

8.6. IMPIANTI FOTOVOLTAICI

Il solare fotovoltaico si distingue, nel panorama delle fonti rinnovabili, per la sua implicita natura di consentire la produzione di energia elettrica in modo modulare, senza alcuna forma d'inquinamento, né acustico, né termico, né di altro tipo (non vi sono parti in movimento, il processo di conversione dell'energia avviene a temperatura ambiente e non vengono bruciati combustibili) e con una richiesta di manutenzione molto contenuta.

La tecnologia fotovoltaica, infatti, è caratterizzata da un processo di conversione diretta della radiazione solare in energia elettrica, il quale avviene integralmente all'interno della cella (o dispositivo fotovoltaico). Essa costituisce l'atomo di un impianto, la cui potenza nominale può quindi variare da pochi mW alla decina di MW. Inoltre, essendo la fonte solare diffusa sul territorio e con livelli d'insolazione quasi sempre compatibili al fotovoltaico, è anche possibile produrre in loco, e nelle quantità volute, l'energia richiesta dall'utenza.

La tecnologia fotovoltaica è molto giovane; essa risale alla fine degli anni '50 nell'ambito dei programmi spaziali, per i quali era necessario disporre di una fonte di energia affidabile e inesauribile, e solo nei primi anni 80 (essenzialmente a seguito della prima crisi petrolifera) si è rapidamente affermata anche nel settore delle applicazioni terrestri.

In generale, vengono seguite due linee di sviluppo per i sistemi di produzione, oltre a quella afferente allo spazio. La prima, relativa a impianti di grossa taglia (con potenze nominali comprese tra le centinaia e le migliaia di kW), è finalizzata alla produzione di energia prevalentemente a sostegno di reti deboli, quali quelle delle isole minori; nel corso di questi ultimi anni, questi sistemi di potenza sono stati sempre più affiancati dalla cosiddetta generazione distribuita, cioè si è affermato il ricorso a piccoli impianti fotovoltaici (di potenza nominale di poche decine di kW_p al massimo), connessi alla rete elettrica di distribuzione. La seconda linea di sviluppo riguarda, invece, gli impianti per l'alimentazione di utenze isolate, sia nel campo residenziale, sia in quello industriale (telecomunicazioni, segnaletica, ecc.).

Sebbene la tecnologia fotovoltaica non sia ancora matura, e quindi non competitiva rispetto alle altre fonti rinnovabili, come l'eolico e il solare termico a bassa temperatura, essa comunque, grazie ad alcune peculiarità che la distinguono, risolve efficacemente i problemi di elettrificazione rurale nei paesi in via di sviluppo e comincia a concretizzarsi nelle realtà più industrializzate, sia attraverso l'integrazione negli edifici (tetti e facciate fotovoltaiche), sia per la realizzazione di impianti di potenza. Infatti, proprio grazie alle sue forti potenzialità di sviluppo tecnologico e alle caratteristiche intrinseche come la modularità e la semplicità di utilizzo, essa rappresenta oggi, da un lato, la tecnologia di più immediata integrazione nelle strutture edilizie nel settore residenziale, dei servizi e dell'arredo urbano e, dall'altro, un valido contributo nel soddisfacimento della sempre crescente domanda energetica: sono recenti, infatti, gli annunci di due Utilities statunitensi (California e Arizona) relative alla imminente installazione di centrali da 5 e 4 MW_p rispettivamente.

8.6.1. *La situazione italiana nel contesto internazionale*

Il mercato fotovoltaico mondiale ha conosciuto negli ultimi anni notevoli sviluppi con tassi di crescita annuali medi, nell'ultimo periodo, di oltre il 30%; la capacità produttiva è passata dai 45 MW del 1990 agli oltre 500 MW del 2002, mentre alcune stime non ufficiali parlano di circa 700 MW nel 2003.

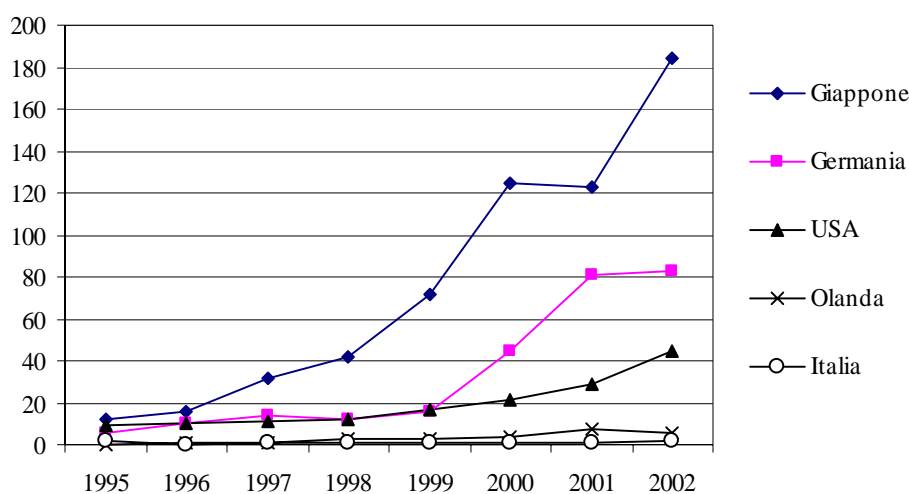
In tabella 8.6.1 sono riportate le potenze installate nei paesi IEA dal 1993 al 2001; in figura 8.6.1 l'andamento, nello stesso arco di tempo, di tali installazioni in Italia è confrontato con quello dei 4 paesi in cui si è maggiormente sviluppato il fotovoltaico: Giappone, Germania, USA e Olanda.

Tabella 8.6.1 – Potenza fotovoltaica installata nei paesi IEA nel periodo 1993-2002 (MW_p)

	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Giappone	5,27	6,97	12,14	16,26	31,66	42,1	71,9	124,7	122,8	184,042
Germania	3,281	3,54	5,35	10,1	14	12,01	15,6	44,3	80,9	82,6
USA	6,8	7,5	9	10,4	10,8	12,1	17,2	21,5	29	44,4
Olanda	0,371	0,322	0,437	0,857	0,779	2,444	2,715	3,564	7,741	5,826
Australia	1,6	1,8	2	3	3	3,82	2,8	3,89	4,39	5,53
Francia	0,299	0,388	0,515	1,454	1,712	1,512	1,49	2,21	2,569	3,341
Austria	0,244	0,295	0,298	0,378	0,469	0,653	0,811	1,228	1,7	2,4
Italia	3,6	2,01	1,705	0,213	0,701	0,971	0,795	0,525	1	2
Svizzera	1,065	0,917	0,791	0,909	1,332	1,776	1,9	1,9	2,3	1,9
Canada	0,28	0,27	0,35	0,7	0,82	1,09	1,356	1,328	1,646	1,197

Fonte: IEA-PVPS 2003

Figura 8.6.1 – Andamento del fotovoltaico in alcuni paesi IEA, anni 1993- 2001 (MW_p)



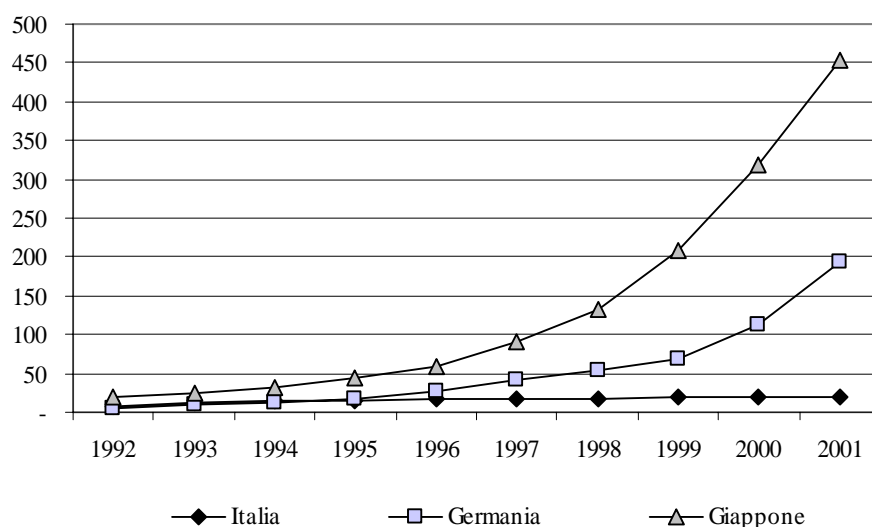
Fonte: Elaborazioni ENEA su dati IEA 2003

Alcuni paesi con un elevato livello di industrializzazione, come il Giappone, gli USA, e la Germania, investono da tempo nel settore fotovoltaico attraverso consistenti programmi di finanziamento alla ricerca e di sostegno della domanda. Ma più recentemente, anche altri paesi, come l'Austria, la Svizzera, l'Olanda, la Spagna e l'Australia hanno approntato ambiziosi programmi nazionali in questo settore, attraverso i quali è ipotizzabile conseguire anche alcuni vantaggi competitivi sul mercato internazionale.

In particolare, è stato intrapreso in Germania un programma d'investimento riguardante i tetti fotovoltaici, che ha previsto la concessione da parte della Banca Statale di prestiti a interesse zero a favore d'installazioni con potenze a partire da 1 kW_p. Il successo di questo programma è legato soprattutto al passaggio da una logica in conto capitale¹ ad una in conto energia², alla sua indipendenza dal budget annuale dello Stato o delle Regioni, a una maggiore garanzia sull'affidabilità degli impianti realizzati, a una procedura più snella - non dovendo passare attraverso amministrazioni pubbliche - e a una durata pluriennale, che permette alle imprese di programmare gli investimenti.

Il Giappone, invece, ha adottato una politica di incentivazione in conto capitale interna e un'azione alquanto protezionistica sul proprio mercato, che ha consentito un ingente sviluppo dell'industria nazionale, che ha facilmente conseguito la leadership mondiale in questo settore³. Il principale risultato del programma è stato rappresentato dall'abbattimento dei costi di realizzazione degli impianti. I motivi di ciò sono da ritrovarsi nell'effetto scala, legato al fortissimo sviluppo dell'industria nazionale e del mercato interno, e nel coinvolgimento delle grandi imprese di costruzione nell'integrazione del fotovoltaico nei nuovi edifici⁴. Inoltre, grazie alla riduzione dei costi d'impianto e al successo dell'iniziativa nel pubblico, è stata possibile una riduzione progressiva delle percentuali di contributo pubblico al programma dal 70% del 1994 al 30% del 2001. Gli effetti delle politiche di incentivazione adottate in Giappone e in Germania hanno contribuito, d'altra parte, a determinare la particolare crescita che si è verificata in questi due paesi nel corso degli ultimi 10 anni e che è graficizzata in figura 8.6.2.

Figura 8.6.2 – Installazioni fotovoltaiche in Giappone, Germania e Italia, anni 1992-2001 (kW)



Fonte: Elaborazione su dati IEA

¹ Finanziamento a fondo perduto di una parte dell'investimento.

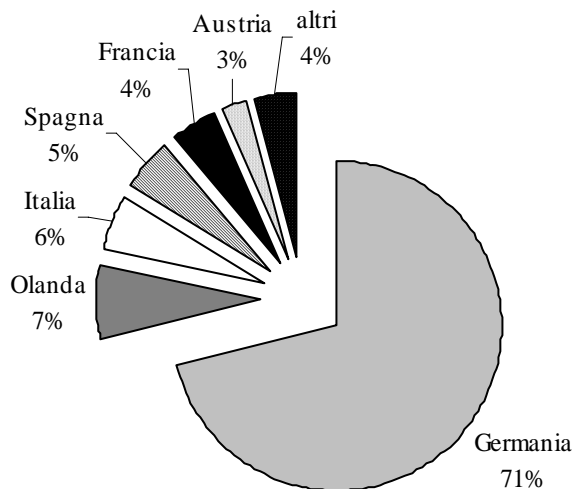
² Tariffa agevolata per l'energia prodotta dall'impianto.

³ Nel 2002 in Giappone sono stati prodotti 260 MW, circa il 54% del mercato mondiale riferito allo stesso anno.

⁴ L'integrazione dei sistemi fotovoltaici nelle strutture edilizie, in corso sia di realizzazione che di ristrutturazione, potrebbe ridurre del 25-35% i costi complessivi che dovrebbero essere sostenuti in caso applicazioni "retrofit" (installazione del fotovoltaico in strutture esistenti).

Come si vede in figura 8.6.3 è la Germania, con il 71% della produzione, a detenere in Europa la posizione di leadership nella produzione di moduli fotovoltaici.

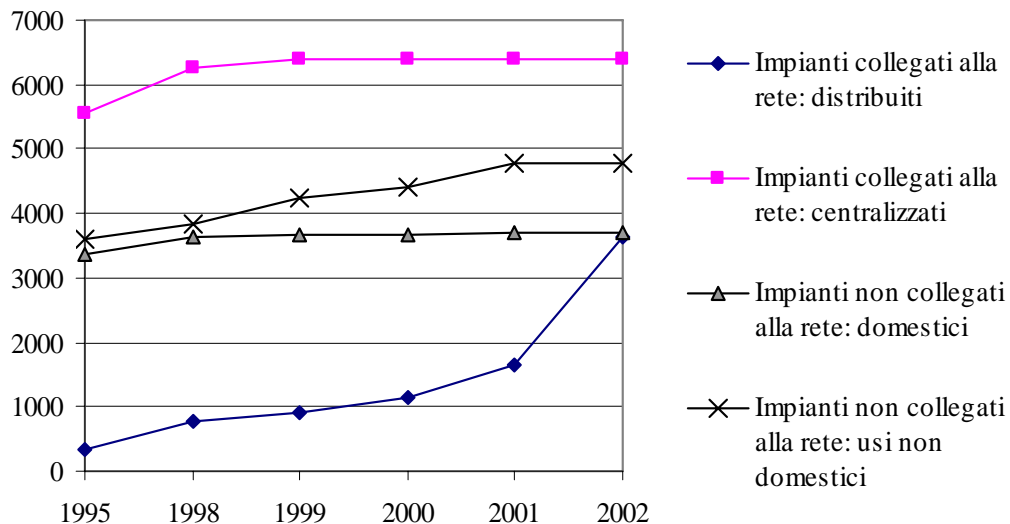
Figura 8.6.3 – Produttori di moduli fotovoltaici, Europa, anno 2002



Fonte: Eleborazione su dati "EUR Observ'ER"

Nella figura 8.6.4 è rappresentato l'andamento dell'energia elettrica prodotta in Italia con sistemi fotovoltaici dal 1995 al 2002 in relazione alle principali tipologie di impianto.

Figura 8.6.4 – Produzione di elettricità per tipologia di impianto FV dal 1995 al 2002 (MWh/anno)



Fonte: elaborazioni ENEA da fonti varie

In Italia, già dal 1988, il Piano Energetico Nazionale, nell'intento di diversificare le fonti di produzione e di ridurre la percentuale di energia importata, attribuiva al fotovoltaico un ruolo rilevante nell'ambito delle fonti rinnovabili, definendo diverse azioni per il suo sviluppo.

Tali azioni hanno iniziato a concretizzarsi però solo nel 2001, quando è stato definito e avviato il Programma "Tetti Fotovoltaici", promosso e in parte finanziato dal Ministero dell'Ambiente, con il supporto anche economico delle regioni e delle province autonome.

Il Programma, concepito di durata pluriennale, mira alla diffusione della tecnologia fotovoltaica mediante la concessione di contributi pubblici in conto capitale per la realizzazione di impianti di potenza compresa tra 1 kW_p e 50 kW_p, collegati alla rete elettrica e preferibilmente integrati nelle strutture edili. In tabella 8.6.2 è sintetizzato il quadro delle iniziative del Programma relative al periodo 2001-2004.

Per quanto riguarda il medio termine, l'Italia, con la delibera CIPE 126 del 1999 che approva il Libro Bianco Italiano, ha assunto come obiettivo di diffusione della tecnologia fotovoltaica l'installazione di 300 MW_p al 2008-2012.

Tabella 8.6.2 – Il Programma nel settore fotovoltaico del Ministero dell'Ambiente (2001-2004)

Programmi	Destinatari	Risorse MATT e Regioni (M€)	contributo (%)	Installazioni previste (MW)
Bando nazionale (2001)	Enti locali, Università	10,5	75%	1,7
Bandi regionali (2002-2003)	tutti	30	70%	6
Bandi regionali (2003-2004)	tutti	48	65%	11
Rifinanziamento	Enti locali, Università	19	75%	3,2
Bando alta valenza architettonica	Enti locali,	1,6	85%	0,15
Fondo 598 Ambiente	PMI	10	60%	3
Totale		119,1		25,5

Fonte: Elaborazione ENEA su dati Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio

8.6.2. La tecnologia fotovoltaica

Dal punto di vista fisico, la conversione della radiazione solare in energia elettrica avviene nella cella fotovoltaica. Al di là di quelle che possono essere le numerose varianti (tipicamente sperimentate nei laboratori di ricerca e sviluppo) sui singoli passi di processo per la realizzazione dei diversi tipi di dispositivi fotovoltaici, in termini di produzione commerciale sono oggi disponibili due tecnologie: la prima, basata sul silicio cristallino (mono- e multi-cristallino), e la seconda, detta "delle celle a film sottile". I moduli fotovoltaici realizzati con dispositivi al silicio cristallino detengono circa l'85% del mercato mondiale, mentre la restante parte del mercato riguarda essenzialmente quelli al silicio amorfo e, solo marginalmente, quelli basati su celle a film sottile policristallino.

Circa la fabbricazione delle celle al silicio cristallino, esse sono ottenute attraverso il taglio di un singolo cristallo di silicio o di un lingotto di silicio multi-cristallino; le fette così ottenute (di spessore compreso tra 250 e 350 μm circa) vengono sottoposte a un processo ad alta temperatura (dell'ordine di 800-900°C) per il compimento di due fasi essenziali: il “drogaggio” e la “contattatura”.

Il primo consiste, in pratica, nell'inserimento nella struttura cristallina del silicio di alcune impurezze (atomi di boro e di fosforo) per formare la classica giunzione p-n: si genera così all'interno del dispositivo un campo elettrico che contribuirà alla separazione delle cariche elettriche fotogenerate, cioè gli elettroni da un lato e le lacune dall'altro, che si rendono disponibili quando la cella viene esposta alla luce.

L'altro trattamento fondamentale affinché una cella possa funzionare, è la formazione dei due contatti elettrici: l'uno obbligatoriamente a forma di “griglia” sul fronte della cella (altrimenti il dispositivo non vedrebbe la luce solare) e l'altro di qualsiasi forma sul retro. E' proprio attraverso questi contatti che avviene la raccolta delle cariche generate per effetto dell'esposizione alla luce e, quindi, la circolazione della corrente elettrica nel carico, cioè l'utilizzatore collegato alla cella.

Nel caso dei dispositivi a film sottile, uno strato di materiale semiconduttore (nella grandissima parte dei casi si tratta di silicio amorfo) è depositato su una lastra di vetro, o su una sottile lamina di metallo o di altro materiale flessibile, che agisce da supporto. Se, per esempio, il dispositivo al silicio amorfo viene cresciuto su vetro, il contatto frontale è tipicamente realizzato mediante un ossido trasparente e conduttore (noto come TCO), depositato sull'intera superficie del substrato; quindi, viene formata la giunzione p-n, non tramite il “drogaggio”, ma depositando in sequenza silicio amorfo di tipo p intrinseco e di tipo n intrinseco e, infine, il contatto posteriore, sempre mediante deposizione di un opportuno metallo. In questo modo, cioè attraverso fasi di deposizioni e asportazioni dei materiali, è possibile realizzare direttamente moduli fotovoltaici di dimensioni tipicamente di 0,5 m^2 e fino a un massimo di 1 – 2 m^2 .

In generale, le tecnologie a film sottile promettono un'ampia diffusione dell'integrazione dei sistemi fotovoltaici negli edifici, mettendo a disposizione dei progettisti elementi fotovoltaici esteticamente attraenti, flessibili e non molto più costosi di quelli normalmente impiegati per realizzare componenti dell'involucro esterno e delle coperture dei fabbricati, come: tamponature, vetrate semitrasparenti, frangisole, lucernari, tegole, ecc. Inoltre, il processo di fabbricazione dei dispositivi a film sottile, e in particolare quello del silicio amorfo, rispetto alla tecnologia del silicio cristallino è, in generale, più semplice, a più basso contenuto energetico e con un più contenuto utilizzo del materiale semiconduttore.

Possiede, pertanto, tutti i principali requisiti di competitività economica, ma va notato che la tecnologia attualmente in uso non consente, a causa del degrado delle prestazioni nel tempo del materiale sotto illuminazione, di raggiungere le efficienze di conversione tipiche dei dispositivi al silicio cristallino.

L'energia che si può ottenere con il fotovoltaico dipende dalle caratteristiche del materiale impiegato per la fabbricazione del dispositivo e, ovviamente, a parità di caratteristiche, da come e quanto “bene” esso viene realizzato: l'efficienza di conversione (percentuale di energia contenuta nella radiazione solare che viene convertita in energia elettrica utilizzabile) per celle commerciali al silicio è, in genere, compresa tra il 13 % e il 17 %, mentre realizzazioni speciali di laboratorio hanno raggiunto in celle di GaAs (Arseniuro di Gallio) valori del 35 %.

La tipica cella fotovoltaica commerciale al silicio ha uno spessore complessivo compreso tra 0,25 mm e 0,35 mm, ha generalmente una forma quadrata con superficie compresa tra 100 cm^2 e 225

cm² e, se esposta a un irraggiamento pari a 1 kW/m² e lavorando a una temperatura di 25 °C, presenta una corrente tra i 3 A e i 4 A, una tensione di circa 0,6 V e una potenza dell'ordine di 1,5-2 W_p. E' evidente che, dal punto di vista delle applicazioni fotovoltaiche, è necessario un opportuno collegamento in serie/parallelo delle celle, affinché si possano raggiungere le potenze di volta in volta risultanti dal progetto dell'impianto, con i valori di corrente e tensione attesi.

Ne consegue che sul mercato, di fatto, sono disponibili quasi esclusivamente moduli fotovoltaici con tensione di lavoro tipicamente di 12 V e potenze nominali di 50 – 70 W_p.

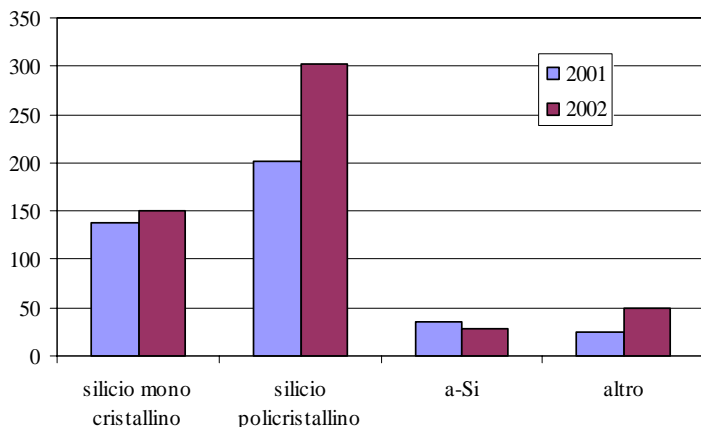
Una particolare attenzione della ricerca nel campo dei film sottili per applicazioni fotovoltaiche è rivolta al silicio microcristallino, un materiale che, rispetto al silicio amorfo, ha caratteristiche strutturali tali da consentire la realizzazione di dispositivi con un'efficienza stabile più elevata. Buoni risultati in tal senso sono stati ottenuti da ricercatori europei e giapponesi con le celle "micromorph", dispositivi tandem di silicio microcristallino con una top cell di silicio amorfo.

Lo sviluppo di una tecnologia di preparazione di film sottili di silicio microcristallino su larga area, consentirebbe di realizzare dispositivi fotovoltaici su substrati economici come il vetro, e flessibili come la plastica o l'acciaio in fogli, conservando i vantaggi economici e tecnologici del silicio amorfo: produzioni di massa a basso costo, disponibilità delle materie prime, buona compatibilità ambientale.

Il progetto TEFIS (TEcnologie fotovoltaiche a Film Sottile) avviato in ENEA vuole dare un impulso in questa direzione, svolgendo attività di R&D di tecnologie di preparazione di film sottili di silicio microcristallino per realizzare dispositivi fotovoltaici multigiunzione, con efficienza elevata ma soprattutto stabile, e attività di qualificazione di sistemi fotovoltaici. Infatti un altro fattore chiave per la diffusione del fotovoltaico è l'affidabilità del sistema fotovoltaico a lungo termine (25-30 anni), che significa avere impianti che a fine vita producono non meno dell'80% dell'elettricità che producevano all'inizio. A questo fine è importante mettere a punto procedure di qualificazione di tutti i componenti (moduli, inverter, ecc.), presi singolarmente e integrati in un impianto, con test accelerati per stabilire la resistenza a cicli termici, meccanici, elettrici, ecc. I sistemi che supereranno le procedure di qualificazione daranno agli utenti ampie garanzie di qualità, affidabilità e durata.

Bisogna ricordare, infine, l'intensa attività di ricerca che sta portando a sostanziali progressi nello sviluppo di celle al tellurio di cadmio (CdTe) di diseleniuro di indio e rame (CIS) e degli altri film sottili policristallini, anche ad alta efficienza. I moduli CdTe stanno, infatti, dimostrando un andamento stabile durante i vari test di accelerazione e, in ambito di produzione industriale, celle aventi superficie pari a 0,5 cm² hanno raggiunto livelli di efficienza dell'ordine del 10%.

Figura 8.6.5 – Mercato della produzione per tipologia di celle fotovoltaiche anni 2001-2002 (MW)



Fonte: Eleborazione su dati "EUR Observ'ER"

8.6.3. *Il fotovoltaico a concentrazione: il progetto PhoCUS dell'ENEA*

Tra le linee strategiche di ricerca intraprese a livello internazionale nel settore fotovoltaico al fine di accelerare il processo di riduzione dei costi di questa tecnologia, si sta lavorando, oltre che sull'aumento dell'efficienza delle diverse tipologie di celle, anche sul fotovoltaico a concentrazione, considerato come un'interessante opzione per ridurre in maniera significativa l'incidenza della parte fotovoltaica, che verrebbe sostituita con materiali semi-convenzionali meno costosi. Nel fotovoltaico a concentrazione, la radiazione solare non incide direttamente sulle celle, ma viene concentrata da opportune lenti o altri dispositivi ottici: in pratica, è come se le celle fossero investite non dalla radiazione proveniente da un unico sole ma da più soli (da poco meno di una decina fino circa 800, a seconda del dispositivo ottico utilizzato) con una conseguente riduzione dell'area di moduli fotovoltaici da utilizzare.

La progettazione di un sistema fotovoltaico a concentrazione si presenta un po' più complessa rispetto a quella di un impianto fotovoltaico piano. Tra i principali: la struttura di cella si presenta più sofisticata per poter ottenere alti valori di efficienza in presenza di una maggiore radiazione solare incidente, il modulo che ospita le celle presenta una maggiore complessità, dovuta alla numerosità dei componenti da assemblare e a problemi di tenuta e di smaltimento del calore e, infine, è necessario utilizzare un sistema di supporto dei moduli capace di "inseguire" il sole durante la giornata, in modo da massimizzare la radiazione incidente.

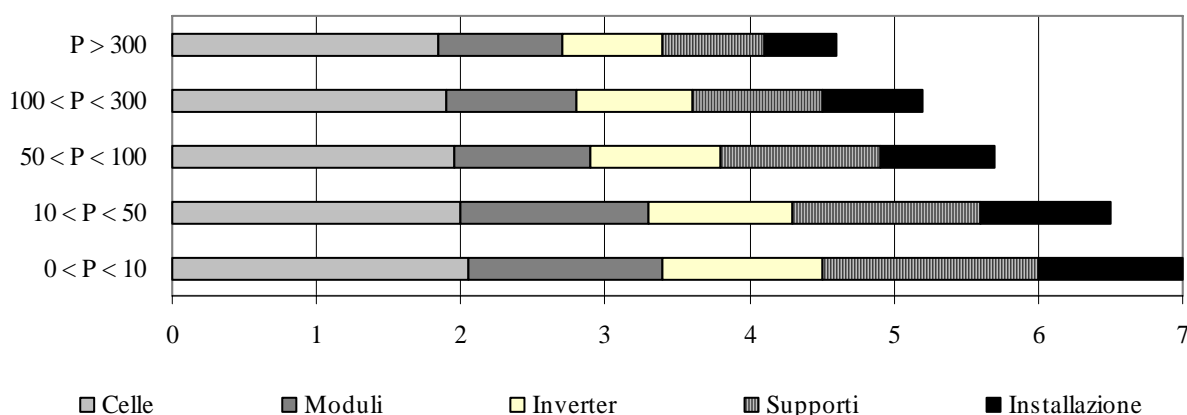
Anche in ENEA vengono condotte attività in questo specifico settore, nell'ambito del Progetto PhoCUS (Photovoltaic Concentrators to Utility Scale), sia di ricerca e sviluppo, sia di sperimentazione sul campo e dimostrazione. L'obiettivo finale consiste nella verifica della fattibilità tecnica del fotovoltaico a concentrazione e della sua attesa competitività economica rispetto al fotovoltaico convenzionale, attraverso l'individuazione e lo sviluppo di una unità standard, che possa essere impiegata, sia come un sistema autonomo, sia come l'elemento base di un impianto di maggiore dimensione. Le attività R&D, il cui svolgimento vede coinvolti anche alcuni operatori industriali italiani, sono relative ai principali componenti dell'impianto, quali la cella, il dispositivo ottico, il modulo, la struttura ad inseguimento ed il sistema di condizionamento della potenza e sono condotte presso i laboratori dei Centri ENEA di Portici e della Casaccia. La sperimentazione sarà presto avviata (a Portici e nell'Area Sperimentale di Monte Aquilone dell'ENEA, presso Manfredonia) sui primi due prototipi da 5 kW_p, che rappresentano l'unità standard sviluppata nell'ambito del Progetto; la dimostrazione, infine, avrà luogo presso l'Area Sperimentale di Monte Aquilone, sito prescelto per l'installazione dell'impianto pilota da 25 kW_p, la cui realizzazione è prevista avvenire in fasi successive, in modo che già nell'ambito del presente progetto possano essere apportate tutte le modifiche migliorative che dalle prime prove sperimentali risulteranno necessarie.

8.6.4. *Costi*

Per quanto riguarda l'aspetto economico, mentre la maturazione della tecnologia ha portato a una diminuzione dei costi dei moduli di circa 10 volte e al raddoppio del rendimento di sistema in 20 anni, il prezzo attuale dei moduli – di circa 3,5 €/W_p – ed il costo del kilowattora prodotto – intorno a 0,35 € – rimangono troppo elevati per consentire la competitività commerciale, se non in particolari nicchie di mercato o in presenza di meccanismi di incentivazione.

I sistemi fotovoltaici hanno un costo di impianto che può essere schematicamente considerato come composto da alcune voci principali: le celle; il modulo; l'inverter, i supporti; l'installazione e i costi tecnici. La figura 8.6.4 fornisce il costo complessivo indicativo di un impianto fotovoltaico, installato su di una struttura esistente, in funzione della potenza elettrica installata, schematizzata in 5 diverse classi di potenza.

Figura 8.6.4 - Costo indicativo in €/kW di un impianto fotovoltaico in funzione della potenza elettrica installata P (espressa in kW):



Fonte: Elaborazione ENEA su dati del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio.

La riduzione dei costi della cella è strettamente correlata alla crescita del mercato e, sulla base dell'andamento delle cosiddette "curve di apprendimento"⁵, si può prevedere un dimezzamento entro il prossimo decennio. D'altra parte il miglioramento delle tecnologie di BOS (Balance-Of-System) e la sempre maggiore integrazione dei sistemi nelle strutture edilizie porteranno ulteriori riduzioni nei costi complessivi, a fronte di un continuo miglioramento delle prestazioni, rendendo quindi possibile un ampliamento del mercato.

L'industria fotovoltaica ripone molte speranze nell'effetto sinergico che potranno avere gli incentivi governativi, l'applicazione di norme di protezione dell'ambiente più stringenti e di maggiore sensibilità verso fonti di energia "pulita", al fine di ottenere economie di scala e divenire di conseguenza competitiva sul mercato energetico.

⁵ Si veda in proposito Paragrafo 3.8.1 "Fattore tempo, curva di apprendimento ed evoluzione dei costi interni comparati"