march/Enel%20results%20FY%202024ENG.pdf>.
- Energia, Solaria (2025). *Relazione Finanziaria Semestrale H1 2025*. Disponibile al link indicato. Solaria Energia. URL: https://solariaenergia.com/wp-content/uploads/SOLARIA_H1_2025-final-version.pdf.

- Energy, LONGi Green (2023). *Annual Report for 2022 and 2023 Q1*. LONGi Green Energy. URL: <https://www.longi.com>.
- (2024). *Annual Report 2024*. Disponibile al link indicato. LONGi Green Energy. URL: https://static.longi.com/LON_Gi_annual_report_2024_0026f3477f.pdf.
- Energy, U.S. Department of (2022). *Solar Photovoltaics Supply Chain Deep Dive Assessment*. Disponibile al link indicato. Washington, DC: DOE Office of Policy. URL: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/Solar%20Energy%20Supply%20Chain%20Report%20-%20Final.pdf>.
- (2024). *Federal Solar Tax Credits for Businesses*. Washington D.C.: U.S. Department of Energy Publications.
- Entrate, Agenzia delle (2024). *Guida alle agevolazioni fiscali per il risparmio energetico e il fotovoltaico*. Roma: Agenzia delle Entrate. URL: https://www.agenziaentrate.gov.it/portale/documents/20143/233439/Guida_Ristrutturazioni_edilizie08092019.pdf.
- European Parliament and Council (2018). *Directive 2012/2001/EU*. Bruxelles: Official Journal of the European Union. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001>.
- Gestore dei Servizi Energetici (GSE) (2012). *Guida al mini-eolico*. GSE. URL: https://www.gse.it/documenti_site/Documenti%20GSE/Studi%20e%20scenari/11%20punto%20sull%27eolico.pdf.
- (2021). *Le biomasse: fonti, tecnologie e impieghi energetici*. Roma: GSE. URL: https://www.gse.it/documenti_site/Documenti%20GSE/Rapporti%20statistici/Rapporto%20Statistico%20GSE%20-%20FER%202021.pdf.
- (2022). *Rapporto statistico sul solare fotovoltaico 2022*. GSE. URL: https://www.gse.it/documenti_site/Documenti%20GSE/Rapporti%20statistici/GSE%20-%20Solare%20Fotovoltaico%20-%20Rapporto%20Statistico%202022.pdf.
- (2023). *Rapporto statistico impianti FER*. GSE. URL: https://www.gse.it/documenti_site/Documenti%20GSE/Rapporti%20statistici/Rapporto%20Statistico%20GSE%20-%20Energia%20da%20FER%20in%20Italia%20-%20anno%202023.pdf.
- (2025). *Rapporto statistico sul solare fotovoltaico 2023*. GSE. URL: https://www.gse.it/documenti_site/Documenti%20GSE/Rapporti%20statistici/Rapporto%20Statistico%20GSE%20-%20Energia%20da%20FER%20in%20Italia%20-%20anno%202023.pdf.
- Group, Enel (2023). *Relazione finanziaria annuale 2023*. Disponibile al link indicato. Enel Group. URL: <https://www.enel.com/content/dam/enel-com/documenti/investitori/>

- informazioni-finanziarie/2023/annuali/it/relazione-e-bilancio-di-esercizio_2023.pdf.
- Group, Enel (2024). *Relazione finanziaria semestrale 2024*. Disponibile al link indicato. Enel Group. URL: https://www.enel.com/content/dam/enel-com/documenti/investitori/informazioni-finanziarie/2024/interim/it/relazione-finanziaria-semestrale_30giugno2024.pdf.
- India, Mercom (apr. 2024). *2023 Solar Module Market Share: Jinko, LONGi, JA Solar Lead*. Disponibile al link indicato. Mercom India. URL: <https://www.mercomindia.com/2023-solar-module-market-solar-waaree-and-trina>.
- Insights, Global Growth (2024). *Solar Photovoltaic Installations Market Report 2024*. Disponibile al link indicato. Global Growth Insights. URL: <https://www.globalgrowthinsights.com/market-reports/solar-photovoltaic-installations-market-108576>.
- International Energy Agency (2024). *Solar PV overview*. IEA. URL: <https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv>.
- (2025). *Global Electricity Review*. IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/electricity-2025>.
- International Energy Agency (IEA) (2023a). *Renewables: Analysis and forecast to 2028*. IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>.
- (2023b). *World Energy Outlook 2023*. IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>.
- International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA PVPS) (2024). *Snapshot of Global PV Markets 2024*. Paris: IEA. URL: <https://iea-pvps.org/snapshot-reports/snapshot-2024/>.
- (2025). *Snapshot of Global PV Markets 2025*. Paris: IEA. URL: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2025/04/Snapshot-of-Global-PV-Markets_2025.pdf.
- International Renewable Energy Agency (IRENA) (2019). *Digitalization and Energy*. IRENA. URL: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Innovation/Digitalisation>.
- (2023). *Renewable Energy Market Analysis 2023*. IRENA. URL: <https://www.irena.org/Publications/2023/Jul/Renewable-energy-statistics-2023>.
- (2024a). *Renewable Capacity Statistics 2024*. IRENA. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2024.pdf.
- (2024b). *Renewable Power Generation Costs in 2023*. IRENA. URL: <https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023>.

- ISE, Fraunhofer (2016). *Changes in Solar Cell Technology*. Friburgo: Fraunhofer ISE. URL: <https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2016/May/changes-in-solar-cell-technology.html>.
- (2025). *Annual Report 2024/2025*. Friburgo: Fraunhofer ISE. URL: <https://it.scribd.com/document/903432200/Fraunhofer-Ise-Annual-Report-2024-2025>.
- Italiana, Repubblica (2021). *Decreto Legislativo 8 novembre 2021, n. 199: Attuazione della direttiva (UE) 2018/2001 sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili*. 285. Disponibile al link indicato. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana. URL: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2021/11/30/21G00214/sg>.
- (2024). *Decreto Legislativo 8 novembre 2024, n. 190 — Disposizioni in materia di semplificazione dei procedimenti di autorizzazione per impianti da fonti rinnovabili*. Roma: Gazzetta Ufficiale.
- Legambiente (2024). *Comuni Rinnovabili 2024*. Roma: Legambiente. URL: <https://www.legambiente.it/wp-content/uploads/2021/11/Comuni-Rinnovabili-2024.pdf>.
- Li, H., Y. Wang e J. Zhang (2025). *Harnessing photovoltaic innovation: Advancements and challenges in solar energy technologies*. Pubblicato in *Renewable Energy Focus*, 46, 100–114. Elsevier. URL: <https://doi.org/10.3390/su16031032>.
- Limited, GCL Technology Holdings (2025). *GCL Technology Reports Earnings Results for the Full Year Ended December 31, 2024; Expects Loss & Strategy Adjustment*. Notizie aziendali 2025. Marketscreener. URL: https://it.marketscreener.com/services/solutions/?utmzb_campaign=cmp++popin_cmp_refuser-s-abonner+refuser-s-abonner&utmzb_content=++++&utmzb_source=popin&utmzb_medium=url_declenchement.
- Magazine, PV (2024). *JinkoSolar posts \$1 billion net profit for 2023*. Disponibile al link indicato. PV Magazine. URL: <https://www.pv-magazine.com/2024/04/24/jinkosolar-posts-1-billion-net-profit-for-2023/>.
- (2025). *Scientists build 29.5% efficiency all-perovskite tandem solar cells through universal interfacial engineering*. PV Magazine. URL: <https://www.pv-magazine.com/2025/06/10/scientists-build-29-5-efficiency-all-perovskite-tandem-solar-cells-through-universal-interfacial-engineering/>.
- Ministero dell'Agricoltura (2023). *Linee guida per il PNRR*. Ministero dell'Agricoltura. URL: <https://www.masaf.gov.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/17911>.
- Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) (2024). *PNIEC aggiornato a gennaio 2024*. MASE. URL: https://www.mase.gov.it/portale/documents/d/guest/pniec_2024_revfin_01072024-pdf.

- Mustafa, M., N. Hashim e M. Aliyu (2024). *Barriers to Solar PV Adoption in Developing Countries: A Systematic Review*. Pubblicato in Sustainability, 16(3), 1032. MDPI. URL: <https://doi.org/10.3390/su16031032>.
- Muteri, V. et al. (2020). *Review on Life Cycle Assessment of Solar Photovoltaic Panels*. 1. Energies, p. 252. URL: <https://doi.org/10.3390/en13010252>.
- NREL (2021). *U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmark: Q1 2021*. Golden: NREL. URL: <https://research-hub.nrel.gov/en/publications/us-solar-photovoltaic-system-and-energy-storage-cost-benchmark-q1-3/>.
- (2023). *Solar Installed System Cost Analysis*. NREL. URL: <https://www.nrel.gov/solar/market-research-analysis/solar-installed-system-cost>.
- Organization, World Trade (2023). *Reports on Anti-Dumping Measures in the Solar PV Sector*. Genève: WTO Publications.
- Parliament, European e Council (2012). *Directive 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment (WEEE)*. Bruxelles: Official Journal of the European Union. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2012/19/oj/eng>.
- Power, Enel Green (2025). *Pagina ufficiale 3Sun Gigafactory – Chi siamo / Innovazione*. Enel Green Power. URL: <https://www.enel.com/company/3sun-gigafactory>.
- PV, Tandem (2025). *Tandem PV raises \$50M to take back U.S. leadership with new perovskite solar manufacturing*. Tandem PV. URL: <https://www.tandempv.com/news/tandem-pv-raises-%2450m-to-take-back-u.s.-leadership-with-new-perovskite-solar-manufacturing>.
- PVPS), International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA (2020). *Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems: Task 12 report*. Paris: IEA. URL: <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/12/IEA-PVPS-LCI-report-2020.pdf>.
- RatedPower (2023). *Cost Breakdown of Utility-Scale PV Plants*. RatedPower. URL: <https://ratedpower.com/blog/solar-farm-costs>.
- Regolazione per Energia Reti e Ambiente (ARERA), Autorità di (2022). *Delibera 727/2022/R/eel – Regole tecniche per la connessione di impianti fotovoltaici in bassa tensione*. Milano: ARERA.
- (2024). *Relazione annuale sullo stato dei servizi energetici e ambientali*. Milano: ARERA.
- Renováveis, EDP (2024). *Investor Update 2024–2026 Strategy*. Disponibile al link indicato. EDP Renováveis. URL: https://www.edpr-investors.com/sites/edpr-investors/files/document/2025-01/EDPRInvestorPresentation_Aug24%20%281%29.pdf.

- Research, Industry (2024). *Solar PV Module Market Report 2024–2030*. Disponibile al link indicato. Industry Research. URL: <https://www.industryresearch.biz/market-reports/solar-pv-module-market-104417>.
- Reuters (2025). *Wacker Chemie core profit falls on lower prices and high energy costs*. Reuters. URL: <https://www.reuters.com>.
- Ricerca sul Sistema Energetico (RSE) (2021). *Analisi autoconsumo e nuove configurazioni*. RSE. URL: <https://www.rse-web.it/wp-content/uploads/2021/03/Gli-schemi-di-Autoconsumo-Collettivo-e-le-Comunita.pdf>.
- Servizi Energetici (GSE), Gestore dei (2024). *Rapporto Statistico Solare Fotovoltaico 2023*. Roma: GSE. URL: https://www.gse.it/documenti_site/Documenti%20GSE/Rapporti%20statistici/Solare%20Fotovoltaico%20-%20Rapporto%20Statistico%202023.pdf.
- Sicurezza Energetica (MASE), Ministero dell’Ambiente e della (giu. 2024a). *Decreto aree idonee per le fonti rinnovabili*. Roma: Gazzetta Ufficiale. URL: https://www.gazzettaufficiale.it/atto/serie_generale/caricaDettaglioAtto/originario?atto.dataPubblicazioneGazzetta=2024-07-02&atto.codiceRedazionale=24A03360&elenco30giorni=true.
- (2024b). *Piano Nazionale Integrato per l’Energia e il Clima (PNIEC)*. Roma: MASE. URL: https://www.mase.gov.it/portale/documents/d/guest/pniec_2024_revfin_01072024-pdf.
- (2025). *Relazione annuale sullo stato delle fonti rinnovabili in Italia – Dati 2024*. Roma: Gazzetta Ufficiale.
- Solar, First (2023). *Annual Report 2023*. Disponibile al link indicato. First Solar. URL: https://s202.q4cdn.com/499595574/files/doc_financials/2023/ar/first-solar-web-pdf-2023-annual-report.pdf.
- Solar, Rayzon (2025). *Solar PV module innovations for 2025*. Rayzon Solar. URL: <https://rayzonsolar.com/blog/solar-pv-module-innovations-2025>.
- Solar Power Europe (2023a). *Global Market Outlook 2023–2027*. Solar Power Europe. URL: <https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/global-market-outlook-for-solar-power-2023-2027/detail>.
- (2023b). *Global Market Outlook 2023–2027*. Solar Power Europe. URL: <https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/global-market-outlook-for-solar-power-2023-2027/detail>.
- Sungrow Power Supply Co., Ltd. (2024). *Annual Report 2023: Operating Revenue Witnessed a Robust Growth of 79.5%*. Sungrow Power Supply Co., Ltd. URL: <https://en.sungrowpower.com/newsDetail/5145/sungrow-releases-annual-report-2023-operating-revenue-witnessed-a-robust-growth-of-79-5>.

- TaiyangNews (gen. 2025). *Top 10 Solar Module Manufacturers Shipped 502 GW in 2024*. Disponibile al link indicato. Taiyang News. URL: <https://taiyangnews.info/business/top-10-solar-module-manufacturers-shipped-502-gw-2024>.
- Tech, PV (2020). *The Solar Cell Wafering Process (a cura di Fraunhofer ISE)*. PV Tech. URL: <https://www.pv-tech.org/technical-papers/the-solar-cell-wafering-process/>.
- Ufficiale, Gazzetta (2021). *Decreto Legislativo 8 novembre 2021, n. 199 — Attuazione della direttiva (UE) 2018/2001*. Roma: Gazzetta Ufficiale. URL: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2021/11/30/21G00215/sg>.
- Wood Mackenzie Power & Renewables (2025). *Global Solar PV Module Manufacturer Rankings 2024*. Wood Mackenzie. URL: <https://www.woodmac.com/press-releases/2025-solar-ranking/>.