



di Guido Fragiaco
Garbo Srl
Cerano (NO)
www.garbosrl.net

“OLTRE LA GRID PARITY”. L’ABBATTIMENTO DEI COSTI DELL’ENERGIA FOTOVOLTAICA

ATTUALITÀ

L’energia fotovoltaica, nonostante la continua riduzione dei costi, non ha ancora raggiunto la grid parity, ossia la competitività dei prezzi con le fonti energetiche tradizionali. Il boom che il settore ha vissuto sino ad oggi è sostanzialmente frutto delle generose tariffe incentivanti fornite dai governi nazionali (Conto Energia, in Italia). Nell’articolo viene esposto lo stato dei costi per le celle al silicio cristallino e quali sono i modi possibili per ridurli.

Il costo di grid parity^a o costo di pareggio con le fonti energetiche tradizionali, non è univocamente definibile in quanto influenzato da numerose variabili (Schema). È opinione condivisa che la grid parity per gli impianti industriali - quelli da 200 a 1.000 kWp (kW di picco) - sarà raggiunta in Italia tra il 2013 e il 2015, mentre per gli impianti residenziali - quelli da 3-5 kWp - la grid parity sarà raggiunta più tardi, tra il 2014 e il 2017.

A “case study”: energia e costi di un impianto FV di 1000 kWp

Un recente studio, condotto dall’autore sulla base dei dati forniti da due primarie società italiane, può chiarire meglio la problematica del costo del “watt fotovoltaico” nel 2011^b.

Si considera di installare, al Nord e al Sud dell’Italia, un impianto fotovoltaico da 1.000 kWp, con celle al silicio cristallino, della durata di

Presentazione nell’ambito del congresso del 13 ottobre 2011 a Novara “La Chimica come motore di sviluppo. La realtà del passato e le speranze del futuro”.

^aInsieme di condizioni economiche che permettono al costo del kilowattora prodotto mediante energia fotovoltaica di essere uguale al costo del kilowattora prodotto da fonti convenzionali per tutte le categorie di utenti e per tutte le fasce orarie.

^bkWp (chilowatt di picco): è la potenza massima generata da un impianto fotovoltaico in condizioni standard di funzionamento (irraggiamento 1000 W/m² e temperatura 25 °C).

Il kWh fotovoltaico dipende da:

- I costi d'installazione dell'impianto, che a loro volta dipendono:
 - dal tipo di celle (silicio cristallino o film amorfo;
 - dal tipo d'impianto, fisso o a inseguimento;
 - dalle dimensioni dell'impianto, 3 o 1000 kWp
 - dal tipo di installazione, a terra, su tetto, ecc.).
- Il livello di radiazione solare del sito, ossia i kWh/anno prodotti per 1 kWp installato.
- Il tempo di vita dell'impianto.
- La perdita di efficienza del sistema ($\approx 0,8\%$ anno).

Il kWh convenzionale dipende da:

- Imposte ed oneri che gravano sul costo della energia (attualmente incidono per circa il 40%).
- Il costo della sola voce "energia elettrica" che è variabile: in Italia è circa il doppio rispetto alla Francia, nel Sud Italia è maggiore rispetto al Nord.
- La struttura tariffaria: il periodo estivo Vs. il periodo invernale, le ore piene Vs. le ore vuote.
- Il tipo di contratto: residenziale non residenziale, minore o maggiore di 3,5 kW, ecc..
- La dinamica dei prezzi legati al costo del greggio

Schema

25 anni, posizionato in condizioni ottimali: orientamento Sud, inclinazione 30° .

L'energia elettrica prodotta ogni anno da questo impianto, al Nord e al Sud, ipotizzando una perdita complessiva di efficienza del sistema dello $0,8\%$ annuo, è riportata in Fig. 1.

I costi d'investimento per la realizzazione dell'impianto sono stati suddivisi in due grandi categorie: i costi dei moduli da una parte, e tutti gli altri costi dall'altra (Tab. 1). Per i costi dei moduli fotovoltaici si è assunto il prezzo di mercato del 3° trimestre 2011 ($1,2 \text{ €/Wp}$). Per gli altri costi (autorizzazioni, progettazione, direzione lavori, infrastrutture, installazioni, inverter, allacciamenti elettrici, diritti di superficie, ecc.) si sono assunti due valori, nell'ipotesi di installare l'impianto su tetto ($0,9 \text{ €/Wp}$) o a terra ($1,1 \text{ €/Wp}$).

I costi dell'energia fotovoltaica prodotta nell'arco dei 25 anni di vita dell'impianto sono riportati in Fig. 2, per le installazioni al Nord e al Sud, e per gli investimenti di $2,1$ e $2,3 \text{ €/Wp}$. Questi costi assumono un costo d'ammortamento costante e costi di gestione, manutenzione, assicurazione che incrementano del 2% all'anno.

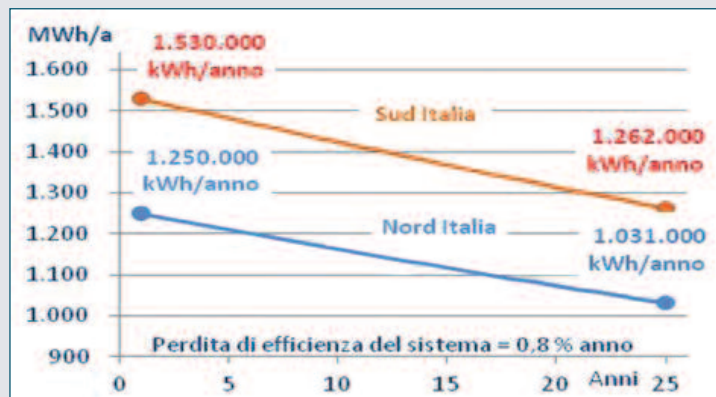
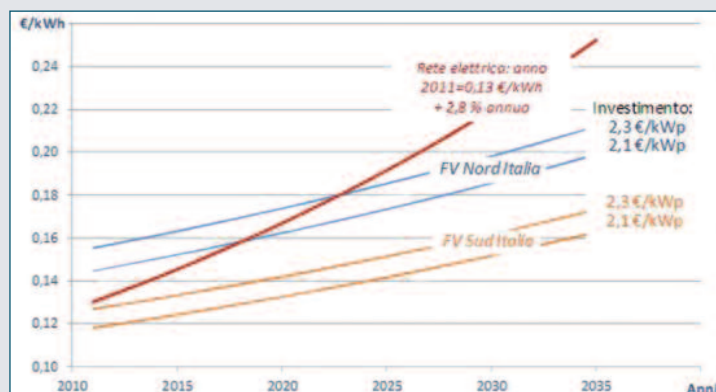


Fig. 1 - Produzione di energia elettrica di un impianto FV della capacità di 1000 kWp, installato al Nord e Sud Italia

Installazione	Investimento in pannelli	Investimento Infrastrutture	Totale "turn-key"
Impianto su tetto	1.200.000 € (1,2 €/Wp)	900.000 € (0,9 €/Wp)	2.100.000 € (2,1 €/Wp)
Impianto a terra	1.200.000 € (1,2 €/Wp)	1.100.000 € (1,1 €/Wp)	2.300.000 € (2,3 €/Wp)

Tab. 1 - Costi di investimento per un impianto da 1.000 kWp installato su tetto e a terra



Assunzioni: durata impianto: 25 anni; perdita efficienza: $-0,8\%$ anno; investimento impianto "turn-key": $2.100.000 \text{ €}$ su tetto ($2,1 \text{ €/kWh}$) e $2.300.000 \text{ €}$ a terra ($2,3 \text{ €/kWh}$); ammortamento in 25 anni; interesse annuo: 5% ; inflazione: 2% annuo

Fig. 2 - Confronto costi energia elettrica da impianto FV di 1000 kWp, con i costi dell'energia elettrica per uso industriale

LCOE (Levelized Cost Of Electricity)		
	Investimento (€)	Costo medio FV (€/kWh)
LCOE Nord	2.100.000	0,176
LCOE Nord	2.300.000	0,189
LCOE Sud	2.100.000	0,144
LCOE Sud	2.300.000	0,154
Costo medio energia rete 2011-35 = 0,185€/kWh		

Tab. 2 - Confronto costi medi watt fotovoltaico vs. costo medio energia di rete

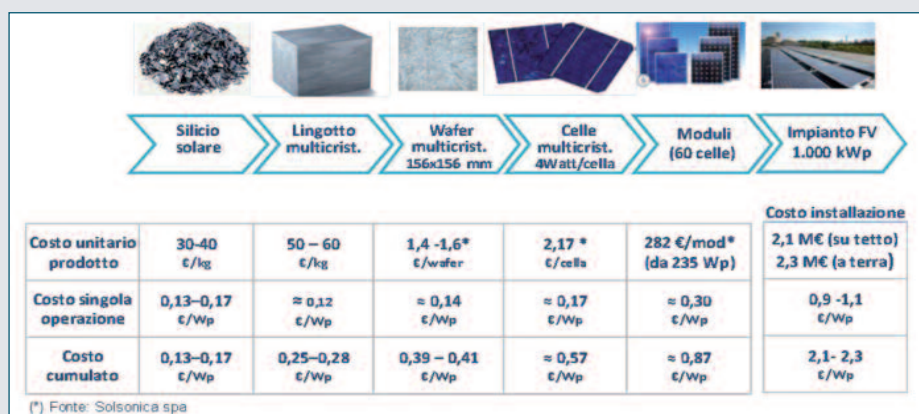


Fig. 3 - Costi unitari della filiera fotovoltaica per i vari segmenti di produzione

In anni recenti le produzioni si sono spostate in Asia e cresciute notevolmente in Cina, leader indiscussa per la produzione di celle e moduli a basso costo. Questi prodotti sono per la maggior parte inviati in Europa, dove si è registrata una continua e intensa crescita negli ultimi 10 anni e dove sono installati i tre quarti della capacità fotovoltaica mondiale (29.000 vs 39.000 MWp). Tutto ciò crea una forte asimmetria tra le aree di produzione e le aree di consumo.

Gli attuali prezzi del silicio, dei wafer, delle celle e dei moduli sono fortemente condizionati dai prodotti d'importazione. La Cina, ormai potenza anche nel

I costi del "watt fotovoltaico" sono quindi confrontati con i costi dell'energia elettrica di rete, assumendo un prezzo medio 2011 per i consumi industriali di 0,13 €/kWh, e considerando un incremento medio annuo del 2,8%.

La Fig. 2 evidenzia che il costo dell'energia fotovoltaica prodotta dall'impianto installato al Sud è già competitiva senza alcun incentivo, nel 2011, se confrontata con un costo dell'energia elettrica di rete per usi industriali di 0,13 €/kWh. L'energia elettrica prodotta dallo stesso impianto al Nord non è inizialmente competitiva, ma se si considera il valore di "LCOE" (*Levelized Cost Of Energy*, ossia la media dei costi distribuiti lungo la vita dell'impianto) e lo si confronta con il costo medio dell'energia di rete nello stesso periodo - che risulta essere di 0,185 €/kWh, valore medio a partire da 0,13 €/kWh, + 2,8% anno - si rileva che il costo medio di periodo risulta competitivo (Tab. 2).

Bisogna tuttavia considerare che l'energia fotovoltaica:

- non è continuativa e quindi necessita di un sistema di accumulo;
- presenta ancora problemi di connessione alla rete (gestione della «smart grid»);
- non è gravata da imposte ed oneri per il 35-40% così come lo sono le fonti convenzionali (ad eccezione della IRES del 10,5% per le società produttrici di energia con ricavi ≥ 10 M€ o redditi ≥ 1 M€).

I costi della filiera fotovoltaica

La filiera fotovoltaica, dalla materia prima all'impianto, si può suddividere nei diversi segmenti di produzione mostrati in Fig. 3. La filiera è contraddistinta da pochi produttori a monte e molti a valle. Non esiste alcuna azienda italiana^c che produce il silicio solare, sono poche le aziende che fabbricano celle fotovoltaiche, mentre sono diverse le società che assemblano moduli e numerosissimi gli installatori.

Le produzioni nei segmenti a monte della catena, ed in particolare la produzione della materia prima - il silicio policristallino - richiede un forte impegno di capitali, consumi energetici elevati e tecnologie complesse a forte impatto ambientale. Tre progetti sviluppati in Italia per realizzare questi impianti, alcuni dei quali già in fase di realizzazione, sono stati abbandonati.

solare, ha scatenato una guerra dei prezzi che ha colpito duramente i produttori europei, grazie anche alle cospicue sovvenzioni che il Governo di Pechino concede all'industria fotovoltaica.

Per rendersi indipendenti dai prodotti d'importazione e rendere competitiva l'energia fotovoltaica nell'era post incentivi è necessario ridurre i costi su tutti i segmenti della filiera ed in particolare nelle fasi produttive a monte, dove sono ancora possibili significativi miglioramenti tecnologici. La mancanza di attori italiani che operano a monte delle celle espone a forte rischio di fornitura e di prezzo i produttori di celle e gli assemblatori di moduli di un comparto industriale ormai consolidato ed in forte crescita. Non solo, ma la possibilità di disporre silicio cristallino a basso costo pone le premesse per realizzare una filiera fotovoltaica integrata, tutta italiana, che consentirà di tenere in Italia i benefici governativi del Conto Energia.

Le innovazioni di Garbo nella filiera fotovoltaica

È opinione condivisa che le celle al silicio cristallino domineranno il mercato ancora per molti anni e che le tecnologie emergenti non potranno che scalfire questo dominio (film di silicio amorfo, CdTe, CIS, celle polimeriche) a maggior ragione se i prezzi dei wafer continueranno a scendere. Ed è nella preparazione dei wafer di silicio che si focalizzano le attività innovative di Garbo.

Il wafer di silicio è, infatti, il maggiore componente di costo nella fabbricazione della cella e del modulo. Queste attività, che consentono sostanziose riduzioni di costo, sono:

- il recupero e il riutilizzo dei fluidi abrasivi esausti (gli slurry) impiegati per tagliare i wafer, ossia il recupero ed il riutilizzo dei componenti che riducono i costi dei processi di taglio;
- la riduzione dei consumi dei lingotti di silicio mediante l'impiego di abrasivi ultrafini che riducendo le perdite per "sfrido" di taglio aumentano il numero di fette ottenute da uno stesso cristallo;
- la preparazione di silicio solare a basso costo mediante il recupero e la rigenerazione delle polveri di silicio elettronico e/o solare di scarto.

^cMEMC Electronic Material, società USA che con l'impianto di Merano produce silicio policristallino e monocristallino per la microelettronica, ma che può trovare impiego anche nel solare.

La rigenerazione dei fluidi abrasivi esausti

Le operazioni di taglio dei wafer sono eseguite su blocchi squadrati di silicio tramite l'uso di un filo metallico avvolto a spire parallele per tagliare contemporaneamente un elevato numero di fette.

Il filo trascina una sospensione abrasiva, detta "slurry", composta da grani molto fini di abrasivo, dispersi in un liquido sospendente che agisce anche da refrigerante. L'abrasivo trascinato dal filo abrada il cristallo (Fig. 4) con un processo lento ma continuo per tagliare contemporaneamente il cristallo in fette. Lo slurry durante il taglio si arricchisce di silicio di sfrido, perde la sua capacità tagliente e dopo un certo tempo deve essere sostituito. Questo slurry esausto, destinato ad essere smaltito mediante trattamenti in impianti biologici, è invece recuperato, inviato presso gli impianti Garbo dove i componenti vengono rigenerati e riportati alla purezza originaria, pronti per essere riutilizzati.

Questa operazione riveste grande importanza in quanto riduce drasticamente i costi d'acquisto degli abrasivi e dei liquidi sospendenti, evita la produzione di rifiuti ed azzerà i costi per il loro smaltimento.

L'attività operativa consiste nella separazione della fase solida (il carburo di silicio, SiC) dalla fase liquida (il glicole sospendente, PEG), quindi l'abrasivo viene classificato in base alla dimensione dei grani per separare ed eliminare la parte fine non più utilizzabile. Successivamente l'abrasivo viene purificato mediante trattamenti chimici per eliminare le impurezze metalliche e gli sfridi di silicio residui.

La resa di recupero del carburo di silicio è dell'80-90%, mentre quella del glicole è del 95-98% (Fig. 5 e 6). Garbo ha inventato e brevettato questi processi 12 anni fa, ha attivato le produzioni a livello industriale, realizzato diversi impianti via via sempre più efficienti, e recuperato e rigenerato centinaia di tonnellate di slurry esausti provenienti dalle maggiori aziende produttrici di wafer del mondo.

La riduzione dei consumi di lingotti di silicio

Durante l'operazione di taglio si perde, sotto forma di sfrido di silicio, circa il 50% di un materiale iperpuro, cristallino, semiconduttore il cui valore varia da 60 a 100 €/kg. Questa perdita si riflette in un raddoppio del costo della materia prima del wafer, la quale, a sua volta, incide per il 60-70% sul costo finale del wafer stesso. Garbo, grazie ad un ampio e profondo know-how acquisito nel trattamento delle polveri di carburo,

Tipo di abrasivo	Spessore Waf (µm)	Diametro filo (µm)	Wafer per 1 Kg di cristallo (156x156 mm)
JIS 1200 standard ($d_{50\%}=9,5 \mu\text{m}$)	180	140	45,53
JIS 2500 Garbo ($d_{50\%}=5,5 \mu\text{m}$)	180	100	53,88 (+18%)
JIS 2500 Garbo ($d_{50\%}=9,5 \mu\text{m}$)	170	100	55,73 (+22%)
JIS 2500 Garbo ($d_{50\%}=9,5 \mu\text{m}$)	170	80	59,86 (+31%)
JIS 2500 Garbo ($d_{50\%}=9,5 \mu\text{m}$)	140	80	67,33 (+48%)

Tab. 3 - Incremento del numero di wafer con l'impiego di abrasivi ultrafini e fili sottili

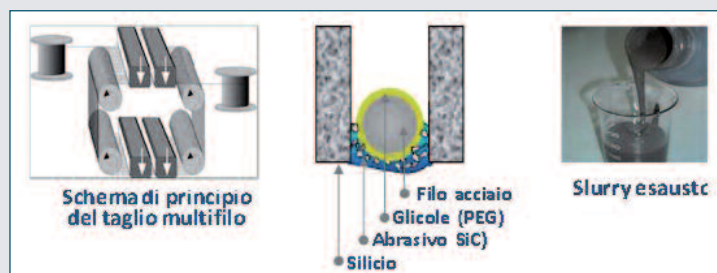


Fig. 4 - Schema del taglio multifilo con i fluidi abrasivi

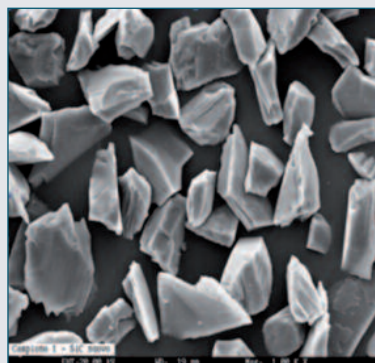


Fig. 5 - Carburo di silicio, SiC



Fig. 6 - Glicole, PEG, rigenerato dopo purificazione

ha messo a punto una tecnologia proprietaria che consente di ottenere abrasivi finissimi, di dimensioni omogenee, aventi diametro medio $d_{50\%} = 5 \mu\text{m}$ (5 millesimi di millimetro) ad un costo molto basso. Con l'impiego di questi abrasivi ultrafini è possibile utilizzare fili da taglio più sottili, quindi ridurre notevolmente le perdite per sfrido e conseguentemente ottenere un maggior numero di wafer da uno stesso cristallo (Fig. 7). La Tab. 3 mostra l'incremento del numero di wafer che si possono ottenere per 1 kg di cristallo, rispetto ai processi di taglio convenzionali. Oltre alla riduzione dei consumi di silicio, derivanti dagli sfridi ridotti, gli abrasivi ultrafini migliorano anche la qualità dei wafer. Le particelle fini di dimensioni omogenee consentono di migliorare il parallelismo delle facce dei wafer, la microrugosità delle superfici ed il danno della struttura cristallina superficiale. Garbo ha verificato la fattibilità d'impiego di questi abrasivi con diverse prove di taglio presso produttori di macchine ed utilizzatori ed ora si appresta ad avviare la produzione su base industriale. Abrasivi simili sono disponibili sul mercato ma solo in piccole quantità, presso pochi produttori ed a costi molto alti poiché la loro produzione richiede macinazioni prolungate, elevati consumi di energia e la selezione della parte più fine dell'abrasivo macinato.

La preparazione di silicio solare a basso costo

La produzione di un silicio solare a basso costo riveste un ruolo strategico ed economico nella filiera fotovoltaica. La sua produzione attraverso la via gassosa (processo Siemens) richiede la costruzione di impianti chimici molto costosi e complessi, che consumano ingenti quantità di energia elettrica. Il silicio policristallino vergine è prodotto da poche società che dispongono di grandi impianti con elevate produzioni destinate per la maggior parte all'autoconsumo. Queste società, che sono ora prevalentemente ubicate in Cina, grazie anche agli incentivi gover-

nativi, determinano il prezzo e la disponibilità del prodotto sul mercato. Un approccio originale, ad elevate potenzialità, è stato sviluppato da Garbo mediante la purificazione delle polveri di silicio di grado elettronico o solare provenienti dalle diverse fasi di lavorazione del silicio eseguite con utensili diamantati. Queste polveri hanno la superficie dei grani inquinata, ma mantengono intatta la purezza del "bulk" (il cuore). Si tratta dunque di eliminare i contaminanti superficiali rilasciati dagli utensili durante le lavorazioni.

Garbo ha sviluppato processi e realizzato impianti in grado di:

- purificare queste polveri e portarle ad una purezza "solare" ($\geq 99,9999\%$);
- compattarle per incrementarne la densità e poterle fondere;
- crescere lingotti multicristallini, con cicli termici specifici, che ne assicurano un'ulteriore purificazione durante la solidificazione unidirezionale (Fig. 8).

Lo sviluppo, giunto ormai alla fase di caratterizzazione elettrica e cristallografica dei lingotti multicristallini cresciuti in forno pilota, presenta risultati positivi che confermano la fattibilità della purificazione delle polveri e l'ottenimento di una materia prima ad un costo di gran lunga inferiore rispetto a quello di mercato.

La conferma definitiva di questi processi dovrà essere ovviamente validata nei prossimi mesi con la fabbricazione di celle e la relativa valutazione delle loro performance.

Queste polveri sono disponibili in grandi quantità presso le industrie elettroniche e fotovoltaiche con le quali Garbo ha siglato contratti di fornitura che ne assicurano l'approvvigionamento ad un costo molto basso. Quindi il recupero e la rigenerazione delle polveri di silicio metterà a disposizione dell'industria fotovoltaica una grande quantità di silicio di grado solare a costi ridotti, contribuendo in modo determinante all'abbattimento dei costi del fotovoltaico.

Una sfida da affrontare

Nell'ipotesi di installare una linea di purificazione del silicio in polvere della capacità di 760 t/anno, crescere lingotti e tagliare 36 milioni di wafer (necessari per 120 MWp di capacità FV installata), si è calcolato un costo di 10 €/kg di silicio purificato (in polvere) rispetto ai 30-40 €/kg del mercato. A partire da questo costo si possono ottenere, con le innovazioni introdotte da Garbo, wafer a costi del tutto competitivi con quelli di mercato, anche considerando un'efficienza di conversione delle celle leggermente inferiore. La Fig. 9 mostra infatti come a partire da un silicio "feed" a basso costo si possa ottenere un costo dei wafer, espresso in Watt di potenza generata, inferiore a quello di mercato. Il fotovoltaico italiano è un comparto ad elevata potenzialità di crescita, come dimostrano i trend degli ultimi anni, con importanti ricadute economiche, tecnico-scientifiche ed occupazionali. La costituzione di una filiera integrata italiana trova assenza di operatori nei

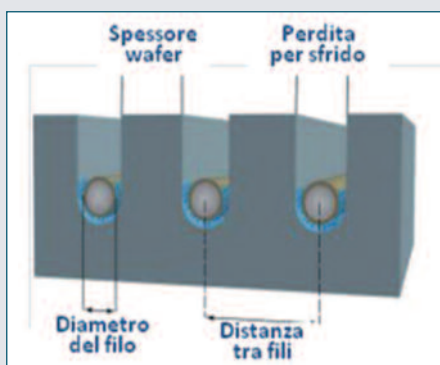


Fig. 7 - Le ridotte dimensioni dei grani di carburo permettono l'utilizzo di fili più sottili che consentono una riduzione delle perdite di silicio per sfido

segmenti a monte, dove è maggiore il valore aggiunto e dove, purtroppo, si disperdono all'estero parte degli incentivi governativi. Esiste ora l'opportunità di mettere a profitto le innovazioni di Garbo con la produzione di silicio solare, la crescita di lingotti e taglio dei wafer che permettono di completare gli anelli mancanti della catena in termini altamente competitivi, mettendo così al riparo i produttori italiani dalla mancanza di materia prima e dalla volatilità dei prezzi.

Un progetto ecosostenibile

Le innovazioni di Garbo, oltre a ridurre i costi e

trasformare un problema (il rifiuto) in una opportunità di sviluppo, rappresentano un nuovo modello di chimica sostenibile: una chimica che evita la produzione di rifiuti, che risparmia le energie e rispetta l'ambiente. Infatti:

- la *rigenerazione degli abrasivi esausti*, classificati come "rifiuti industriali non pericolosi", evita lo smaltimento di grandi quantità di rifiuti (20.000 t/anno) in quanto, con le tecnologie proprietarie sviluppate da Garbo, solo il 4-5% del materiale in ingresso finisce in discarica;
- il *recupero del carburo di silicio*, permette il risparmio di 72 milioni di kWh/anno che si sarebbero dovuti impiegare per la produzione di carburo di silicio con il processo tradizionale, ed evita le emissioni in atmosfera per 57.400 t/anno di CO₂;
- la *produzione di silicio solare con il metodo Garbo* evita il consumo di 111 milioni di kWh/anno (necessari per produrre con i processi tradizionali 762 t/anno di silicio policristallino ed installare 120 MWp di capacità fotovoltaica) al lordo dei modesti consumi per purificare il silicio con i processi Garbo, nonché il rilascio di 63.000 t/anno di CO₂ derivanti dal processo di carboriduzione della silice a silicio metallurgico.



Fig. 8 - La trasformazione del silicio: dallo sfido al lingotto multicristallino

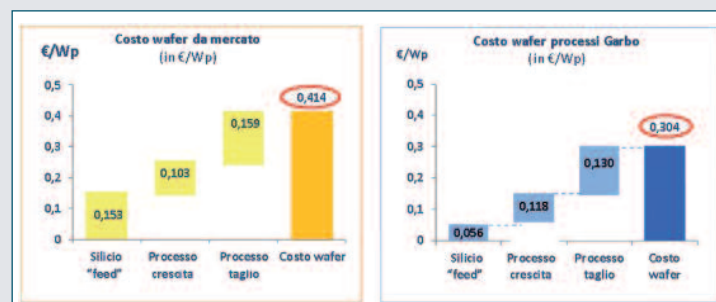


Fig. 9 - Confronto costi wafer di mercato e wafer con processi Garbo (760 t/anno di silicio, 36 milioni di wafer, capacità FV 120 MWp)