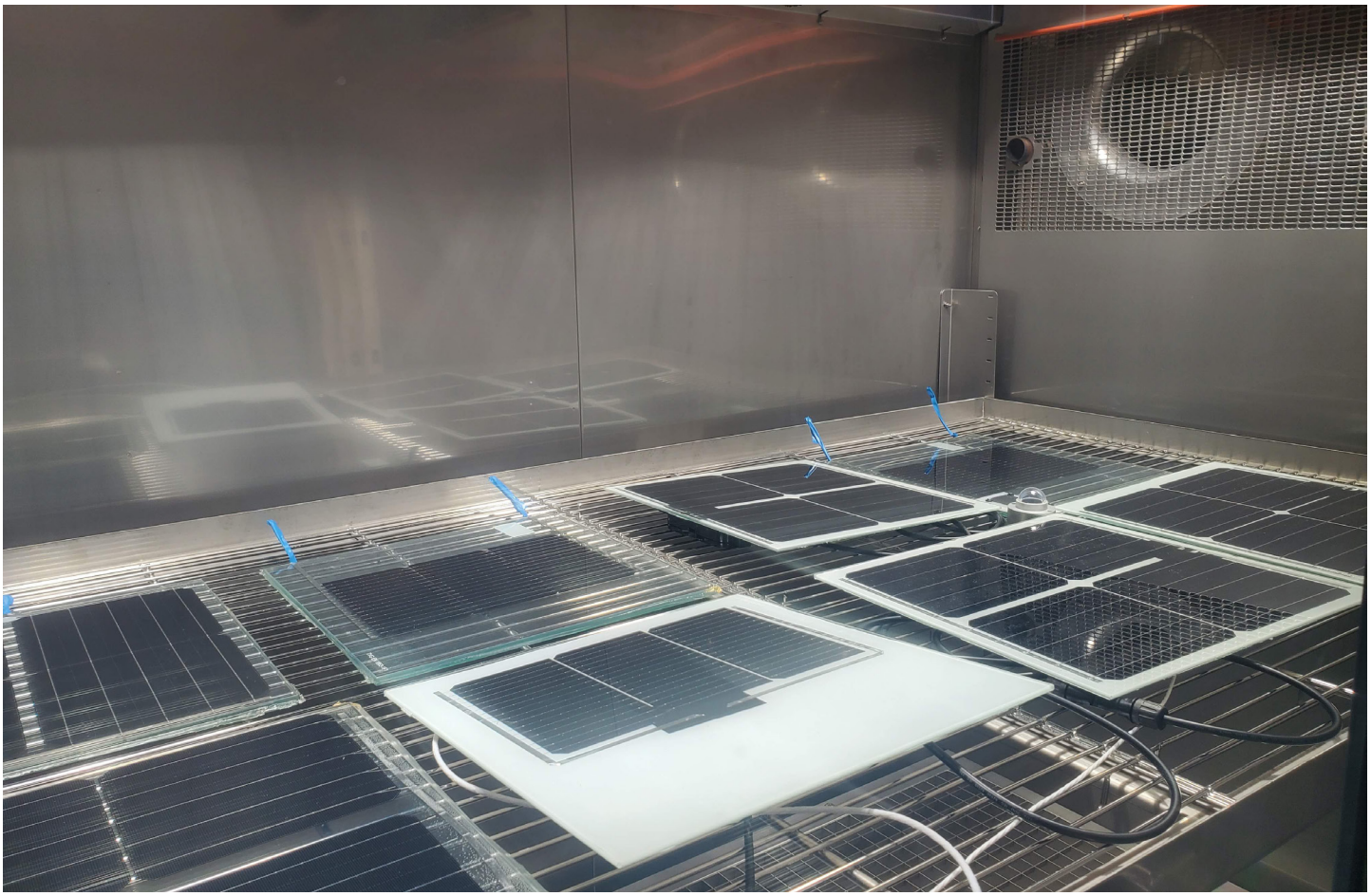
MODULI FV PROGETTATI PER L'AMBIENTE ALPINO

Nelle Alpi, i moduli fotovoltaici sono esposti, tra l'altro, a temperature basse e a elevati carichi di neve. Un team della Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana SUPSI, in collaborazione con partner austriaci, ha analizzato quali requisiti debbano soddisfare i moduli solari per resistere a queste condizioni estreme. A tal fine, i ricercatori hanno messo a punto specifici protocolli di prova che sottopongono i moduli destinati all'ambiente alpino a sollecitazioni più intense, permettendo in alcuni casi di abbreviare i tempi di test.



Moduli fotovoltaici durante un test UV volto a determinare in che misura i moduli subiscono danni a causa delle radiazioni ultraviolette. Foto: OFI/Gassner

Articolo specializzato sulle conoscenze acquisite dal progetto di ricerca nel settore del fotovoltaico sovvenzionato dall'Ufficio federale dell'energia. L'articolo è stato pubblicato, tra l'altro, sulla plattaforma web ee-news.ch (agosto 2026).

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Ufficio federale dell'energia UFE

Gran parte dell'Austria e della Svizzera si estende nell'arco alpino. Ne derivano, per entrambi i Paesi, problematiche simili nell'impiego del fotovoltaico (FV). L'Austria punta ad aumentare la produzione di energia rinnovabile in alta quota, ad esempio per alimentare le località turistiche. Nel comprensorio sciistico di Sölden (Tirolo) è prevista quest'anno la realizzazione di un impianto solare alpino composto da 800 «alberi solari». Ciascuna di queste strutture è composta da quattro «ali» montate su una colonna centrale, ciascuna delle quali ospita moduli FV bifacciali. Con il completamento, previsto per ottobre, l'impianto dovrebbe raggiungere una potenza fino a 6.3 MW.

La Svizzera si spinge ancora oltre nello sviluppo del fotovoltaico in area alpina, imprimendo un'accelerazione grazie a una legge federale urgente, il cosiddetto «Solarexpress». Questo strumento di incentivazione ha reso possibile la realizzazione dei primi grandi impianti alpini, MadrisaSolar (11 MW, Grigioni) e Sidenplangg (8 MW, Uri), che dall'autunno 2025 contribuiscono, tra l'altro, alla produzione della preziosa energia invernale. Entrambi gli impianti sono attualmente in fase di ampliamento. Nei Grigioni sono inoltre in costruzione altri progetti di grande scala, tra cui SedrunSolar (20 MW) e NalpSolar (8 MW). Per stimolare nuovi progetti è nel frattempo entrato in vigore il cosiddetto «bonus invernale», che subentra al Solarexpress come nuovo strumento di incentivazione.

Carichi elevati, temperature rigide

I grandi impianti solari nelle Alpi sono ancora poco diffusi. Tuttavia, proprio perché la produzione di energia al di sopra della fascia di nebbia offre un grande potenziale, soprattutto in vista della fornitura di elettricità durante l'inverno, il settore è oggi al centro di un'intensa attività di ricerca. I moduli fotovoltaici destinati all'ambiente alpino devono soddisfare requisiti specifici: devono resistere a forti carichi di neve e vento, ma anche a temperature molto basse e a un'elevata esposizione ai raggi ultravioletti. Quali moduli siano effettivamente in grado di sopportare queste condizioni è stato oggetto del progetto svizzero-austriaco PV-DETECT. Nel quadro dello studio, la Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana SUPSI ha collaborato con l'Österreichisches Forschungsinstitut für Chemie und Technik (OFI) di Vienna. Il progetto è stato sostenuto, sul versante svizzero, dall'Ufficio federale dell'energia nell'ambito della rete europea di ricerca SOLAR-ERA.NET.

PROCEDURE DI PROVA

Per garantire una produzione di energia fotovoltaica (FV) sicura e affidabile, i produttori devono sottoporre i moduli di nuova concezione a una serie di test. Eccone una selezione:

Test UV: valutano in che misura i moduli FV vengono danneggiati dalla radiazione ultravioletta. I raggi UV fanno parte della luce solare, ma hanno una lunghezza d'onda più corta rispetto alla luce visibile.

Test dei cicli termici: analizzano l'impatto delle escursioni termiche sui moduli. Le variazioni di temperatura – ad esempio tra giorno e notte – provocano dilatazioni differenti dei materiali, che possono causare la rottura delle saldature o il distacco degli strati del modulo (delaminazione).

Test di umidità: misurano gli effetti dell'elevata umidità dell'aria sulle prestazioni dei moduli FV.

Test di carico meccanico: verificano la capacità dei moduli di resistere a sollecitazioni statiche, come il peso della neve, e dinamiche, come l'azione del vento.

Hotspot test: esaminano la formazione di cosiddetti «hot spot», ovvero zone di surriscaldamento localizzato all'interno del modulo. I danni si verificano tipicamente quando parti del modulo vengono temporaneamente ombreggiate, ad esempio da camini o alberi, causando il surriscaldamento di alcune celle, o aree delle celle, dovuto al fatto che le celle ombreggiate consumano parte della potenza generata dal modulo invece che portarla all'inverter. Nei sistemi alpini, fenomeni di ombreggiamento possono verificarsi anche tra moduli installati con forte inclinazione per massimizzare la produzione invernale (ombreggiamento tra file parallele o auto-ombreggiamento).

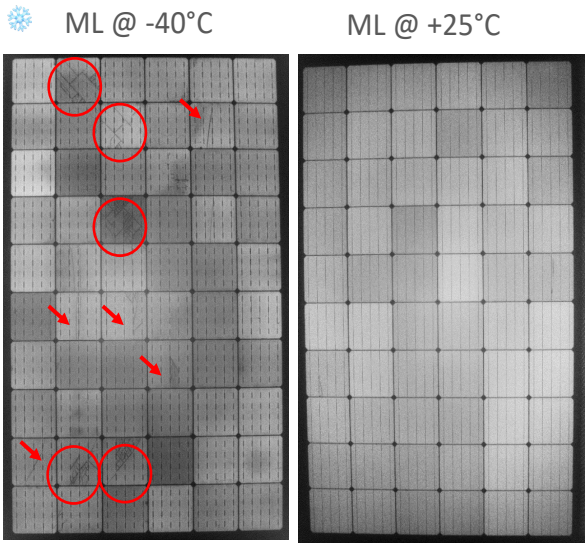
Test dei diodi di bypass: valutano la capacità dei diodi di bypass di sopportare correnti e temperature elevate. Questi componenti di sicurezza inseriti nei moduli FV impediscono che la corrente attraversi celle ombreggiate, deviandone il flusso e prevenendo così danni da surriscaldamento.

Grazie a PV-DETECT, i ricercatori hanno delineato con maggiore precisione le caratteristiche che un modulo fotovoltaico destinato all'ambiente alpino dovrebbe possedere: viene raccomandato l'utilizzo di moduli a doppio vetro incorniciati, con lastre di almeno 3 mm di spessore ciascuna. Per quanto riguarda l'incapsulamento, l'attenzione si concentra in particolare sui materiali appartenenti alla famiglia delle poliolefine. «Gli elastomeri poliolefinici (POE) mantengono la loro elasticità anche a basse temperature e proteggono meglio le celle in caso di sollecitazioni meccaniche rispetto all'etilene-vinilacetato (EVA), comunemente utilizzato nei moduli standard», spiega Anika Gassner, che presso l'OFI ha dedicato a questo tema la propria tesi di dottorato.

Condizioni di prova adattate

Attualmente, i produttori di moduli fotovoltaici devono sottoporre i nuovi prodotti a test di certificazione prima della loro immissione sul mercato. Queste verifiche (cfr. riquadro p. 2) garantiscono la sicurezza e la robustezza degli impianti FV e si basano sugli standard della International Electrotechnical Commission (IEC). Tuttavia, tali norme sono concepite per applicazioni convenzionali, come i tetti residenziali o gli impianti a terra. «Quando i moduli vengono impiegati in contesti «non convenzionali», ad esempio in installazioni alpine o nei sistemi fotovoltaici integrati in facciate e tetti (BIPV), i test standard risultano meno adeguati», osserva Ebrar Özkalay, scienziato della SUPSI.

Nell'ambito del progetto PV-DETECT, le procedure di prova sono state quindi ricalibrate per rispecchiare le condizioni operative specifiche dei moduli alpini e di quelli integrati negli edifici. I moduli BIPV, ad esempio, tendono a scaldare di più, poiché dissipano meno efficacemente il calore sul lato posteriore rispetto ai pannelli tradizionali montati su strutture rialzate. Per tener conto di questo aspetto, in PV-DETECT le temperature di test sono state aumentate: nei test UV, ad esempio, da 60°C (secondo la norma IEC) a 110°C (PV-DETECT). Anche per i moduli destinati all'ambiente alpino le condizioni di prova sono state adeguate in modo mirato. Per simulare il clima invernale, i ricercatori dell'OFI hanno eseguito prove di carico meccanico statico in camera climatica a temperature fino a -40°C, anziché a 25°C come previsto dagli standard IEC. Questi test hanno portato, tra l'altro, alla conclusione – già anticipata sopra – che, per l'impiego in ambiente alpino, i materiali di incapsulamento a base di poliolefine risultano più adatti rispetto all'etilene-vinilacetato.



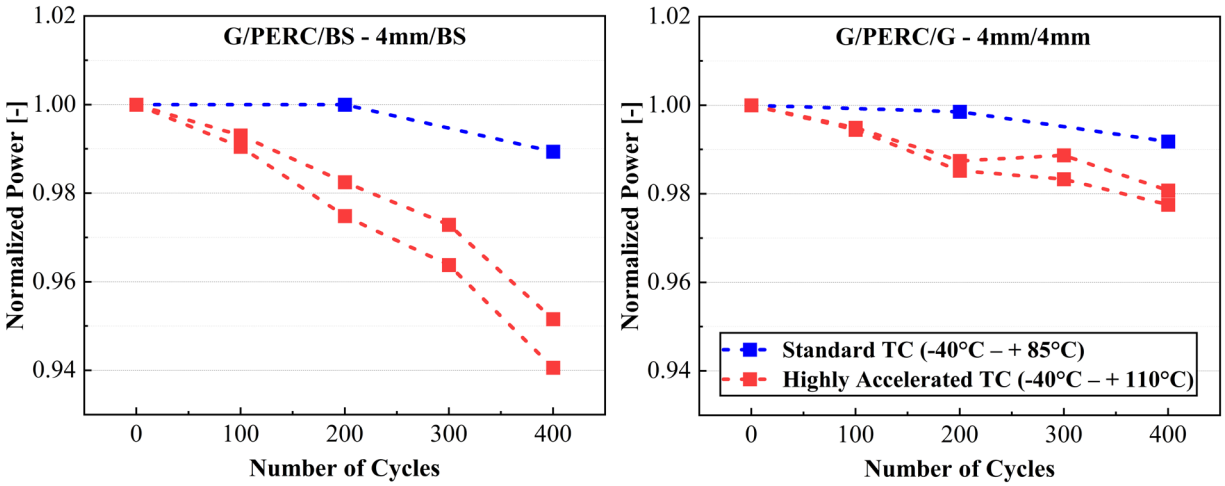
Modulo fotovoltaico dopo un test di carico della durata di un'ora a -40°C (a sinistra) e a 25°C (a destra). A basse temperature si manifestano danni rilevabili tramite elettroluminescenza (marcature in rosso), localizzati nelle celle solari. Foto: OFI/Gassner, utilizzata anche nell'articolo «Enhanced mechanical load testing of photovoltaic modules for cold and snowy climates» in (EES Solar, RSC Publishing)

Tempi ridotti

Il team di ricerca svizzero-austriaco ha perseguito anche un secondo obiettivo: modificare i test in modo da sottoporre i moduli fotovoltaici a sollecitazioni particolarmente intense, come temperature estremamente alte o basse. Questo approccio consente, in prospettiva, di ridurre i tempi di prova: è infatti sufficiente un numero inferiore di cicli per osservare eventuali danni o fenomeni di usura. Una simile accelerazione è particolarmente auspicabile, considerando che oggi i



Durante i test di carico meccanico condotti presso l'istituto di ricerca OFI di Vienna, i moduli fotovoltaici sono stati sottoposti per un'ora a sollecitazioni mediante sacchi di sabbia. Le prove si sono svolte in una camera climatica in grado di raggiungere temperature fino a -40 °C. Foto: OFI/Gassner, utilizzata anche nell'articolo «Enhanced mechanical load testing of photovoltaic modules for cold and snowy climates» in (EES Solar, RSC Publishing)



Ciascun grafico mostra l'andamento della potenza normalizzata di uno specifico modulo FV nelle fasi iniziale, intermedia e finale del test dei cicli termici (blu: test standard; rosso: test fortemente accelerato). In entrambi i casi, nelle condizioni «fortemente accelerate» i moduli evidenziano un calo di prestazione più rapido rispetto al test standard. Grafico: Rapporto finale PV-DETECT

test sui moduli di nuova concezione possono richiedere anche diversi mesi. «Se riusciamo ad accorciare la durata delle singole prove, creiamo le condizioni affinché i produttori possano portare più rapidamente i loro moduli sul mercato», spiega Ebrar Özkalay della SUPSI.

Nel progetto PV-DETECT, ad esempio, è stato possibile accelerare il test dei cicli termici, che analizza l'impatto delle escursioni termiche giornaliere sui moduli FV. Nella procedura standard IEC, i moduli sono sottoposti a 200 cicli con temperature comprese tra -40°C e 85°C. Aumentando la temperatura massima fino a 110°C, la durata del test è stata ridotta a un terzo. Anche le prove di carico meccanico e il cosiddetto hotspot test hanno potuto essere abbreviati, mentre per altri test l'accelerazione è risultata solo parziale o non è stata possibile.

IMPIANTI FOTOVOLTAICI CON UNA DURATA SUPERIORE A 30 ANNI

Nell'ambito del progetto PV-DETECT è stata analizzata anche la resa a lungo termine degli impianti fotovoltaici, in collaborazione con la Scuola Universitaria Professionale bernese, il CSEM e l'Istituto Helmholtz in Erlangen-Norimberga. L'attenzione si è concentrata su sei impianti FV in funzione dalla fine degli anni Ottanta o dall'inizio degli anni Novanta, equipaggiati con moduli solari AM55 e SM55 (Jungfraujoch, Birg, Mont-Soleil, Burgdorf-Fink, Burgdorf-Tiergarten e Möhlin). L'analisi dei dati disponibili ha consentito di determinare il tasso annuo di perdita di prestazione (PLR), pari in media a -0,24%/a, un valore nettamente inferiore a quello generalmente riportato in letteratura (tra -0,75%/a e -1%/a). Dopo 30–35 anni di esercizio, la maggior parte dei moduli conservava ancora almeno l'80% della potenza nominale.

Va tuttavia considerato che i moduli analizzati rappresentano le generazioni precedenti rispetto alle tecnologie attuali. I tassi di degrado rilevati non sono quindi direttamente trasferibili agli impianti più recenti. I moduli moderni, sviluppati a partire dagli anni Novanta, offrono rendimenti più elevati, ma presentano anche una maggiore complessità costruttiva e, in alcuni casi, una minore affidabilità rispetto alle soluzioni precedenti. «Le eccellenti prestazioni nel lungo periodo dei moduli più datati dimostrano che il settore fotovoltaico è in grado di realizzare prodotti estremamente affidabili anche in condizioni ambientali severe come quelle alpine», osserva Ebrar Özkalay. «Allo stesso tempo, evidenziano il ruolo determinante della scelta dei materiali e della qualità produttiva nel garantire una durata operativa nell'arco di diversi decenni».

↗ Three decades, three climates: environmental and material impacts on the long-term reliability of photovoltaic modules. DOI 10.1039/D4EL00040D.



Per valutare gli effetti dell'ombreggiamento, sui moduli fotovoltaici vengono applicate apposite maschere (le tre piastre metalliche allungate visibili nell'immagine). I test si svolgono all'aperto oppure in laboratorio, dove simulatori solari consentono di riprodurre condizioni di prova controllate. Foto: Özkalay/SUPSI

Benefici per produttori e installatori

I risultati di PV-DETECT sono rilevanti per le aziende che sviluppano moduli fotovoltaici destinati ad applicazioni alpine o al fotovoltaico integrato negli edifici. Ma sono altrettanto significativi anche per gli installatori che operano in contesti montani: grazie agli esiti del progetto possono valutare con maggiore precisione quali moduli siano effettivamente adatti all'impiego in ambiente alpino. Gli installatori beneficiano inoltre delle nuove procedure di prova, che all'occorrenza possono applicare direttamente per effettuare verifiche in proprio e ridurre i rischi legati alla posa dei moduli. Come sottolinea Ebrar Özkalay: «Nel contesto alpino, gli impianti fotovoltaici comportano costi di installazione elevati. Proprio per questo è fondamentale utilizzare moduli di alta qualità, in grado di garantire una lunga durata operativa ed evitare così costi successivi di manutenzione o, nel peggiore dei casi, di sostituzione».

- Ulteriori informazioni sul progetto di ricerca **PV-DETECT – Accelerated product development for unconventional PV applications through advanced reliability testing combined with early degradation detection**.

- Per **informazioni** è possibile contattare Stefan Oberholzer, responsabile del programma di ricerca sul fotovoltaico dell'UFE.

- Altri **articoli specialistici** su progetti di ricerca, progetti pilota, di dimostrazione e faro in materia di Fotovoltaico.

Autore: Benedikt Vogel, su incarico dell'Ufficio federale dell'energia (UFE)
Versione: agosto 2026