

PIANO TRIENNALE DI REALIZZAZIONE 2025-2027 DELLA RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE

Presentazione dei progetti di ricerca di cui all'art. 10 comma 2, lettera a) del decreto 26 gennaio 2000

Tema di ricerca 1.1

Titolo del progetto

Progetto Integrato Fotovoltaico innovativo, efficiente e sostenibile

- Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile [ENEA]
- Consiglio Nazionale delle Ricerche [CNR]
- Ricerca sul Sistema Energetico [RSE]
- CENTRO INTERUNIVERSITARIO DI RICERCA IN PSICOLOGIA AMBIENTALE – UNIVERSITA' LA SAPIENZA DI ROMA [CIRPA]
- Dipartimento di Ingegneria dei Sistemi e delle Tecnologie Industriali [UNIPR DISTI]
- Università degli Studi di Bari "Aldo Moro" - Dipartimento di Scienze del Suolo, della Pianta e degli Alimenti [UNIBA-DSSPA]
- Università degli Studi di Bari "Aldo Moro" - Dipartimento di Chimica [UNIBA-CHIM]
- Università degli Studi di Milano-Bicocca, Dipartimento di Scienza dei Materiali [UNIMIB]
- Università degli Studi di Napoli "Federico II" - Centro Museale "Musei delle Scienze Agrarie" [UNINA-MUSA]
- Università degli Studi di Napoli Federico II - Dipartimento di Architettura [UNINA-DIARC]
- Università degli Studi di Napoli Federico II - Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e dei Processi Industriali [UNINA-DICMAPI]
- Università degli Studi di Napoli Federico II - Dipartimento di

- Ingegneria Elettrica e delle Tecnologie dell'Informazione [UNINA-DIETI]
- Università degli Studi di Napoli Federico II - Dipartimento di Scienze Chimiche [UNINA-DSC]
- Università degli Studi di Napoli Federico II - Dipartimento di Fisica "Ettore Pancini" [UNINA-DF]
- Università degli Studi di Roma Tor Vergata - Dipartimento di Ingegneria Elettronica [UNIROMA2-DIE]
- Università degli Studi di Roma Tor Vergata - Dipartimento di Ingegneria Elettronica [UNIROMA2 DIE]
- Università degli Studi di Roma Tor Vergata -Dipartimento di Ingegneria dell'Impresa [UNIROMA2-DII]
- Università degli Studi di Torino - Dipartimento di Chimica [UNITO]
- Università della Campania "L. Vanvitelli" - Dipartimento di Scienze e Tecnologie Ambientali, Biologiche e Farmaceutiche [UNICAMPANIA]
- Università di Catania [UNICT]

Durata del progetto: 36 mesi

Costo proposto: 20.135.000,00 €

2. DATI GENERALI DEL PROGETTO

2.1 Dati progetto

Titolo del progetto

Progetto Integrato Fotovoltaico innovativo, efficiente e sostenibile

Durata del progetto

36 mesi

2.2 Descrizione progetto

Abstract del progetto

Il solare fotovoltaico (FV) è una tecnologia che può contribuire non solo alla transizione energetica globale necessaria a ridurre le emissioni di gas serra e contrastare i cambiamenti climatici, ma anche alla diminuzione dei costi di produzione dell'energia elettrica, come confermato anche da dati IRENA che evidenziano una riduzione dei costi di installazione per impianti FV di taglia utility-scale dell'86% nel periodo 2010-2023.

L'attività di ricerca di questo progetto mira a promuovere innovazione nel settore FV e a incoraggiarne la diffusione così da favorire il raggiungimento degli obiettivi nazionali individuati dal PNIEC al 2030. Il progetto si pone come obiettivi: (1) sviluppare tecnologie FV innovative ad alta efficienza da avviare verso i processi produttivi, valutandone la sostenibilità in termini economici ed ambientali; (2) sviluppare metodologie in grado di assicurare le migliori prestazioni energetiche agli impianti FV durante la loro vita utile con un basso costo di gestione; (3) studiare possibili soluzioni per l'integrazione del FV in differenti ambiti applicativi (FV integrato negli edifici, agrivoltaico, fotovoltaico galleggiante), in modo da promuovere l'incremento della capacità FV installata e della penetrazione nel sistema energetico nazionale.

Saranno quindi studiati materiali, architetture di celle solari e processi di realizzazione per celle di nuova generazione. In particolare, saranno progettate celle a multigiunzione dove due o più materiali saranno combinati insieme con l'obiettivo di sfruttare meglio lo spettro solare consentendo così di ottenere efficienze maggiori rispetto a quelle ottenibili con dispositivi a singola giunzione. Saranno ad esempio studiate celle in silicio da utilizzare come componente posteriore di celle tandem dove la cella frontale potrà essere realizzata con un assorbitore a base di perovskite (tandem perovskite/silicio) o altri materiali (composti III-V o nitruuri). La perovskite potrà essere anche combinata con film a base di CIGS per ottenere celle tandem perovskite/CIGS, ma saranno anche studiate formulazioni chimiche della perovskite differenti che ne consentano o l'utilizzo in celle a singola giunzione oppure la possibilità di progettare e realizzare prototipi di celle a tripla giunzione con assorbitori a base di perovskite e/o di perovskite e silicio.

Con l'obiettivo di migliorare la sicurezza, la longevità e l'energia elettrica prodotta degli impianti FV, sono previste attività che si propongono di confrontare le prestazioni e l'affidabilità di differenti tecnologie di moduli FV di recente immissione sul mercato, con una sperimentazione da eseguire in differenti siti. Gli impianti FV già disponibili nel progetto o di nuova realizzazione e i relativi dati prestazionali contribuiranno anche allo sviluppo di tecniche diagnostiche innovative che insieme allo sviluppo di metodi di intelligenza artificiale potranno contribuire a definire strategie di anomaly detection e di riconoscimento dei guasti per gli impianti FV. Al fine di promuovere l'impiego dell'intelligenza artificiale nella gestione degli impianti FV, verranno resi disponibili dati di guasto di impianti fotovoltaici reali, attraverso un repository di dati pubblico.

Saranno poi studiate soluzioni per l'applicazione del FV in diversi contesti. Saranno effettuati degli studi volti a sistematizzare le conoscenze attuali su impianti agrivoltaici per suggerire approcci innovativi alla progettazione e/o all'inserimento di essi in aree rurali e peri-urbane. Con la collaborazione di esperti nel settore agricolo e l'ausilio di impianti agrivoltaici su cui effettuare prove sperimentali verranno investigate soluzioni efficaci per il monitoraggio, la manutenzione e l'ottimizzazione delle prestazioni sia agricole che energetiche. Inoltre, con la realizzazione e/o ottimizzazione di impianti dimostratori agrivoltaici nel progetto si costituirà un hub sperimentale diffuso disponibile per lo studio di soluzioni progettuali innovative. Saranno, inoltre, condotti studi sulla crescita di piante in serre con coperture fotovoltaiche semitrasparenti con approcci su scale differenti. In particolare, alla scala di laboratorio si studieranno celle solari innovative basate su film sottili organici o DSSC (Dye Sensitized Solar Cells), che trasmettano la radiazione solare necessaria alla crescita delle piante e utilizzino il resto dello spettro solare per la generazione elettrica. Si prevede, inoltre di progettare e sviluppare un potenziale approccio per impianti FV galleggianti (near-shore e in bacini d'acqua dolce) e definire per essi le migliori pratiche per il monitoraggio e la manutenzione.

Saranno infine considerati alcuni aspetti di sostenibilità del fotovoltaico, tra cui la valutazione dell'impatto economico e sociale della creazione di una filiera nazionale sul fotovoltaico, con strumenti analitici per quantificare gli effetti economici e occupazionali derivanti dalla realizzazione di impianti produttivi di celle e moduli fotovoltaici, nonché lo studio di incapsulanti non convenzionali per l'ecodesign di moduli FV e l'analisi di aspetti di sicurezza nell'esercizio degli impianti FV. Saranno anche identificati, con gli strumenti della psicologia

ambientale, processi e fattori che in Italia possono favorire o al contrario ostacolare l'accettazione di impianti di fotovoltaico innovativo, in particolare di tipo agrivoltaico.

Tutti gli obiettivi intendono promuovere benefici per il sistema elettrico italiano e per i suoi utenti, nonché rilevanti ricadute per l'industria nazionale del settore. Il progetto si avvarrà del know-how e delle infrastrutture di ricerca già disponibili e di quelle che verranno implementate nel corso del presente Programma di Ricerca, mettendo anche a sistema le esperienze nazionali presenti nei diversi Organismi di ricerca e in svariate Università con un approccio che potrà essere multidisciplinare, nonché correlandosi costantemente con gli operatori FV italiani.

Abstract del progetto ENG

Solar photovoltaics (PV) is a technology that can contribute not only to the global energy transition needed to reduce greenhouse gas emissions and combat climate change, but also to the reduction of electricity generation costs, as also confirmed by IRENA data showing an 86 % reduction in utility-scale PV installation costs over the 2010-2023 period.

The research activity of this project aims to promote innovation in the photovoltaic sector and foster its deployment so as to facilitate the achievement of the national goals identified by the PNIEC for 2030. The project has the following objectives: (1) to develop innovative high-efficiency photovoltaic technologies to be introduced in production processes, evaluating their sustainability in economic and environmental terms; (2) to develop methodologies that can guarantee the best energy performance of photovoltaic systems during their useful life with low operating costs; and (3) to study possible solutions for the integration of photovoltaics in different application areas (building-integrated photovoltaics, agrivoltaics, floating photovoltaics), in order to promote the increase of installed photovoltaic capacity and penetration in the national energy system.

Materials, solar cell architectures and fabrication processes for next-generation cells will then be studied. In particular, multi-junction cells will be designed where two or more materials will be combined together with the target of better harnessing the solar spectrum thus enabling higher efficiencies than can be achieved with single-junction devices. For example, silicon cells will be investigated for use as the back component of tandem cells where the front cell may be made with a perovskite-based absorber (tandem perovskite/silicon) or other materials (III-V compounds or nitrides). Perovskite may also be combined with CIGS-based films to make perovskite/CIGS tandem cells, but different chemical formulations of perovskite will also be investigated that will allow either its use in single-junction cells or the possibility of designing and prototyping triple-junction cells with perovskite and/or perovskite and silicon-based absorbers.

With the target of improving the safety, lifetime, and power output of PV systems, activities are planned to compare the performance and reliability of different PV module technologies recently brought to market, with experimentation to be carried out at different sites. PV systems already available in the project or newly implemented and their performance data will also contribute to the development of innovative diagnostic techniques, which together with the development of artificial intelligence methods can help define anomaly detection and fault recognition strategies for PV systems. In order to promote the use of artificial intelligence in PV system management, failure data from real PV systems will be made available through a public data repository.

Solutions for the application of PV in different contexts will then be studied. Studies will be carried out to consolidate current knowledge on agrivoltaic systems to suggest innovative approaches to their design and/or placement in rural and peri-urban areas. With the collaboration of experts in the agricultural sector and the help of agrivoltaic plants on which to conduct experimental tests, effective solutions for monitoring, maintenance and optimization of both agricultural and energy performance will be investigated. In addition, with the construction and/or optimization of agrivoltaic demonstration plants in the project, a widespread experimental hub available for the study of innovative design solutions will be established. In addition, studies on plant growth in greenhouses with semi-transparent photovoltaic covers will be conducted with approaches at different scales. In particular, at the laboratory scale, innovative solar cells based on organic thin films or Dye Sensitized Solar Cells (DSSCs), which transmit the solar radiation necessary for plant growth and use the rest of the solar spectrum for electrical generation, will be studied. It is also planned to design and develop a potential approach for floating PV systems (near shore and in freshwater basins) and define best practices for them for monitoring and maintenance.

Finally, some aspects of photovoltaic sustainability will be considered, including the evaluation of the economic and social impact of the creation of a national PV supply chain, with analytical tools to quantify the economic and employment effects of setting up PV cell and module production plants, as well as the study of unconventional encapsulants for the ecodesign of PV modules and the analysis of safety aspects in the operation of PV plants. Processes and factors in Italy that may favor or conversely hinder the acceptance of innovative PV plants, particularly agrivoltaic ones, will also be identified using the tools of environmental psychology.

All objectives are intended to promote benefits for the Italian electricity system and its users, as well as relevant spillovers for the national industry in the sector. The project will make use of the know-how and research infrastructures already available and those that will be implemented during the course of this Research Program, also systemizing the national expertise present in different Research Organizations and in various Universities with an approach that can be multidisciplinary, as well as constantly correlating with Italian PV operators.

2.3 TRL progetto

TRL iniziale: 3

TRL finale: 7

I valori complessivi di TRL sopra indicati tengono conto dei valori minimi e massimi delle attività nel progetto, in ragione della specifica natura delle attività condotte, che operano su aspetti che hanno un differente grado di maturità.

In particolare, per quanto riguarda lo sviluppo di nuovi materiali da applicare in celle e moduli FV nonché di nuove architetture di dispositivo FV, si parte da un TRL di 3 per posizionarsi, laddove la sperimentazione ne attesti le potenzialità, ad un valore 4-5. Lo scale-up delle tecnologie già in parte sviluppate nel precedente triennio avrà l'obiettivo di assestare tali tecnologie su un TRL pari a 5.

Nello sviluppo di apparecchiature e impianti FV dimostratori, ci si baserà su prodotti già esistenti e si avrà l'obiettivo di assestare le soluzioni tecnologiche su un TRL pari a 7.

Lo sviluppo di metodologie avanzate per mappatura, monitoraggio e ottimizzazione dell'energia generata da FV partirà da un TRL di 4 per assestarsi su un valore a fine progetto pari a 6.

2.4 Inquadramento del progetto nello stato dell'arte

a) Stato dell'arte nazionale e internazionale relativamente alle attività previste nel progetto

Il fotovoltaico (FV) ha mostrato una crescita in termini di potenza installata negli ultimi 10 anni impressionante: nel 2013 circa 140 GW/anno di potenza FV erano installati nel mondo mentre nel 2023 si è raggiunta una potenza cumulata pari a 1.642 GW. Anche Italia negli ultimi anni ha contribuito a questo trend: nel 2023 l'Italia è risultata all'ottavo posto nella classifica dei primi 10 mercati mondiali, con 5,2 GW di nuova potenza installata, mentre nel 2024 risultano nuovi impianti FV per circa 7 GW. A questi dati molto positivi si aggiungono le notizie circa nuove iniziative industriali nella nostra nazione tra le quali spiccano la nuova fabbrica di celle e moduli 3SUN che ha già iniziato a produrre moduli con celle ad eterogiunzione di silicio bifacciali e sta finalizzando il ramp-up della linea celle con una capacità massima di produzione di 3 GW/anno, mentre Futura Sun prevede la costruzione di una Gigafactory per la produzione 1,4 GW di moduli FV all'anno a Cittadella, in provincia di Padova.

Nel mondo, circa il 98% dei moduli FV vengono realizzati con celle in silicio cristallino (c-Si). I moduli FV commerciali presentano efficienze che si attestano mediamente intorno al 22% e utilizzano per lo più celle solari in c-Si di tipo PERC. Le celle in c-Si di tipo eterogiunzione (HJT) presentano il record mondiale di efficienza con un valore di 27,1% su cella contattata da entrambi i lati (area circa 220 cm²) e un'efficienza di 27,3% per una cella con entrambi i contatti sulla parte posteriore (HBC, area 165,7 cm²); entrambi i record sono stati ottenuti nel corso del 2024, il primo dalla Trinasolar e il secondo dalla LONGI. In Italia EGP 3SUN ha raggiunto già ad agosto 2020 un'efficienza per celle solari HJT del 25,0% su un wafer di dimensione M2 (circa 244 cm²) in collaborazione con il CEA-INES.

Le celle solari tandem realizzate combinando un materiale assorbitore a film sottile ad alto gap di energia nella componente frontale e il silicio nella componente posteriore del dispositivo sono una delle architetture ritenute più promettenti per una nuova generazione di moduli FV grazie anche alla possibilità di sfruttare appieno il know-how già disponibile del silicio. L'architettura che al momento ha raggiunto le migliori prestazioni è quella in cui la componente frontale è realizzata con un film sottile di perovskite: La LONGI ha stabilito nel 2024 un record di efficienza pari a 34,6% per una cella tandem perovskite/silicio. Questi risultati sono stati dimostrati su aree dell'ordine del cm² e necessitano, quindi, di essere validati su aree maggiori, con processi e materiali poco costosi e che possano sostenere i volumi di produzione necessari all'industria fotovoltaica. Interessanti risultati sono stati ottenuti negli ultimi anni anche combinando una cella posteriore in silicio con una cella frontale realizzata con materiali III-V: la migliore efficienza ottenuta, pari a 32,8%, è stata misurata su una struttura GaAs/Si a 4 terminali in cui le due celle sono connesse meccanicamente.

Per quanto riguarda le tecnologie FV a film sottile, le celle solari a singola giunzione in perovskite hanno raggiunto valori record di efficienza iniziale pari a 26,7% su area inferiore al cm², mentre combinando film di perovskite con differenti proprietà ottiche è stata ottenuto un record di efficienza per una cella tandem perovskite/perovskite di 30,1% su area 0,03 cm². Sempre in ambito film sottile promettenti risultati sono stati dimostrati combinando la perovskite con una cella posteriore in CIGS; per tale tandem il migliore valore di efficienza è pari a 24,2%.

In merito alle nuove applicazioni del fotovoltaico per favorirne l'introduzione nel sistema energetico nazionale, gli attuali trend e previsioni di sfruttamento delle Fonti Energetiche Rinnovabili (FER), così come la letteratura scientifica, mostrano che uno strumento cruciale per il successo della transizione energetica sia l'Agrivoltaico (o Agrovoltivo, o Agro-fotovoltaico o Solar Sharing). Si tratta di un approccio integrato che combina la produzione agricola con quella di energia elettrica da fonte solare, attraverso l'installazione di moduli fotovoltaici (FV) sopra le colture o i pascoli, creando una sinergia tra le due produzioni. Il potenziale tecnico ed economico

dell'Agrivoltaico è enorme. Proiezioni accreditate a livello globale mostrano che tale tecnologia diventerà – entro il 2035 – la configurazione principale di sfruttamento dell'energia solare grazie alla capacità di ridurre l'impiego di suolo, integrandosi nel paesaggio e investendo sulla bellezza di nuovi paesaggi rinnovabili. In Italia, attualmente sono installati pochi impianti agrivoltaici di medie dimensioni (1-3 MW) caratterizzati da un'altezza dei moduli tale da consentire la coltivazione nell'area sottostante. Tuttavia, entro il 2026 è prevista la realizzazione di ulteriori impianti innovativi, grazie ai finanziamenti legati al Bando Agrivoltaico D.M. n. 436 del 22/12/2023, che prevede il finanziamento a valere su fondi PNRR di 540 progetti, per una potenza totale pari a 1.548 MW. In questo ambito la ricerca si muove per sviluppare conoscenze preliminari adeguate relative alle prestazioni degli impianti (sperimentazioni in campo) e per trovare soluzioni che possano contribuire ad una migliore accettabilità di questo approccio. Anche il FV galleggiante è ritenuta una possibile applicazione molto interessante grazie alla possibilità di favorire condizioni per un migliore rendimento dei moduli FV e ridurre l'evaporazione dell'acqua con risparmio di preziose risorse idriche, evitando al contempo il consumo di suolo. In questo contesto la sperimentazione in corso in ambiti internazionali è volta ad acquisire dati circa l'affidabilità e la resilienza di impianti FV galleggianti collocati in bacini di vario genere. È necessario stabilire delle linee guida a partire anche da valutazioni sperimentali che possano così indirizzare gli stakeholder su aspetti tecnici e normativi.

Per quanto riguarda la producibilità degli impianti FV, ci sono diversi temi da considerare tra cui le prestazioni delle tecnologie più innovative quali ad esempio i moduli in silicio con celle di tipo HJT o TopCon, eventualmente di tipo bifacciale, e anche quelli di moduli tandem per i quali è stata recentemente annunciata la commercializzazione da parte di Oxford PV, per i quali è fondamentale valutarne il funzionamento in diversi siti comprendendo appieno limiti e potenzialità di tali tecnologie rispetto a quelle più convenzionali. Inoltre, il rilevamento dei guasti negli impianti fotovoltaici è un'area di ricerca cruciale per migliorare la produzione di energia elettrica degli impianti nel tempo. Attualmente le tecniche più diffuse fanno uso dei dati di produzione energetica raccolti a livello inverter, che si sono diffuse anche grazie alla facilità ed economicità della raccolta dati, ma presentano delle limitazioni legate all'impossibilità di individuare automaticamente l'origine della anomalia, ossia quale è l'elemento (modulo, cella, ecc.) che non funziona, e soprattutto di predire eventuali futuri malfunzionamenti dovuti all'innescarsi di fenomeni, che possono provocare danneggiamento di qualche elemento in tempi brevi. Per questa ragione si stanno diffondendo tecniche che fanno uso di una diagnostica a livello, ad esempio, del modulo attraverso l'uso di sensori low cost organizzati in rete di sensori o tecniche di elaborazioni di serie temporali di immagini acquisite ed elaborate con metodi di Machine Learning.

b) Attività svolte nel triennio precedente

Nel triennio precedente i tre affidatari di questo progetto hanno svolto attività collegate, direttamente o indirettamente, alle attività previste nel progetto come di seguito descritto.

Nell'ambito dello "Sviluppo di materiali e architetture di dispositivi FV ad alta efficienza", ENEA ha sviluppato celle e prototipi di moduli in perovskite, utilizzando anche tecniche differenti (da soluzione e in vuoto) per la deposizione della perovskite. E' stato così possibile ottenere celle con valori di efficienza maggiori del 21% o sviluppate per una loro corretta applicazione dispositivi tandem (celle semitrasparenti con gap di energia appropriata). Sono stati realizzati moduli FV in perovskite da circa 300 cm² con efficienze superiori al 16%. Sono state messe a punto celle in silicio SHJ con Voc di circa 720 mV e correnti che hanno raggiunto anche valori di circa 40 mA/cm². Combinando tali celle in silicio con una cella frontale in perovskite sono state ottenute celle tandem di area 1 cm² con efficienza massima pari al 31%, nel caso di accoppiamento meccanico tra le componenti, e pari al 25,3% per l'architettura monolitica. Si è lavorato anche allo scaleup di celle, realizzando i primi prototipi di cella tandem monolitica perovskite/Si su area di 20cm².

È stato, poi, realizzato da ENEA un impianto agrivoltaico dimostratore a Scalea elevato fisso da circa 18kW che alimenta un dissalatore, le cui prestazioni complessive possono essere confrontate con un impianto analogo elevato ad inseguimento posto nello stesso sito. Sono stati raccolti dati di crescita di varie tipologie di piante da questo e da altri impianti agrivoltaici, oppure conducendo esperimenti di resa produttiva di colture in una serra FV realizzata in ambito RdS. È stato anche realizzato un piccolo prototipo da laboratorio di serra con copertura semitrasparente (100 x 40 cm²) utile allo sviluppo di tecnologie innovative per l'agrivoltaico a base di film sottili organici o inorganici.

Sono stati sviluppati: un metodo per l'elaborazione di un catasto solare fotovoltaico urbano e un metodo per la definizione della vocazionalità dei siti all'agrivoltaico, basato su un'analisi spaziale multicriteriale che valuta le priorità di criteri opportunamente selezionati e sono stati sviluppati algoritmi per il monitoraggio a basso costo di impianti FV.

RSE ha sviluppato un modello di simulazione di celle a singola e a multi-giunzione per mettere a punto le nuove strutture di cella e del loro coating. Sono stati svolti studi di integrazione dei composti III-V e IV che hanno permesso di ridurre a valori accettabili la "cross contaminazione" fra gli elementi dei gruppi III-V e del gruppo IV. È stato altresì potenziato il sistema di misura di Efficienza Quantica per celle fino a quattro giunzioni e implementato il relativo sistema di calibrazione. Relativamente ai sistemi ottici per l'alta concentrazione solare, è stata dimostrata la fattibilità di concentratori prismatici compatti in vetro con buoni risultati di performance; per la media concentrazione è stata sviluppata un'ottica innovativa per una movimentazione planare 2D delle celle CPV tramite attuatori a memoria di forma, inserite in una unità funzionale di modulo ibrido FV /CPV. Misure preliminari sono state effettuate su tale unità funzionale, mentre

caratterizzazioni in potenza ed energia sono state condotte su moduli CPV.

Studi di LCA sono stati eseguiti da RSE su impianti FV innovativi a terra "utility scale", analizzando tecnologie ad alta efficienza di nuova commercializzazione (celle in silicio HJT bifacciale, PERC e IBC), in collaborazione con produttori italiani ed europei di celle, moduli, strutture di sostegno e inverter; per i processi di realizzazione del wafer di silicio sono stati invece utilizzati dati di letteratura.

Per quanto riguarda le applicazioni del fotovoltaico e l'ottimizzazione della loro produzione, sono state condotte attività mirate a sviluppare metodologie in grado di assicurare le migliori prestazioni energetiche agli impianti FV durante la loro vita utile, mantenendo bassi i costi di gestione. Sono state sviluppate nuove soluzioni di gestione degli impianti FV, utilizzando strumenti di O&M digitale che permettono di analizzare i fenomeni di guasto che maggiormente influenzano le prestazioni e di individuare nuovi strumenti basati su modelli matematici per il riconoscimento dei guasti. È stato inoltre creato un repository dei dati di guasto, da condividere con la comunità scientifica per la validazione di algoritmi di riconoscimento dei guasti, basato principalmente sui dati degli impianti FV installati presso la sede RSE di Milano (Facility Guasti FV), che costituiscono un setup sperimentale su cui è possibile riprodurre i principali tipi di guasto che possono verificarsi negli impianti fotovoltaici.

Sono state inoltre valutate nuove soluzioni che in grado di favorire la penetrazione del FV nel sistema elettrico, analizzando soprattutto la soluzione impiantistica dell'agrivoltaico.

CNR ha sviluppato soluzioni tecnologiche per l'integrazione di celle a base di CuInxGa1-xSe2 (CIGS) con celle a perovskite (PSC) nella classica configurazione tandem a due o quattro terminali. Il focus della ricerca è stata l'ottimizzazione dell'architettura delle celle tandem in funzione della stabilità del dispositivo, della trasferibilità del processo in linea di produzione e della possibile applicazione in prodotti fotovoltaici destinati all'integrazione nell'ambiente costruito. Uno dei risultati più significativi ottenuti nel triennio precedente in queste linee di attività ha riguardato proprio il contributo del CIGS alla stabilità delle celle PSC, tema che sarà ulteriormente sviluppato in questo triennio ed esteso a celle CIGS/PSC con architetture diverse dalla cella tandem film sottile. Sempre con l'obiettivo di sviluppare prodotti "made in Italy" destinati al mercato del fotovoltaico integrato nell'ambiente costruito, il CNR ha anche compiuto un passo decisivo nella direzione della manifattura di moduli fotovoltaici a base di DSSC, trasferendo le tecnologie sviluppate in laboratorio nei trienni precedenti ad una linea di produzione prototipale di moduli DSSC. Infine, nell'ottica di sperimentare soluzioni per una maggiore penetrazione del fotovoltaico in un contesto di generazione distribuita, è stato studiato e progettato l'impianto fotovoltaico sperimentale del CNR-IMEM a Parma che sarà presto realizzato e messo a disposizione della Comunità Energetica del Campus, gestita della Fondazione CER Parma 2020 già costituita da CNR, Università di Parma, Comune di Parma e ASL Parma.

c) Obiettivi scientifici e tecnologici e progressi attesi rispetto allo stato dell'arte

L'attività ha la finalità di sviluppare tecnologie fotovoltaiche ad alta efficienza nonché soluzioni innovative per promuovere la diffusione della tecnologia FV e per il monitoraggio, la gestione ottimale e la previsione della produzione energetica degli impianti fotovoltaici.

Per le celle ad alta efficienza gli obiettivi previsti riguardano lo sviluppo di differenti materiali da utilizzare in celle solari a singola giunzione e a multigiunzione. Saranno studiati film sottili a base di perovskite o eventuali altri materiali ad alta gap da accoppiare al silicio o a film di CIGS per realizzare celle tandem. Le attività partono dalle conoscenze acquisite sui materiali e dai risultati ottenuti sui dispositivi nello scorso triennio e hanno l'obiettivo di migliorare le prestazioni dei dispositivi studiati, ampliare le conoscenze su materiali e processi e valutare gli approcci più promettenti in termini di scalabilità delle celle solari e tipologia di processo per promuovere possibili percorsi di trasferimento industriale. Saranno poi avviati studi riguardanti altre architetture di celle a multigiunzione che appaiono potenzialmente interessanti per gli scopi del progetto. In particolare, lavorando alla possibilità di ottenere film di perovskite con gap ottiche in un intervallo piuttosto ampio, si esplorerà la possibilità di ottenere prototipi funzionanti di celle triple tutte in perovskite o con cella posteriore in silicio. Si studieranno poi materiali polimerici avanzati da utilizzare come incapsulanti per la realizzazione di moduli progettati per essere ecosostenibili e si valuteranno processi più sostenibili per i dispositivi.

In relazione alle attività aventi la finalità di massimizzare la produzione di energia elettrica degli impianti PV, si valuteranno tecniche di caratterizzazione innovative per impianti FV da utilizzare negli impianti dimostratori disponibili tra i partner e su quelli di nuova realizzazione. I dati prestazionali degli impianti FV, correlati anche da dati meteo e di produzione attuale di energia elettrica, saranno utilizzati per costruire modelli di Anomaly Detection e di diagnosi dei guasti, che possano consentire di identificare e riconoscere tempestivamente malfunzionamenti grazie a un monitoraggio continuo e automatico, e parallelamente di ottenere un miglioramento della produzione energetica e una riduzione dei costi di manutenzione.

Per favorire la diffusione del FV continuerà lo sviluppo di soluzioni innovative per l'agrivoltaico, con un approccio multidisciplinare necessario per individuare un percorso virtuoso nella progettazione e realizzazione di sistemi agrivoltaici che comprenda i diversi punti di vista (energia, agricoltura, impatto ambientale/paesaggistico, site-suitability). Accanto agli impianti dimostratori agrivoltaici realizzati nello scorso triennio se ne aggiungeranno altri che potranno costituire una sorta di hub sperimentale disponibile per elaborare procedure di conduzione, monitoraggio e per stabilire indicatori e metriche relativi alla sostenibilità complessiva dei sistemi agrivoltaici. Saranno anche considerati aspetti di accettabilità sociale che possono pesantemente condizionare la diffusione dell'agrivoltaico nel nostro paese. Lo sviluppo di soluzioni innovative per l'agrivoltaico comprende anche una sperimentazione su celle solari a film sottile a base di materiali organici o del tipo DSSC semitrasparenti da utilizzare per la realizzazione di coperture di serre agricole. Queste attività potrebbero

condurre allo sviluppo di tecnologie FV dedicate a specifici settori di grande interesse.

Inoltre, saranno avviati studi e sperimentazioni sul potenziale utilizzo del fotovoltaico galleggiante. Lo studio coinvolgerà da un lato aspetti legati alla necessità di implementare la normativa per tenere conto delle esigenze di tali impianti e dall'altro si considererà un approccio innovativo circa la possibilità di installare sistemi flottanti near-shore e su bacini d'acqua dolce, evitando impatti sul contesto ambientale e paesaggistico.

Si può, dunque, affermare che le attività proposte nel progetto integrato, che coinvolgono gli Enti affidatari e diversi co-beneficiari individuati tra le eccellenze nazionali, possono consentire alla ricerca nazionale di avvicinarsi allo stato dell'arte delle tecnologie FV e di promuovere alcune delle innovazioni in sviluppo verso l'industria di settore. Inoltre, gli studi che riguardano le potenziali applicazioni del FV in campi quali il BIPV e l'agrivoltaico, accompagnati dallo sviluppo di metodologie innovative per il monitoraggio degli impianti possono produrre ricadute molto positive sul sistema elettrico nazionale e sui suoi utilizzatori.

d) Eventuali collegamenti con altri progetti relativamente alle attività previste nel progetto

Contemporaneamente alle attività di RdS, i tre affidatari hanno condotto e, in alcuni casi, conducono tuttora ricerche correlate ai temi trattati da questo progetto nell'ambito di RdS Bando di tipo A, Mission Innovation e altre iniziative progettuali nazionali ed europee.

In particolare, si segnalano le correlazioni con i seguenti progetti.

H2020 – progetto VIPERLAB - Fully connected virtual and physical perovskite photovoltaics lab [H2020-INFRAIA-2018-2020 (2021-2024) n. 101006715], coordinato da HZB, Germany, con la partecipazione di 15 partner tra cui ENEA.

Il progetto vuole stimolare i ricercatori accademici e industriali a lavorare insieme per accelerare lo sviluppo della tecnologia in perovskite in EU, connettendo virtualmente e fisicamente i laboratori impegnati nel settore.

MASE – Progetto GoPV Materiali di nuova GeneraziOne Per celle fotoVoltaiche tandem [Bando A MASE – Piano Triennale 2019-2021 – Periodo 2023-2026], coordinato da ENEA con la partecipazione di IIT, Università di Pavia, Università di Roma “Tor Vergata”, Università di Napoli “Federico II”, Università di Catania, Università di Perugia e BeDimensional SpA.

Il progetto prevede lo sviluppo di perovskiti con varie formulazioni (inorganiche, a basso o nullo contenuto di Sn, a bassa dimensionalità) a diverse gap, lo studio di trasportatori di carica e contatti trasparenti, la realizzazione di celle tandem perovskite/perovskite e perovskite/silicio e la progettazione di un sistema di deposizione per la fabbricazione di celle tandem.

MiSE – progetto MARTA Bando: Fondo per la Crescita Sostenibile - Accordi per l'innovazione - Periodo 2023-2026], coordinato dall'azienda TeaTek e con la partecipazione di ENEA.

Il progetto ha come obiettivo la realizzazione di una piattaforma informatica di monitoraggio e gestione di impianti fotovoltaici flessibile e scalabile, anche in termini di funzionalità disponibili, sulla taglia dell'impianto stesso in modo da ottimizzarne le prestazioni, assicurando al contempo che ogni transazione energetica venga effettuata in sicurezza.

MASE – progetto CANVAS (nuovi Concetti, mAteriali e tecnologie per l'iNtegrazione del fotoVoltAico negli edifici in uno scenario di generazione diffusa), Bando A del Piano triennale 2019-2021 della ricerca di sistema elettrico nazionale. CANVAS è coordinato dal CNR, e vede la partecipazione di RSE, EURAC, Università di Torino, Università Milano Bicocca, Politecnico di Torino e CESI.

Le attività di ricerca a basso TRL incluse in questo progetto fanno parte di uno sforzo coordinato per sostenere lo sviluppo di una nuova catena del valore dell'energia basata sulla generazione diffusa di elettricità solare nell'ambiente costruito. Il focus del progetto è sui materiali le cui proprietà fondamentali determinano alcune funzioni specifiche di celle e moduli fotovoltaici integrati: trasparenza, integrazione flessibile nei componenti architettonici, colore ed estetica, alta efficienza, gestione intelligente dell'energia. CANVAS prevede anche lo sviluppo di un nuovo strumento di realtà aumentata combinato con gemelli digitali di siti BIPV reali per "vedere" il potenziale impatto dei futuri prodotti fotovoltaici e confrontarli "onsite", in tempo reale, con gli attuali prodotti commerciali.

MASE – Mission Innovation – progetto IEMAP - Piattaforma Accelerata per i Materiali per l'Energia, periodo maggio 2021 – maggio 2024, coordinato da ENEA con la partecipazione di CNR, RSE e IIT. Il progetto IEMAP prevede lo sviluppo di una piattaforma avanzata, basata su una infrastruttura dati e workflow trasversale, per l'individuazione, l'analisi e la sintesi di nuovi materiali in tre ambiti afferenti al settore "Energia" - batterie, elettrolizzatori e fotovoltaico - anche in chiave di maggiore sostenibilità ambientale.

HEUROPE RisEnergy – Research Infrastructure Services for Renewable Energy

Periodo marzo 2024 – Agosto 2028, coordinato da Karlsruher Institut fuer Technologie con la partecipazione di RSE e CNR.

Il progetto RISEnergy promuove l'innovazione nelle energie rinnovabili, facilitando l'accesso a 87 infrastrutture di ricerca in 19 paesi, e coinvolge 69 partner per sviluppare tecnologie avanzate in fotovoltaico, eolico, idrogeno e altre fonti rinnovabili. Ciascun partner del progetto contribuisce offrendo l'accesso alle proprie infrastrutture di ricerca (RI).

Progetto RdS 2.5 Energia da fonti rinnovabili e integrazione nel territorio

Periodo Gennaio 2025 - Dicembre 2027, coordinato da RSE.

In questo progetto vengono condotte alcune attività di ricerca correlate al presente progetto 1.1; queste sono principalmente: LCA di moduli fotovoltaici commerciali con tecnologie emergenti e di impianti fotovoltaici recentemente installati; effettuazione di misure al suolo di radiazione solare ed elaborazione di dati satellitari che verranno utilizzati anche nelle LA2.1, LA2.2 e LA2.3 del presente progetto, sia per la caratterizzazione della producibilità di impianti fotovoltaici, sia per lo sviluppo di metodologie di allertamento per eventi meteorologici estremi che impattano sull'affidabilità della produzione fotovoltaica.

EU - progetto GOPV - Global Optimization of integrated PhotoVoltaic system for low electricity cost (<https://www.gopvproject.eu>) [U17-UE-H20 periodo: Marzo 2018 - Marzo 2023], coordinato da CEA e con la partecipazione di RSE, EGP, Convert Italia e altri partner europei.

Le attività di GOPV hanno una forte sinergia con quanto sviluppato in questo progetto. Lo scopo del progetto GOPV è infatti quello di dimostrare come grandi impianti fotovoltaici (con potenza superiore a 500 kW) siano in grado di raggiungere un costo competitivo di LCOE pari a 0,02 € / kWh, considerando zone climatiche i cui livelli di radiazione solare raggiungono i 1.900 kWh /m²/anno. Nel Work Package 5 di questo progetto "Optimization of operation & maintenance processes and tools", RSE svolge attività sullo sviluppo di strumenti per la diagnostica guasti negli impianti FV con l'obiettivo di contribuire alla riduzione del LCOE (Levelized Cost of Energy) attraverso l'ottimizzazione di O&M e la riduzione degli interventi di ripristino.

MASE - FOURIER (Fotovoltaico efficiente in facciata per il futuro prossimo della rete elettrica), Bando B del Piano triennale 2019-2021 della ricerca di sistema elettrico nazionale. Coordinato da CAMLIN Italia, con la partecipazione di CNR, EURAC, Applied Materials e Focchi.

Il progetto muove dalla previsione che una fetta sempre più ampia del mercato BIPV sarà costituita dalle facciate soprattutto nel caso di edifici a più piani come i condomini, dove lo spazio sul tetto è insufficiente rispetto alla domanda di energia da parte degli utenti dell'edificio e il contesto normativo spingerà verso concetti che vanno oltre gli nZEB (Nearly Zero Energy Building), chiedendo bilanci energetici positivi a livello di edificio e/o di distretto.

FOURIER ha come obiettivo lo sviluppo di una tipologia di moduli e di sistemi fotovoltaici basati su concetti di mass-customization e adattabili ad un'ampia gamma di progetti di realizzazione o di ristrutturazione di facciate di edifici a più piani, sia dal punto di vista dell'installazione che di quello della gestione e della manutenzione.

MASE - TANDEM (Processi innovativi per una linea di produzione di celle solari TANDEM ad alta efficienza) Bando B del Piano triennale 2019-2021 della ricerca di sistema elettrico nazionale - periodo gennaio 2023- dicembre 2025. Coordinato da OLIVOTTO GLASS TECHNOLOGIES, con la partecipazione di ENEA, CNR e RISE TECHNOLOGY. Il progetto RISE TECHNOLOGY. Il progetto si propone di realizzare una innovativa linea di produzione per celle fotovoltaiche tandem in silicio e perovskite ad alta efficienza (> 29%) ed a costi più contenuti dello stato dell'arte attuale. Il progetto ha l'obiettivo di proporre uno schema di linea di processo per dimostrare la fattibilità e le potenzialità a livello preindustriale di un insieme di tecnologie innovative per realizzare celle tandem ad alta efficienza basate su silicio e perovskite.

Horizon Europe JP "Positive Energy Districts (PED) & Neighbourhoods" - KINETIC (Knowledge Integration for Neighborhoods in Energetic Transition led by Inclusive Communities)

KINETIC è un progetto di ricerca che coinvolge 9 partner e 3 Città (Copenaghen, Bucarest e Parma) e altrettanti siti-demo fra cui il Campus Universitario di Parma. Il progetto mira a superare le sfide esistenti per realizzare un PED a livello di quartiere. L'aspetto innovativo di KINETIC è quello di responsabilizzare le comunità locali come attori chiave del cambiamento, creando una rete informale di comunità energetiche locali (LEC) impegnate a diventare parte integrante dei PED. Il progetto mira anche a superare le sfide esistenti di allineamento dei documenti di pianificazione - attori locali - industria - investimenti. Le metodologie e i risultati del progetto sono orientati a superare queste sfide.

2.5 Obiettivi e risultati

a) Obiettivi finali del progetto

Il progetto integrato per il fotovoltaico è focalizzato sui differenti aspetti che possono concorrere all'innovazione della tecnologia FV, alla

sua diffusione, all'ottimizzazione della produzione degli impianti FV installati e allo sviluppo di un'industria nazionale di settore. In primis si intende lavorare su innovazioni in termini di materiali e architetture che possano migliorare le attuali prestazioni di alcune delle tecnologie FV già consolidate sul mercato (celle solari in silicio e a base di perovskite e CIGS). Questi studi coinvolgono soluzioni che potranno essere disponibili in un arco temporale variabile, coinvolgendo anche studi su materiali e processi avanzati che possono essere utilmente impiegati nel medio/lungo termine nei dispositivi.

Le celle solari in CIGS e quella ad eterogiunzione di silicio saranno anche utilizzate per realizzare celle tandem ad alta efficienza in accoppiamento con la perovskite (si prevede di scalare le celle tandem monolitiche a 2 terminali perovskite/silicio su aree di almeno 20 cm² e di realizzare dei mini-moduli tandem perovskite/Si a 4 terminali da utilizzare anche per valutazioni outdoor). Saranno realizzati film di perovskite in un ampio range di gap ottica in modo da utilizzare questi film sia per realizzare celle a singola giunzione che per utilizzo in celle a multigiunzione, di tipo tandem ma anche celle a tripla giunzione.

In parallelo, si intende esaminare metodi per l'integrazione di altri materiali, quali composti III-V e film sottili appartenenti alla famiglia dei nitruri, col silicio sempre con l'obiettivo di realizzare celle solari tandem di nuova concezione. In questo modo si intende approfondire gli studi di quelle architetture di dispositivo ritenute promettenti per una nuova generazione di moduli FV, ma anche approcciare altre possibili strutture di cella fotovoltaica grazie alla rilevante competenza maturata su materiali innovativi e processi nei precedenti trienni. Gli studi su materiali e dispositivi saranno, in alcuni casi, accompagnati da contributi teorici basati su calcoli ab-initio o sullo sviluppo di modelli analitici che possano aiutare a comprendere gli effetti sulle prestazioni finali dei dispositivi di fattori quali, ad esempio, la qualità delle interfacce e/o le proprietà degli stessi materiali utilizzati.

In generale le attività porranno attenzione all'ecocompatibilità dei processi di realizzazione di celle e moduli, valutando, ad esempio, la possibilità di ridurre l'uso di sostanze chimiche o la sostituzione di materiali/composti chimici inquinanti.

Lo sviluppo di soluzioni per ottimizzare l'energia prodotta dagli impianti punterà a studiare tecniche avanzate di caratterizzazioni che consentano di rivelare eventuali malfunzionamenti anche a livello dei singoli moduli; tali metodologie saranno sperimentate su impianti disponibili nel progetto anche di nuova realizzazione. Saranno così implementati hardware sperimentali e set di dati utili per lo sviluppo di modelli di machine learning per l'anomaly detection e il riconoscimento dei guasti.

Per quanto riguarda lo sviluppo di tecnologie che possano promuovere un uso integrato del fotovoltaico, sono previste attività che riguardano l'agrivoltaico e il Fotovoltaico Flottante.

Fra le attività relative all'agrivoltaico, saranno sviluppate celle solari organiche e DSSC su scala di laboratorio progettate per trasmettere la parte della radiazione solare necessaria alla crescita delle piante, che potranno anche essere testate in una serra da laboratorio realizzata nello scorso triennio. Con un approccio multidisciplinare, sia in termini di sperimentazione che di studi metodologici, saranno valutate le diverse soluzioni per i sistemi agrivoltaici a partire dai dimostratori realizzati nel precedente triennio RdS a cui se ne aggiungeranno altri, fra cui un impianto agrivoltaico verticale e un impianto algovoltivo che abbina una configurazione di fotovoltaico a terra standard a dei fotobioreattori per la produzione di microalghe. I dimostratori saranno utilizzati per sperimentare differenti tipologie di piante e mettere a punto sistemi di monitoraggio, valutando al contempo la produzione energetica. Sarà inoltre avviata un'attività sul fotovoltaico flottante, prevedendo la realizzazione di un prototipo di impianto FV galleggiante near-shore che possa integrarsi nel paesaggio della costa.

Si lavorerà anche allo sviluppo di una test facility con inseguimento a doppio asse per le caratterizzazioni outdoor di moduli FV realizzati con differenti tecnologie.

Saranno infine considerati e analizzati alcuni degli aspetti che possono favorire/ostacolare la diffusione del fotovoltaico tra cui aspetti di sicurezza degli impianti e aspetti di sostenibilità socioeconomica dell'intera filiera del FV.

Il progetto nel suo complesso aggrega in maniera sinergica le differenti esperienze degli affidatari e dei co-beneficiari, in un approccio anche multidisciplinare, che apre una prospettiva di ricadute positive per il sistema produttivo nazionale. L'insieme delle attività proposte potrà contribuire, infatti, da un lato ad individuare nuove soluzioni da trasferire già nel breve termine alle industrie operanti in vari settori, tra cui materiali e dispositivi FV, attrezzature tecnologicamente avanzate, sistemi ad inseguimento, progettazione di nuovi impianti FV, sviluppo software, etc, e dall'altro porrà l'attenzione su possibili innovazioni che potranno essere veicolate verso i processi produttivi nel medio e lungo termine, contribuendo a portare la filiera nazionale di R&I e produttiva sul fotovoltaico verso lo stato dell'arte mondiale. Un ulteriore obiettivo del progetto è la disseminazione e diffusione dei risultati del progetto, che possa determinare un duraturo e costruttivo contatto con i soggetti potenzialmente interessati alle ricerche in questo ambito (Operatori del settore, Istituti di ricerca e Università, Utilizzatori, Organismi di legislazione, di regolazione e di normativa). L'attività verrà svolta sia in ambito nazionale che internazionale e prevede la pubblicazione di articoli su riviste scientifiche o di settore, l'organizzazione di eventi dedicati, la partecipazione a conferenze/convegni e riunioni di organi o comitati normativi nazionali o internazionali (CEI, IEC, IEA-PVPS, EERA PV, etc.) con l'intento di redigere norme, linee guida, best practices che tengano conto dei risultati ottenuti dalla ricerca di questo progetto e stabilire nuove connessioni in ambito nazionale e internazionale.

b) Principali risultati attesi/deliverable

- Film sottili di perovskite, materiali trasportatori di carica, strati buffer e contatti trasparenti per celle a base di perovskite

- Passivanti, trasportatori di carica e contatti trasparenti per celle in silicio
- Celle tandem perovskite/silicio su area da 1 cm² ad almeno 20 cm² (per la larga area si prevede di misurare efficienze maggiori della cella a singola giunzione)
- Celle in perovskite con assorbitori a gap differente di tipo opaco o semitrasparente con efficienze di almeno il 20% e il 15% rispettivamente.
- Prototipi di celle a tripla giunzione ottenute combinando perovskiti a differenti gap oppure combinando due assorbitori in perovskite e il silicio
- Sviluppo di mini-moduli tandem perovskite/Si di dimensione almeno pari ad un intero wafer M2
- Sviluppo di tecniche avanzate per la caratterizzazione di impianti FV (alcuni dei quali realizzati nel presente progetto) e sviluppo di modelli di machine learning nell'ambito dell'anomaly detection
- Impianti dimostratori agrivoltaici di nuova realizzazione e ottimizzazione di dimostratori già esistenti
- Piattaforma digitale per la sistematizzazione delle conoscenze in ambito agrivoltaico
- Protocollo di monitoraggio per sistemi agrivoltaici
- Metodologie per la progettazione e il corretto inserimento di sistemi agrivoltaici in aree rurali e peri-urbane
- Strumenti GIS per la mappatura di aree idonee in contesti periurbani
- Impianto dimostratore FV flottante near-shore
- Sistemi di test non convenzionali per la caratterizzazione e il confronto di tecnologie FV innovative
- Celle a film sottile organico per applicazione in serre agricole con coperture FV
- Nuovi materiali polimerici per incapsulamento moduli FV ecoprogettati
- Prototipi di Celle a MJ adattate reticolarmente
- Prototipi di Celle a SJ metamorfiche
- Prototipi di Celle a MJ metamorfiche
- Celle 3J ottimizzate, depositate a bassa Temperatura, realizzate con maschera metallica
- Celle 4J-3T ottimizzate depositate con efficienza >30%
- Strutture Ge/Ge e Strutture III-V/Ge/Ge
- Campioni di SiGeSn
- Strutture epitassiali e tecniche per lo sviluppo di celle III-V/Si
- Prototipo dell'interfaccia EYES-on-PV per diagnostica stringhe fotovoltaiche
- Dataset di guasto con eventi di guasto etichettati, condivisi attraverso un repository pubblico di RSE (PVDatalake) <https://pvdatalake.rse-web.it/>;
- Prototipo di sistema di inseguimento solare compatto per moduli bifacciali su tetti piani di ampia dimensione
- Impianto FV bifacciale sperimentale su tetto piano a elevato albedo con sistema di inseguimento solare compatto utilizzabile su tetti piani di ampia dimensione
- Facility Guasti FV presso RSE a Milano, per lo studio delle modalità di guasto negli impianti FV, inclusi fotovoltaici flottanti e con tracker
- Setup sperimentale agrivoltaico presso Campo prove fotovoltaico di RSE a Piacenza
- Contributo a protocollo normativo di manutenzione per impianti fotovoltaici flottanti
- Metodo di valutazione per impatti socio-economici derivanti dalla realizzazione di un impianto produttivo di moduli FV in Italia e in Europa
- Elementi di sicurezza antincendio nell'esercizio degli impianti FV in green building
- Elenco delle attività di coordinamento del progetto sia fra i gruppi di ricerca RSE che fra gli affidatari, delle azioni di diffusione dei risultati ottenuti e delle collaborazioni con le aziende del settore fotovoltaico e con istituti universitari.
- Target e schema di processo di deposizione mediante Pulsed Electron Deposition di nitruri per celle fotovoltaiche a film sottile sviluppate da RSE
- Campioni di film sottili di CIGS adatti per l'utilizzo come celle bottom PSC/CIGS e come HTL per assorbitori PSC cresciuti tramite tecniche da vuoto e/o wet.
- Sospensioni stabili di nanoparticelle di CIGS (micro- o nano-cristalline) ottenute mediante reazione a stato solido via ball-milling o tecniche alternative quali hot-injection e adatti alla successiva integrazione con la sintesi delle celle a perovskite (PSC).
- Celle CIGS in cui la perovskite viene usata come (buffer layer).
- Celle composite PSC/CIGS in cui il CIGS viene incorporato nello strato assorbitore sotto forma di nanoparticelle oppure usato come hole transmitting layer (HTL) e risultati del confronto con celle PSC convenzionali.
- Realizzazione di strutture tandem PSC/CIGS interamente ottenute con tecniche da vuoto (PED-SSTA).
- Processi di produzione delle celle composite PSC/CIGS
- Produzione, mediante tecniche di deposizione tradizionali in campo DSSCs oppure innovative e facilmente industrializzabili, e caratterizzazione di almeno un DSSM 10x10 cm² con caratteristiche di interesse per la crescita di piante.
- Produzione e caratterizzazione di almeno un DSSM 10x10 cm² ottimizzato secondo i feedback ricevuti da ENEA-MUSA sulla base di una valutazione sulla crescita di particolari specie di piante poste in serra (soluzione base e soluzione ad alta sostenibilità ambientale)

- Processo di produzione e moduli DSSC di area 20x30 cm² semitrasparenti per applicazioni agrivoltaiche e caratterizzazione indoor e outdoor.
- Microsistemi fotovoltaici sperimentali e risultati dell'ottimizzazione di autoconsumo e scambio energetico ottenuti coinvolgendo gli stakeholders della CER del Campus di Parma in un progetto di citizen science. Dati resi disponibili sulla "Smart City Platform" di ENEA
- Report riportante la descrizione dello strumento basato su solutore Python open-source per il dimensionamento delle comunità energetiche caratterizzato da struttura di input/output e formulazione del problema di ottimizzazione standardizzati.
- almeno 3 prototipi di DSSCs con area 3x3 cm² realizzate con materiali e processi altamente sostenibili per applicazioni in agri-PV.
- Processo di produzione su linea pilota automatizzata di moduli DSSC di area 20x30 cm², >10 moduli prototipali e calcolo del tempo-ciclo dei macchinari
- Elenco degli eventi di disseminazione e di divulgazione scientifica, organizzati dal CNR, con uno spazio esplicitamente dedicato a questo progetto. Report sulle attività di match-making con le aziende del settore fotovoltaico e sulle nuove collaborazioni scientifiche nate all'interno del progetto

2.6 Fattibilità tecnico-scientifica

a) Fattibilità tecnico-scientifica

Il progetto, i cui obiettivi sono stati discussi nelle sezioni precedenti, si avvale delle forti competenze sul tema fotovoltaico degli affidatari, maturate anche nel contesto della ricerca di sistema elettrico, tali competenze vengono arricchite e completate da quelle messe a disposizione dai co-beneficiari. Il progetto vuole aggregare le competenze nazionali individuate, anche in settori differenti da quello dello sviluppo tecnologico del FV, per favorire un approccio multidisciplinare che promuova la conoscenza su materiali e tecnologie innovativi e che favorisca e renda ottimale la penetrazione e l'integrazione del FV in vari contesti.

Nella definizione delle attività di ricerca, che saranno dettagliate più avanti per ciascuna LA., si è tenuto conto di eventuali criticità che possono limitare il raggiungimento dei vari target previsti. Pertanto, per tutti gli studi sono state considerate tutte le possibili azioni volte a mitigare gli effetti dei possibili eventi avversi, come è possibile evincere anche dal piano di rischio associato al progetto. Si sottolinea, altresì, che l'insieme di conoscenze, esperienze e infrastrutture sperimentali disponibili all'interno della compagine coinvolta nel progetto consentirà di assicurare un'efficace conduzione del progetto e l'ottenimento dei principali obiettivi previsti nei differenti ambiti.

Il progetto è articolato in 5 work package (WP).

Il WP1 è dedicato allo sviluppo di materiali e processi che possano migliorare le prestazioni degli attuali moduli fotovoltaici o innovarli con materiali e architetture di celle solari innovativi; il WP2 è focalizzato sul monitoraggio e l'ottimizzazione degli impianti FV, il WP3 ha lo scopo di sviluppare soluzioni e metodologie per sistemi agrivoltaici e in maniera preliminare anche per impianti FV flottanti; il WP4 si occupa di valutare l'impatto economico e sociale della creazione di una filiera nazionale, fornendo strumenti analitici per quantificare gli effetti economici e occupazionali derivanti dalla realizzazione di impianti produttivi, nonché analizzare gli aspetti di sicurezza degli impianti e investigare il tema dell'ecodesign di moduli FV. Infine il quinto WP è focalizzato sulle azioni di coordinamento e di gestione del progetto, nonché di disseminazione dei risultati ottenuti.

Gli obiettivi di WP1 saranno perseguiti a partire dalle infrastrutture disponibili nei laboratori di affidatari e co-beneficiari a cui se ne affiancheranno di nuove che potranno implementare /rinnovare questa sorta di laboratorio diffuso generato dalla collaborazione all'interno del progetto. Le ipotesi di lavoro e i metodi proposti per raggiungere determinati target sono formulati tenendo conto di possibili criticità per alcuni di essi e quindi considerando la possibilità di decidere in corso d'opera di focalizzare le attività sugli approcci potenzialmente più promettenti.

Andando in maggior dettaglio nel WP, le LA da 1.1 a 1.6 saranno condotte impiegando le infrastrutture di ricerca e le conoscenze tecniche dei ricercatori RSE, eventualmente integrate dal supporto scientifico di istituti universitari. In particolare, si svilupperanno strutture epitassiali innovative con l'obiettivo di realizzare celle FV a MJ a basso costo e ad elevata efficienza, nonché dispositivi "tandem" dove il silicio è accoppiato con materiali III-V o nitruri.

Nelle LA1.7-1.20 si lavorerà allo sviluppo di celle in perovskite, celle a eterogiunzione di silicio e celle tandem perovskite/silicio, con studi che riguardano materiali assorbitori e trasportatori di carica, architetture di dispositivo, processi, caratterizzazioni e modelling. L'obiettivo è quello di ottenere buone prestazioni sulle celle a singola giunzione in perovskite, ottimizzare la cella in silicio come bottom per la tandem, utilizzando anche wafer sottili di silicio, e definire le architetture e i processi potenzialmente interessanti per un possibile trasferimento industriale delle celle tandem perovskite/Si.

Le LA1.21-LA1.22 si focalizzano sulla produzione di nuovi materiali per celle solari basate su nitruri come ad esempio ZnTiN₂.

Le LA1.23-28 si concentrano sullo sviluppo di film a base di CIGS, film di perovskite da integrare con le celle CIGS mantenendo l'integrità e ottimizzando le proprietà elettroniche e ottiche, strati trasportatori di carica per realizzare celle solari tandem perovskite/CIGS.

Saranno analizzati diversi HTL e incapsulanti per migliorare prestazioni e stabilità delle celle tandem

Gli obiettivi del WP2 riguardano l'ottimizzazione dell'energia elettrica prodotta dagli impianti FV. Questi obiettivi verranno perseguiti ad esempio mettendo a punto delle tecniche avanzate per la caratterizzazione degli impianti da testare sugli impianti FV dimostratori disponibili nel progetto (alcuni dei quali di nuova costruzione) e raccogliendo dati prestazionali utili a sviluppare algoritmi per l'anomaly detection (LA2.6-2.9). Utilizzando gli impianti dimostratori di RSE nelle sedi di Milano e Piacenza, da cui è possibile raccogliere dati di produzione e di eventi di guasto, verranno sviluppati modelli di apprendimento automatico combinati a modelli fisici del fotovoltaico, per l'identificazione ed il riconoscimento della tipologia di guasto. I dati utilizzati per lo sviluppo di tali modelli saranno inoltre resi disponibili attraverso il repository PVDatalake, già pubblicamente disponibile su Web. Verranno, altresì, condotti studi specifici su impianti FV dotati di tracker e realizzati con tecnologia bifacciale, al fine di sviluppare approcci utili all'ottimizzazione delle prestazioni energetiche di tali impianti (LA 2.1 – 2.5).

Nel WP3 verranno studiati gli aspetti che possono favorire la diffusione del FV mediante lo sviluppo di soluzioni per l'agrivoltaico e il fotovoltaico galleggiante. Nelle LA3.1 e LA3.2 saranno portati avanti lo studio, la sperimentazione e la regolamentazione di impianti agrivoltaici e fotovoltaici galleggianti avvalendosi di impianti dimostratori di RSE nelle sedi di Milano e Piacenza, nonché delle conoscenze normative sviluppate nell'ambito di collaborazioni in organismi normativi nazionali e internazionali.

Ancora in ambito agrivoltaico, verranno realizzati nuovi impianti dimostratori e ottimizzati/utilizzati quelli già disponibili per approfondire la conoscenza nei vari ambiti riconducibili al sistema agrivoltaico (energia, colture, monitoraggio, progetto multidisciplinare, accettabilità sociale, idoneità dei siti etc...) in modo da potere mettere a sistema le conoscenze necessarie per progettare in maniera sartoriale un impianto per un dato sito. Queste attività sono condotte nelle LA3.3-LA3.13 e vedono il coinvolgimento di vari co-beneficiari anche con competenze tecniche molto differenti tra loro.

Sono previsti degli studi a TRL più basso su celle solari a film sottile inorganico e moduli DSSC da utilizzare per la copertura di serre agricole, con lo scopo di valutarne il potenziale per una nuova generazione di moduli semitrasparenti (LA3.15-LA3.21).

La LA3.22 e 3.23 coinvolgono un gruppo di stakeholders della CER del Campus di Parma nella sperimentazione di microsistemi fotovoltaici "plug&play" con accumulo. La sperimentazione raccoglierà dati sull'impatto della microgenerazione e del potenziale contributo alla CER. Gli stakeholders parteciperanno tramite metodologie di citizen science e i dati raccolti verranno elaborati e resi disponibili sulla piattaforma SCP di ENEA. Le LA3.24 e 3.25 svilupperanno un algoritmo per ottimizzare la selezione dei membri di comunità energetiche, massimizzando produzione e condivisione di energia.

Il WP4 si prefigge di valutare alcuni aspetti legati alla sicurezza e sostenibilità del FV. Sarà ad esempio valutato l'impatto economico e sociale della creazione di una filiera nazionale sul fotovoltaico, mediante strumenti analitici per quantificare gli effetti economici e occupazionali derivanti dalla realizzazione di impianti produttivi di celle e moduli fotovoltaici (LA4.1-LA4.2) e saranno analizzati aspetti di sicurezza nell'esercizio degli impianti FV su edifici green (LA4.3 - LA4.5). Saranno condotti studi sullo sviluppo di polimeri avanzati per l'ecodesign di moduli (LA4.6 e LA4.7) e sulla definizione e lo sviluppo di processi sostenibili per la realizzazione di moduli DSSC (LA4.8 e LA4.13).

Il WP5 comprende le azioni di coordinamento e gestione del progetto e di diffusione e disseminazione dei risultati delle attività, anche mediante la partecipazione ai comitati nazionali ed internazionali di settore. Il WP è articolato in 6 LA dove i tre affidatari opereranno in maniera sinergica e collaborativa anche col supporto di tutti i co-beneficiari. L'azione di diffusione sarà agevolata dalla partecipazione di esperti dei tre affidatari a numerosi e rilevanti organismi nazionali e internazionali (quali, Rete Italiana per la ricerca e l'innovazione nel fotovoltaico, Associazione italiana agrivoltaico sostenibile, IEA Photovoltaic Power systems Technology Collaboration Programme, ETIP-PV, EERA JP PV).

2.7 Impatto sul sistema energetico e benefici attesi

a) Impatto e benefici sul sistema energetico

Il fotovoltaico è sicuramente la fonte energetica più importante nel processo di transizione energetica necessario per ridurre nel breve termine le emissioni di gas serra e per realizzare la decarbonizzazione del sistema energetico nazionale al minor costo possibile, in linea con gli obiettivi previsti da PNIEC, "Fit for 55%" e UE Green Deal. La produzione mondiale di elettricità da solare fotovoltaico nel 2023 è stata pari a 2.135 TWh e ha permesso di coprire circa l'8,3% della domanda globale di elettricità [IEA PVPS Trends in PV Applications 2024]. Questi numeri, sebbene ancora lontani rispetto alle tecnologie convenzionali, confermano un trend di crescita marcato anno dopo anno e confermano la grande opportunità rappresentata dalla tecnologia FV. La forte crescita del mercato FV è sostenuta principalmente dalla rilevante riduzione dei costi della tecnologia FV osservata negli ultimi anni, dal continuo incremento dell'efficienza dei moduli FV e dalla sempre maggiore consapevolezza che solo l'utilizzo delle fonti rinnovabili può consentire di affrontare i problemi legati ai cambiamenti climatici.

I principali fattori di successo della tecnologia FV sono sicuramente la modularità e la disponibilità locale: moduli fotovoltaici da alcune centinaia di watt di potenza possono essere combinati, da decine per installazioni su tetto a milioni in centrali elettriche su scala industriale, rendendo possibile la scelta dell'entità dell'investimento e la dislocazione dell'installazione.

Per sostenere le grandi potenzialità del fotovoltaico e favorirne la penetrazione nel sistema energetico nazionale, la ricerca è chiamata ad agire su vari aspetti rilevanti che vanno dallo sviluppo di nuovi materiali e dispositivi all'ottimizzazione della produzione di energia elettrica degli impianti, passando per lo studio di soluzioni che migliorino l'integrazione del FV in vari contesti e che tengano conto anche degli aspetti di sostenibilità ambientali.

Gli studi promossi in questo progetto possono, quindi, generare ricadute positive sul sistema elettrico, mediante l'acquisizione di competenze nell'ambito della scienza dei materiali, dello sviluppo di dispositivi e processi innovativi, nella definizione di soluzioni avanzate e sostenibili per l'integrazione del fotovoltaico nell'ambiente costruito, nonché in altri contesti su cui si sta focalizzando l'attenzione, quali l'agrivoltaico e il fotovoltaico galleggiante, che accanto alla produzione di energia elettrica presentano ulteriori possibili vantaggi (si riduce il consumo di suolo, si preservano risorse idriche, si opera in sinergia con altri settori, etc..)

I risultati di questo progetto forniranno benefici per il sistema elettrico italiano, come sopra descritto, ma anche rilevanti ricadute per l'industria nazionale del settore FV che vede già una variegata presenza in tutta la catena del valore, dalla cella solare agli impianti installati. Fra le attività di diffusione e condivisione dei risultati del progetto, gli affidatari di questo progetto opereranno in sinergia con altri centri di ricerca (universitari e privati) e con costruttori nell'ambito della "Rete Italiana per la ricerca, lo sviluppo e l'innovazione nel fotovoltaico" (www.reteitalianafotovoltaico.it) di cui sono promotori.

Il progetto potrà, quindi, supportare i percorsi industriali già avviati in Italia e promuovere nuove iniziative in ambito fotovoltaico, operando anche in sinergia con i progetti in corso e con le iniziative progettuali annunciate per i prossimi mesi. In questo modo sarà possibile promuovere un consistente incremento della produzione di componenti FV nonché della quota di elettricità prodotta da fotovoltaico, dando maggiore sicurezza in termini di produzione, fornitura e costo dell'elettricità, nonché di progressiva transizione verso la decarbonizzazione dell'intero sistema energetico italiano.

b) Benefici per gli utenti

La possibilità di realizzare moduli fotovoltaici ad alta efficienza può determinare una diminuzione dei costi degli impianti FV grazie alla riduzione dei costi di Balance of System, determinati in buona parte dall'area di impianto. La conseguente riduzione del costo dell'energia elettrica e la possibilità di realizzare impianti avendo a disposizione spazi limitati possono comportare un evidente beneficio per gli utenti del sistema energetico. Ovviamente bisogna tenere anche conto di eventuali extra costi di produzione di moduli più efficienti che al momento non sono facilmente valutabili, in quanto la realizzazione di celle solari innovative (tandem o a multigiunzione) non è ancora ad un livello di maturità tale da potere definire materiali e processi produttivi; solo con l'avvio delle prime linee di produzione, a valle del percorso di ricerca in corso, sarà possibile dare una stima dei costi industriali di queste nuove tecnologie FV. Al momento alcune recentissime valutazioni di NREL per moduli tandem perovskite/Si con efficienza attesa di circa il 30% indicano un prezzo sostenibile per tali moduli di circa 30\$/W, quindi superiore agli attuali prezzi dei moduli FV, prezzi che, tuttavia, secondo molti pareri non saranno sostenibili nel breve periodo neanche per il mercato cinese. È necessario quindi procedere con la ricerca speditamente affinché i vantaggi dovuti all'incremento di efficienza si traducano in entrambi i benefici attesi: risparmio di spazio e riduzione di costi degli impianti. Anche lo sviluppo di soluzioni innovative che promuovano la diffusione e l'integrazione del fotovoltaico nel sistema energetico nazionale, nonché l'ottimizzazione della gestione degli impianti FV comporteranno degli evidenti benefici per l'utente finale in quanto permetteranno un consistente incremento della produzione di elettricità da fotovoltaico, a parità di potenza installata, con conseguente riduzione del costo dell'energia prodotta (LCOE).

Nello stesso tempo il sistema energetico italiano si gioverà dei benefici correlati alla produzione diffusa di energia elettrica che permetterà di prevenire, o quanto meno limitare fortemente, le fluttuazioni dei prezzi e l'incertezza della disponibilità dell'energia elettrica che inevitabilmente sarebbero causate da materie prime importate dall'estero.

c) Previsione delle ricadute applicative

La produzione mondiale di moduli FV è cresciuta, passando da circa 20 GW/anno nel 2010 a circa 500 GW/anno nel 2023 con una localizzazione degli impianti produttivi per circa il 95% in Asia [Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE - 2024].

Recentemente in Europa sono state annunciate diverse iniziative industriali che potrebbero consentire di rilanciare l'industria fotovoltaica europea; fra queste l'iniziativa di Enel Green Power con la sua azienda 3SUN Gigafactory per la realizzazione di una fabbrica di celle e moduli a eterogiunzione di silicio da 3 GW/anno in Sicilia e quella di FuturaSun per la realizzazione di 1,4 GW/anno di moduli FV in provincia di Padova.

Attualmente la tecnologia di celle e moduli FV dominante è quella basata su celle in silicio cristallino con share del 98% ed efficienze di modulo mediamente intorno al 22%. Giacché l'efficienza record delle celle in silicio (27,3%) è molto prossima al suo limite teorico (29,4%), le celle solari tandem e le celle a multigiunzione sono ritenute la nuova frontiera dell'alta efficienza.

In quest'ottica lo studio di materiali e di processi realizzativi potenzialmente adatti per realizzare celle ad alta efficienza può determinare

un interesse di natura applicativo alle competenze conseguite in questo progetto e, nel medio/lungo termine, una prospettiva di applicazione industriale dei risultati del progetto. Ciò comporterà importanti ricadute per l'industria nazionale del settore FV che vede già un'ampia e completa presenza in tutta la catena del valore (dalla cella agli impianti installati), contribuendo a rafforzarne la presenza sul mercato nazionale e internazionale.

D'altro canto, lo sviluppo di soluzioni e di metodologie che consentano di incrementare le installazioni del FV senza incidere sul consumo di suolo - come nel caso dell'agrivoltaico e il fotovoltaico flottante - e generando anche altri vantaggi in termini di sostenibilità, possono generare delle ricadute applicative nel breve termine/medio termine consentendo di perseguire gli obiettivi del PNIEC.

Lo sviluppo poi di metodologie a basso costo per la manutenzione predittiva degli impianti FV e la resilienza agli eventi meteorologici estremi, anche con l'utilizzo di strumenti di IA, possono avere delle ricadute applicative immediate, senza bisogno di grandi investimenti infrastrutturali.

La diffusione dei risultati scientifici di questo progetto, verso Organismi istituzionali, Enti di ricerca, Università, Industria e utenti finali - anche giovandosi della proficua interazione generata dalla "Rete Italiana per la ricerca, lo sviluppo e l'innovazione nel fotovoltaico" - sarà un importante tassello per promuovere un utilizzo futuro dei risultati conseguiti in questo progetto.

2.8 Verifica dell'esito del progetto

a) Oggetti e documentazione dei risultati finali

La verifica dei risultati finali per quanto concerne lo sviluppo di materiali e dispositivi FV potrà avvenire presso i laboratori e le sedi delle attività degli affidatari e dei co-beneficiari, dove potranno essere visionate le varie attrezzature utilizzate per la fabbricazione di materiali e dispositivi, i campioni di materiali/dispositivi realizzati e i dati delle misure o simulazioni effettuate. In particolare, per le celle e i moduli FV prototipali, potranno essere ripetute le misure di caratterizzazione, tipicamente utilizzate per valutarne l'efficienza (misure di curva caratteristica I-V, misure di risposta spettrale) e la funzionalità (ad esempio dimostrazione dell'esercizio).

Per quanto riguarda i vari dimostratori, gli applicativi software, i prototipi e le metodologie sviluppate, potranno essere visionati e/o testati nei siti dove è avvenuta la loro installazione e/o eseguito lo sviluppo.

La verifica finale dei rapporti tecnici (di cui almeno uno sarà prodotto da ciascuna LA del progetto) potrà, invece, essere effettuata accertandosi che i risultati descritti soddisfino le aspettative, dimostrando il raggiungimento degli obiettivi indicati in sede di ammissibilità del progetto (come riportato nelle sezioni dedicate nelle singole LA del progetto).

In particolare:

- i rapporti tecnici, così come i prodotti editoriali elencati nella Tabella specifica, saranno allegati al consuntivo tecnico di LA prodotto in occasione del SAL;
- rapporti tecnici, prodotti editoriali e altri prodotti di LA elencati nella Tabella saranno resi disponibili da ENEA, RSE e CNR attraverso i propri siti web, dove ciascun affidatario pubblicherà i propri prodotti dopo l'approvazione di MASE e CSEA.