

PIANO TRIENNALE DI REALIZZAZIONE 2022-2024 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 ad alta efficienza

- Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile [ENEA]
- Consiglio Nazionale delle Ricerche [CNR]
- Ricerca sul Sistema Energetico [RSE]
- Politecnico di Bari [POLIBA]
- Sapienza Università di Roma - Dipartimenti di Chimica [UNIROMA1 CHIM]
- Sapienza Università di Roma - Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Elettronica e Telecomunicazioni [UNIROMA1 DIET]
- Università degli Studi della Basilicata - Scuola di Ingegneria [UNIBAS]
- Università degli Studi della Campania Luigi Vanvitelli - Dipartimento di Architettura e Disegno Industriale [UNICAMPANIA]
- Università degli Studi di Bari "Aldo Moro" - Dipartimento di Scienze del Suolo, della Pianta e degli Alimenti (DiSSPA) [UNIBA]
- Università degli Studi di Genova - Dipartimento di Fisica [UNIGE]
- Università degli Studi di Milano Bicocca - Scienza dei Materiali [UNIMIB]
- 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 Fisica "Ettore Pancini" [UNINA DF]
- 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" - Scienze Chimiche [UNINA SC]
- 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 Padova [UNIPD]
- Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" [UNIROMA2]
- Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" [UNIROMA2]
- Università degli Studi di Torino - Dipartimento di Chimica [UNITO]

Durata del progetto: 36 mesi

Costo proposto: 16.950.000,00 €

2. DATI GENERALI DEL PROGETTO

2.1 Dati progetto

Titolo del progetto

Progetto Integrato Fotovoltaico ad alta efficienza

Durata del progetto

36 mesi

2.2 Descrizione progetto

Abstract del progetto

Il solare fotovoltaico (FV), per la grandissima abbondanza della fonte, la bassa emissione di CO₂ sul ciclo di vita, la modularità ed il costo di produzione (ormai competitivo con le fonti energetiche basate su combustibili fossili), si propone come protagonista assoluto nello sviluppo di un sistema elettrico de-carbonizzato che permetta di contrastare i cambiamenti climatici.

Lo sviluppo di tecnologie FV di nuova generazione può offrire soluzioni innovative all'utente finale, nuove possibilità all'industria nazionale del settore ed è di fondamentale importanza per raggiungere i target nazionali fissati dal PNIEC che prevedono 52 GW di potenza fotovoltaica installata al 2030 e una generazione annua di 73 TWh. Inoltre, tenendo conto degli obiettivi ancora più ambiziosi del pacchetto sul cambiamento climatico dell'UE "Fit for 55", si prevede per l'Italia di raggiungere 64 GW di potenza fotovoltaica installata al 2030 e una generazione annua di 88 TWh. Tali obiettivi potranno essere raggiunti aumentando l'efficienza di generazione elettrica dei moduli FV, valutando nuove soluzioni che favoriscano la penetrazione del FV nel sistema elettrico e sviluppando metodologie innovative per ottimizzare la gestione di impianti FV, contribuendo così a massimizzare la produzione di energia elettrica da solare fotovoltaico. Questo progetto integrato prevede lo sviluppo di materiali, architetture di celle solari e processi di realizzazione che consentano di ottenere celle fotovoltaiche ad alta efficienza con prospettive di ricaduta industriale.

Saranno studiati materiali e processi che possano migliorare le attuali prestazioni delle celle solari ad eterogiunzione di silicio, con differenti prospettive temporali di applicazione dei risultati. Saranno, ad esempio, studiati film a base di silicio più trasparenti di quelli attualmente impiegati nelle celle solari in silicio, cresciuti con sistemi di deposizione prossimi a quelli in uso nella produzione industriale, e analizzati nuovi materiali depositati con tecniche innovative per una prospettiva di medio/lungo termine. Saranno sviluppate celle solari a film sottile di perovskite considerando processi di fabbricazione scalabili, ecosostenibili e/o la possibilità di depositare i materiali in ambienti meno controllati rispetto alle Glove Box, utilizzate attualmente per ottenere le migliori prestazioni. Le celle in perovskite saranno anche utilizzate, adattandole in maniera opportuna, per realizzare celle tandem in combinazione col silicio (perovskite/silicio) o con film sottili di CIGS (perovskite/CIGS); in quest'ultimo caso è prevista la sperimentazione su celle solari in CIGS adatte per essere impiegate in dispositivi tandem. Saranno, inoltre, eseguiti studi sul possibile utilizzo di altri materiali semiconduttori, quali materiali dei composti III-V e film sottili di nitruro (Zn-IV-N₂), per essere inseriti nella componente frontale di una cella tandem in accoppiamento col silicio. Per le architetture di dispositivo tandem che presenteranno un rilevante grado di sviluppo all'interno del progetto, sarà studiata la possibilità di scalare i dispositivi su dimensioni idonee per un possibile trasferimento industriale.

Saranno, poi, sviluppate celle a concentrazione solare (CPV) a singola e a multigiunzione, adottando soluzioni che consentano di ridurre i costi di realizzazione. In particolare, si effettueranno studi di nuove strutture di celle fino a 4 giunzioni basate sui composti III-V e IV della tavola periodica, a 3 terminali, per la media e alta concentrazione.

E', inoltre, previsto lo sviluppo di moduli ibridi FV/CPV (da utilizzare in siti che non dispongono di elevate quantità di radiazione solare diretta annuale) dotati di un sistema di inseguimento solare integrato e saranno valutati nuovi metodi per la misura di tali moduli. Si prevede, inoltre, di identificare nuove configurazioni e nuovi materiali da utilizzare per le ottiche al fine di ridurre l'ingombro e il peso dei moduli CPV e ibridi FV/CPV.

Saranno, altresì, condotti studi di Life Cycle Assessment (LCA) che riguarderanno le tecnologie/soluzioni FV consolidate ed emergenti. Nell'ottica di promuovere soluzioni applicative che favoriscano la diffusione del FV, saranno studiate soluzioni per l'agrivoltaico sostenibile e dispositivi che possano essere utili ad una nuova generazione di moduli FV per l'integrazione negli edifici (BIPV). In quest'ultimo ambito saranno sviluppati moduli DSSC (Dye Sensitized Solar Cells), a partire dai risultati del triennio precedente e integrando nuovi materiali in grado di aumentare la stabilità nel tempo di questa tipologia di dispositivi e, in parallelo, si lavorerà all'ingegnerizzazione e allo scale-up del processo di produzione.

Per quanto riguarda il tema dell'agrivoltaico, saranno messe a punto, con un approccio multidisciplinare, metodologie utili a stabilire indicatori e metriche relativi ai sistemi agrivoltaici che possano supportare gli operatori del settore, in relazione ai differenti elementi da considerare (energia, agricoltura, sostenibilità ambientale e integrazione nel paesaggio). Tali metodologie saranno sviluppate a partire dai dati sperimentali che saranno raccolti ed elaborati sugli impianti agrivoltaici esistenti e su quelli di nuovi impianti, tra i quali ci saranno due dimostratori realizzati all'interno del progetto. 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 inorganici, che trasmettano la radiazione solare necessaria alla crescita delle piante e utilizzino il resto dello spettro solare per la generazione elettrica.

Una parte del progetto riguarda lo sviluppo di metodologie e strumenti spazialmente basati in grado di identificare le aree idonee e valutare il potenziale di energia solare per il fotovoltaico, anche caratterizzando la distribuzione spettrale della radiazione solare in differenti siti che influisce sul rendimento di varie tecnologie FV. Saranno, inoltre, sperimentate nuove soluzioni per la gestione di impianti fotovoltaici, con applicazione di metodologie di O&M digitale, ricorrendo sia al monitoraggio avanzato, tramite l'individuazione e la diagnosi di malfunzionamenti, sia alla previsione della produzione energetica a diverse scale temporali, mediante tecniche innovative. Infine, si parteciperà alle azioni di organismi o comitati normativi nazionali o internazionali con l'intento di redigere norme, linee guida, best practice che tengano conto anche dei risultati ottenuti dalla ricerca condotta in questo progetto. Gli stessi risultati saranno valorizzati disseminando/diffondendo la conoscenza verso un vasto pubblico costituito da ricercatori, esperti e operatori del settore FV, policy makers e semplici cittadini.

Abstract del progetto ENG

Solar photovoltaics (PV), due to the great abundance of the source, the low CO₂ emissions over the life cycle, the modularity and the production cost (now competitive with energy sources based on fossil fuels), is proposed as the absolute protagonist in the development of a de-carbonised electricity system that will allow to combat climate change.

The development of new generation PV technologies can offer innovative solutions to the end users, new possibilities to the national industries and is fundamental for reaching the national targets set by the PNIEC (the Italian NECP, National Energy and Climate Plan) which foresee reaching 52 GW of installed photovoltaic capacity by 2030 and an annual generation of 73 TWh. Furthermore, taking into account the even more ambitious objectives of the EU's "Fit for 55" climate change package, Italy is expected to reach 64 GW of installed photovoltaic capacity by 2030 and an annual generation of 88 TWh. These objectives can be achieved by increasing the electricity generation efficiency of the PV modules, evaluating new solutions that can promote the penetration of PV into the electricity system, and developing innovative methodologies to optimize the management of PV plants, thus helping to maximize the production of electricity from photovoltaics.

The integrated project envisages the development of materials, solar cell architectures and manufacturing processes that allow for the production of high-efficiency photovoltaic cells with prospects for industrial impact.

In particular, materials and processes that can improve the current performance of silicon heterojunction solar cells will be studied, with different time perspectives for the application of the results. For example, silicon-based films more transparent than those currently used in silicon cells will be studied, grown with deposition systems similar to those used in industrial production, and new materials deposited with innovative techniques will be analyzed for a medium/long term perspective. Thin-film perovskite solar cells will be developed considering scalable, eco-sustainable manufacturing processes and/or the possibility of depositing materials in less controlled environments than the Glove Boxes, currently used to obtain the best performance. Perovskite cells will also be used to realize tandem cells in combination with silicon (perovskite/silicon) or with CIGS thin films (perovskite/CIGS); in the latter case, CIGS solar cells suitable for their use in tandem devices will also be investigated. Studies on the possible use of other semiconductor materials, such as III-V compound materials and nitride thin films (Zn-IV-N₂), to be used in the frontal component of a tandem cell coupled with silicon will also be carried out. For the tandem device architectures that will present a promising development within the project, the possibility of scaling the devices to dimensions suitable for a possible industrial transfer will be studied.

Concentrating solar cells (CPV), single and multi-junctions, will also be developed, adopting solutions that make it possible to reduce their fabrication costs. In particular, new cell architectures up to 4-junctions, based on compounds III-V and IV of the periodic table, for medium and high concentrations, will be studied.

Furthermore, PV/CPV hybrid modules, equipped with an integrated solar tracking system, to be used in sites that do not have high amounts of annual direct solar radiation, will be developed and new methods for measuring these modules will be evaluated. New configurations and new materials to be used for the optics will also be identified in order to reduce the size and weight of the CPV and PV/CPV-hybrid modules.

In addition, Life Cycle Assessment (LCA) studies will be carried out covering established and emerging PV technologies/solutions. With a view to promoting applications that can favor the diffusion of PV, solutions for sustainable agrivoltaics and devices that can be useful for a new generation of PV modules for integration into buildings (BIPV) will be studied. DSSC (Dye Sensitized Solar Cells) modules will be developed, starting from the results of the previous project and integrating new materials able to improve the stability of this type of device and, in parallel, we will work on the engineering and scale-up of the production processes.

As for the agrivoltaics, using a multidisciplinary approach, methodologies will be developed that can be useful for establishing indicators and metrics related to agrivoltaic systems that can support sector operators, in relation to the different elements to be considered (energy, agriculture, environmental sustainability and integration into the landscape). These methodologies will be developed starting from the experimental data that will be collected and processed on existing agrivoltaic plants and on those of new plants, among which there will be two demonstrators built within the project. Furthermore, studies on the growth of plants in greenhouses with semi-transparent photovoltaic roofs will be carried out with approaches on different scales. In particular, at the laboratory scale we will study innovative solar cells based on organic or inorganic thin films, which transmit the solar radiation necessary for plant growth and use

the rest of the solar spectrum for electricity generation.

A part of the project concerns the development of tools and spatially-based methodologies able to identify suitable areas and assess the solar energy potential for utility-scale PV, building-integrated PV and agrivoltaics. Furthermore, new solutions for the management of photovoltaic systems will be tested, with the application of digital O&M methodologies, considering both advanced monitoring, through the identification and diagnosis of malfunctions, and forecasting of energy production at different time scales, through innovative techniques.

Finally, we will participate in the actions of national or international regulatory bodies or committees with the aim of drafting standards, guidelines, best practices that also take into account the results obtained from the research conducted in this project. The same results will be exploited by disseminating knowledge to a vast audience made up of researchers, PV experts and operators, policy makers and ordinary citizens.

2.3 TRL progetto

TRL iniziale: 3

TRL finale: 7

Non si può definire un TRL complessivo di progetto in quanto, in ragione della specifica natura delle attività condotte, si lavora su aspetti che hanno un differente grado di maturità. I valori indicati costituiscono quelli minimi e massimi presenti nel progetto.

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

La ricerca sullo sviluppo di tecnologie fotovoltaiche innovative e ad alta efficienza negli ultimi anni ha registrato grandi progressi e in alcuni casi sono stati ottenuti valori di efficienze prossimi ai limiti teorici valutati per la tecnologia associata. È questo, ad esempio, il caso delle celle a singola giunzione in silicio cristallino (limite teorico di efficienza calcolato per tale dispositivo di poco inferiore al 30%) per le quali è stato ottenuto a novembre 2022 un record di efficienza pari a 26,81% misurato su un wafer di c-Si intero sul quale è stata realizzata una eterogiunzione di silicio [<https://www.longi.com/en/news/propelling-the-transformation/>]. Questo risultato è frutto delle ricerche in corso presso vari istituti di ricerca nel mondo [<https://doi.org/10.1038/s41578-022-00423-2>] volte ad ottimizzare l'utilizzo della luce nella cella in silicio, agendo in particolare sugli strati di materiali non deputati ad assorbire la radiazione solare e gli strati antiriflesso. Questi temi saranno tra gli oggetti della ricerca proposta nel progetto per avanzare soluzioni in termini di materiali e processi realizzativi con ricadute industriali nel breve/medio termine. Anche la tecnologia FV a base di film sottili di perovskite ha fatto enormi progressi, raggiungendo un'efficienza record pari a 25,7% (area 0,096 cm²) [<https://doi.org/10.1002/pip.3595>]. I valori record in questo caso riguardano dispositivi di piccolissima area e si riferiscono ad efficienze iniziali, inoltre le migliori prestazioni sono realizzate in atmosfera inerte, all'interno di glove box. Gli sforzi della ricerca in questo settore sono focalizzati sullo studio di processi di fabbricazione che consentano di scalare la tecnologia e di realizzarla in ambienti più vicini a quelli tipicamente utilizzati nei processi produttivi, valutando anche la possibilità di rendere più ecosostenibili i processi.

L'architettura di cella solare cosiddetta tandem, che utilizza due materiali assorbitori deputati ognuno ad assorbire la radiazione nella finestra spettrale più appropriata, consente di ottenere dispositivi ad alta efficienza e presenta una limitata complessità che, quindi, può determinarne uno sviluppo industriale. Combinando la perovskite col silicio nel mese di dicembre 2022, l'Helmoltz Zentrum Berlin (HZB – Germania) ha realizzato una cella tandem monolitica perovskite/silicio a due terminali con efficienza record pari a 32,5% [https://www.helmholtz-berlin.de/pubbin/news_seite?nid=24348;sprache=en], risultato ottenuto grazie ad una intensa ricerca svolta in diversi contesti nazionali ed internazionali e che in parallelo guarda alle potenziali prospettive industriali delle celle tandem finora realizzate per lo più su area dell'ordine del cm² [<https://actu.epfl.ch/news/two-new-world-records-on-perovskitesilicon-tandem-2/>; <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.01.015>]. Interessanti risultati sono stati ottenuti negli ultimi anni anche combinando una cella posteriore in silicio con una cella frontale realizzata con materiali III-V, (efficienza pari a 32,8% misurata su una struttura GaAs/Si a 4 terminali in cui le sue celle sono connesse meccanicamente) oppure accoppiando la perovskite con una cella bottom in CIGS (migliore efficienza pari a 24,2%) [<https://doi.org/10.1002/pip.3646>]. Il progetto, partendo dalle competenze su differenti materiali assorbitori,

prevede sia lo sviluppo di dispositivi tandem ad alta efficienza, che avvicinino lo stato dell'arte nazionale a quello mondiale, sia, laddove il livello di sviluppo lo consenta, lo studio dello scale-up della relativa tecnologia.

Nello sviluppo delle celle a multigiunzione (MJ) per applicazione in moduli a concentrazione solare (CPV), ad oggi l'approccio monolitico incontra la difficoltà di dover abbinare materiali con diverse costanti reticolari e conseguentemente dover ridurre i difetti provocati dalla differenza fra esse. Si rende necessario pertanto introdurre, fra i diversi materiali assorbitori della cella MJ, sequenze complesse di altrettanti strati di materiali diversi, prolungando così i tempi del processo di deposizione ed il suo costo [<https://doi.org/10.1038/s41560-020-0598-5>]. A livello teorico, potrebbero essere realizzate celle a 4 giunzioni (4J) che utilizzano materiali con la medesima costante reticolare abbinando i materiali III-V, come il GaAs e l'InGaP con quelli del gruppo IV, come il Ge, SiGe e SiGeSn; però ad oggi, le strutture di cella a 4J non sono state ancora realizzate nella medesima camera di crescita per i problemi di "cross contamination" fra gli elementi dei gruppi III-V e del gruppo IV [<https://doi.org/10.3390/ma14051066>]. Recenti studi sulle celle MJ a 3 terminali con struttura a transistor [<https://doi.org/10.1109/PVSC40753.2019.8980563>] hanno mostrato rilevanti risultati, utilizzando l'approccio monolitico.

Per quanto riguarda lo sviluppo di ottiche innovative per la concentrazione solare, è stato recentemente sviluppato un modulo ibrido FV/CPV (cioè costituiti sia da celle FV non a concentrazione che da celle CPV a concentrazione) con inseguimento solare interno dotato di movimentazione planare (2D), la cui ottica risulta però relativamente spessa e complessa. Lo sviluppo di tali moduli ibridi è ancora ad un livello molto "embrionale", dal momento che vi è una sola azienda (Svizzera) che ha avviato la produzione (ma non la commercializzazione) di prototipi. L'interesse verso questa tipologia di moduli è comunque molto elevato per i vari ambiti di applicazione e per i livelli di produzione raggiungibili. Riguardo i materiali ottici leggeri, utilizzabili per l'alta concentrazione, esistono soluzioni di dimensioni estremamente ridotte [<https://doi.org/10.1109/PVSC40753.2019.8980963>].

In merito alle nuove applicazioni del fotovoltaico, per favorirne l'introduzione nel sistema energetico nazionale, la tecnologia dell'agrivoltaico sta riscuotendo interesse via via crescente nel settore fotovoltaico e in quello agrario [<https://2020.agrivoltaics-conference.org/home.html>]. In Italia, attualmente sono installati parchi agrivoltaici di medie dimensioni (1 - 3 MW) caratterizzati da un'altezza dei moduli tale da consentire la coltivazione nell'area sottostante. Si registrano esperienze in vari paesi (Francia, India, Belgio, USA, Giappone e Germania) e si registrano alcuni studi riguardanti l'accettabilità sociale dei sistemi agrivoltaici e la loro integrazione paesaggistica (ENEA e REM Tec). In questo contesto appare estremamente rilevante disporre di dati sperimentali provenienti da impianti pilota utili a definire metodologie di approccio alla realizzazione di sistemi agrivoltaici. Appare, inoltre, interessante lo studio di dispositivi fotovoltaici innovativi a film sottile che possano trasmettere una parte della radiazione luminosa necessaria alla crescita delle piante.

Gli studi per l'ottimizzazione dell'energia generata da impianti fotovoltaici necessitano di misure della radiazione solare nelle componenti diretta, diffusa e spettrale, che risultano di grande utilità per caratterizzare i siti idonei all'installazione di diverse tipologie di FV, e coinvolgono anche tecnologie geospaziali (e.g. GIS- Geographical Information System, GeoAI-Geographical Artificial Intelligence, telerilevamento, site suitability, GIS- Multicriteria Decision Analysis, etc.). Queste ultime tecnologie stanno trovando, in tempi recenti, largo impiego nella identificazione dei siti idonei al fotovoltaico integrato (e.g. BIPV, agrivoltaico), nonché nella valutazione del potenziale solare fotovoltaico. E', quindi, necessario sviluppare strumenti e sistemi integrati GIS-based capaci di supportare le politiche energetiche nazionali e locali (e.g. catasti di energia solare fotovoltaica, mappe di site suitability) nonché chi intende investire risorse nel settore, tenendo in conto anche l'integrazione e la sostenibilità territoriale e ambientale dello sviluppo e diffusione del fotovoltaico integrato. È altresì riconosciuto necessario lo sviluppo di sistemi di gestione avanzata di impianti FV, con impiego di algoritmi di rilevamento e diagnosi dei guasti che, utilizzando tecniche di Machine Learning, forniscano un rilevante supporto alle attività di O&M. Lo studio di soluzioni e algoritmi di diagnostica avanzata, a supporto dell'O&M digitale degli impianti fotovoltaici (soprattutto di grossa taglia), è attualmente oggetto di approfondimenti a livello europeo nell'ambito di progetti di ricerca finanziati dal programma quadro H2020. È tuttavia necessario, per ottenere algoritmi affidabili di diagnostica guasti, disporre di grandi quantità di dati di impianti FV per il loro addestramento e validazione. La gestione ottimale comprende anche una previsione accurata della produzione, ma, mentre sono disponibili metodi previsionali per impianti FV con moduli monofacciali, la ricerca è immatura circa i metodi previsionali per impianti ad inseguimento con moduli bifacciali.

b) Attività svolte nel triennio precedente

Le attività di ENEA hanno avuto la finalità di sviluppare celle solari ad alta efficienza, materiali innovativi (perovskiti, kesteriti, grafene) per applicazioni fotovoltaiche, architetture di dispositivo e sistemi fotovoltaici da utilizzare in contesti particolari (BIPV, agrivoltaico). Sono state sviluppate celle in perovskite, studiando i vari materiali del dispositivo (assorbitori e trasportatori di carica), i processi di realizzazione delle celle, le interfacce tra i vari strati, con particolare attenzione a possibili strategie per migliorare la stabilità termica e sotto illuminazione dei dispositivi. Sono state realizzate celle in perovskite di piccola area (<cm²) con varie architetture/materiali, sviluppando anche processi che possono consentire una riduzione dei rifiuti tossici e della materia prima utilizzata. Scalando su aree maggiori, sono stati realizzati prototipi di moduli FV in perovskite su substrati 15 x 15 cm² semitrasparenti e opachi, ottenendo per quest'ultima tipologia di moduli un'efficienza massima di circa il 16%.

Sono stati studiati i materiali (strati passivanti, trasportatori di carica, ossidi trasparenti e conduttori) e i relativi processi da utilizzare per

realizzare celle ad eterogiunzione di silicio con lo scopo di migliorare il rapporto efficienza/costo, ridurre il consumo di materie prime e rendere più sicuri i processi industriali. È stato, anche, realizzato un prototipo di macchina per testurizzare, mediante hot embossing, vetri per moduli FV di differente concezione rispetto agli attuali, dove cioè si possano utilizzare celle in silicio su wafer flat e vetri rugosi, evitando così i rifiuti derivanti dai processi chimici utilizzati per il texturing dei wafer di silicio.

Le celle in silicio sono state combinate con film di kesterite o perovskite per realizzare celle solari tandem ad alta efficienza, sperimentando differenti schemi di collegamento e materiali. In particolare, per le celle tandem perovskite/silicio è stata misurata un'efficienza massima superiore al 27%.

Al fine di studiare l'uso complementare integrato della luce solare per fotovoltaico e fotosintesi, sono state studiate strutture semitrasparenti a film sottile di silicio spettralmente selettive (area 100 cm²) e sono state realizzate due serre con copertura fotovoltaica di media (circa 18m²) e grande dimensione (110 m²) con moduli FV in fase preliminare di commercializzazione, nel primo caso, e opportunamente progettati, nel secondo caso.

Nel triennio precedente 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 Risposta Spettrale ed 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 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, è stata realizzata presso la sede RSE di Milano la Facility Guasti FV (un setup sperimentale di impianti su cui è possibile riprodurre i principali tipi di guasto che possono verificarsi negli impianti fotovoltaici); in tale Facility sono stati caratterizzati le prima tipologie di guasto e, sulla base dei dati acquisiti, è stato avviato lo sviluppo di un algoritmo di identificazione e di diagnosi dei guasti.

Nell'ambito del progetto del CNR, nel triennio precedente sono stati sviluppati due filoni di attività collegati dal comune denominatore dello sviluppo di tecniche di deposizione a stampa per la realizzazione delle celle fotovoltaiche a film sottile sia ibride che inorganiche.

Il primo dei due filoni, quello dedicato allo sviluppo di celle a base di CIGS a partire da inchiostri ottenuti mediante sintesi mecano-chimica, è confluito successivamente nel progetto FOURIER, finanziato nell'ambito del bando di tipo-B di RdS. La tecnologia, infatti, è risultata essere compatibile con il processo di stampa ad aerosol messo a punto dal capofila industriale di FOURIER che sta ora lavorando, insieme al CNR, all'applicazione industriale del nuovo processo combinato.

I risultati del secondo filone di attività, invece, si innestano logicamente e consequenzialmente nelle sperimentazioni proposte del presente triennio. Nel triennio precedente sono state, infatti, studiate e sviluppate soluzioni tecnologiche concepite per ridurre i costi e rilanciare la produzione su scala industriale di moduli DSSC a stato solido, pensando soprattutto ad applicazioni nel settore del fotovoltaico integrato negli edifici.

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 che operino sia in condizioni standard che con luce concentrata.

Per quanto riguarda le celle solari che operano in condizioni standard, saranno sviluppate celle in perovskite al fine di promuovere questa tecnologia FV a film sottile innovativa, realizzando anche prototipi di modulo, e di utilizzare il materiale assorbitore in perovskite in accoppiamento con il CIGS e con il silicio per celle tandem del tipo rispettivamente perovskite/CIGS (dispositivo tandem che viene studiato per la prima volta in questo piano triennale) e perovskite/Si (in questo caso si parte dai risultati del precedente triennio e si vuole anche indagare la possibilità di scalare la tecnologia). Lo studio di celle tandem sarà supportato e svolto in parallelo ad attività di sviluppo di celle a singola giunzione in CIGS e a eterogiunzione di silicio (SHJ), valutando innovazioni rispetto agli attuali processi produttivi e sperimentando nuovi materiali e/o processi utili ad una ricerca di più ampio respiro su tali tecnologie FV. Si intende, inoltre, esaminare metodi per l'integrazione di nuovi materiali (composti III-V e film sottili di nitruri Zn-IV-N₂) col silicio, sempre con la finalità di realizzare celle solari tandem, partendo dalle competenze già acquisite nel caso dei composti III-V ed effettuando indagini preliminari nel caso dei nitruri.

Per quanto riguarda lo sviluppo di celle a multigiunzione (MJ) e, partendo dall'attività di simulazione, saranno sviluppate nuove strutture di dispositivo basate sui composti III-V e IV a 3 terminali per la media e alta concentrazione, valutando vari aspetti, tra cui

l'assottigliamento e il riciclaggio del substrato delle celle, l'utilizzo di coating antiriflettenti e di griglie metalliche appropriate. Partendo dalle attività svolte nel precedente triennio, saranno sviluppati moduli ibridi FV/CPV per varie applicazioni, sia di piccola che di grande taglia, tramite l'adozione di una movimentazione planare delle celle CPV con attuatori a memoria di forma e ottica innovativa, che li renderanno più compatti e utilizzabili senza inseguitori solari molto precisi. Sul fronte delle ottiche saranno identificate nuove configurazioni e nuovi materiali per ridurre l'ingombro e il peso dei moduli CPV e ibridi CPV/PV, mentre si implementeranno nuovi metodi di misura delle performance dei moduli ibridi, contribuendo alla stesura di nuovi standard in ambito IEC.

In continuità col triennio precedente verrà portato a compimento anche il percorso di sviluppo di un processo di produzione di moduli DSSC basato su tecniche di inkjet printing e della sua implementazione in una linea pilota di produzione esistente. Obiettivo fondamentale in questo triennio, propedeutico alla fase di trasferimento in linea di produzione, è migliorare la stabilità e la vita media dei moduli DSSC ottenuti mediante il nuovo processo. A questo fine si agirà sugli step di processo in cui sono stati evidenziati i principali meccanismi di degrado dei moduli. In particolare, verranno sperimentati e adottati elettroliti innovativi, nuovi coloranti ad alta stabilità e sigillanti inorganici in sostituzioni di quelli polimerici.

Gli studi previsti sulle varie tecnologie 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. Saranno, inoltre, condotti studi di LCA che riguarderanno tecnologie FV consolidate ed emergenti.

In questo triennio viene impostato per la prima volta uno studio rilevante sul tema dell'agrivoltaico (nello scorso triennio erano stati avviati studi molto preliminari), 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). Il lavoro sarà condotto su differenti scale: (1) su scala di laboratorio (piccola area), saranno studiate celle a film sottile organico e inorganico capaci di filtrare una parte della luce necessaria alle piante e di assorbire il resto della radiazione per convertirla in energia elettrica, (2) su larga scala sarà studiata la crescita di piante all'interno di serre con coperture fotovoltaiche prototipali realizzate nello scorso triennio con moduli innovativi e saranno realizzati due dimostratori di impianto agrivoltaico (a Scalea e a Piacenza), che andranno ad aggiungersi ad alcuni impianti già esistenti i cui dati saranno utili agli scopi del progetto. Le attività proposte hanno la finalità di mettere a punto metodologie basate su dati sperimentali utili a stabilire indicatori e metriche relativi alla sostenibilità complessiva dei sistemi agrivoltaici. In correlazione con queste attività, si promuoverà la stesura di documenti normativi sul tema dell'agrivoltaico, adottando definizioni e parametri necessari a identificare caratteristiche e qualità degli impianti agrivoltaici, condivisi con gli operatori di settore. Le azioni previste potranno contribuire a promuovere lo sviluppo di sistemi agrivoltaici che potranno attrarre nuove imprese, mettendo a disposizione di metodologie (e.g. protocolli di monitoraggio, dati sulla produttività del sottosistema agricolo) e dati confrontabili, di supporto agli operatori del settore (sviluppatori, progettisti, normatori e decisori).

Si lavorerà allo sviluppo di metodologie per la mappatura, il monitoraggio e l'ottimizzazione della produzione energetica di impianti FV, utilizzando, accanto ad attività già impostate nel precedente triennio, nuovi approcci che possono ampliare le competenze e determinare nuovi sviluppi applicativi alle attività. Ad esempio, la valutazione del potenziale fotovoltaico sul territorio nazionale potrà essere effettuata tramite misure della radiazione solare (nelle componenti diretta e diffusa, nonché nella distribuzione spettrale), caratterizzazione dei siti idonei all'installazione delle diverse tipologie FV e validazione di metodi di stima indiretta o di previsione della produzione delle nuove tipologie FV. Saranno, anche, utilizzati strumenti spazialmente basati (sistema GIS-based) che permettano di identificare i siti maggiormente idonei per l'installazione di fotovoltaico sia in contesti urbani che in ambito agrivoltaico, consentendo in quest'ultimo caso di fornire una valutazione integrata degli impatti potenziali che gli impianti agrivoltaici possono determinare sul paesaggio circostante e sui livelli di servizi ecosistemici.

Lo sviluppo di nuove soluzioni per la gestione (O&M) di impianti fotovoltaici con l'impiego di tecniche avanzate di monitoraggio basati su algoritmi di riconoscimento delle principali condizioni di guasto o basati sull'utilizzo di componenti spaziali e concetti di similitudine tra impianti per generare informazioni rilevanti al fine di riconoscere tempestivamente anomalie nel comportamento di impianti FV contribuirà a rendere la manutenzione degli stessi impianti più efficiente e meno onerosa. Queste attività saranno supportate anche dai dati sperimentali raccolti nel dimostratore costituito dalla Test Facility di guasti FV realizzata nella sede di RSE a Milano e si avvarranno dell'elaborazione di sistemi predittivi della produzione di impianti innovativi, quali quelli basati su tecnologia bifacciale e/o dotati di inseguitori orizzontali mono-assiali, fra cui quelli installati nel dimostratore FV di 260 kW nella sede di RSE a Piacenza.

A fare da collettore e da vetrina delle tecnologie sviluppate in questo progetto e dei risultati più importanti contribuirà anche il "laboratorio aperto" che verrà realizzato a Parma, presso la sede del CNR che ospiterà un nuovo impianto fotovoltaico suddiviso in tre sezioni, una integrata negli edifici che ospitano i laboratori di ricerca, una a copertura dei parcheggi e una dedicata ad un impianto agrivoltaico sperimentale. Il laboratorio aperto è stato concepito per due scopi principali: da un lato sarà la sede in cui le nuove soluzioni tecnologiche sviluppate in questo progetto verranno sperimentate nel contesto della futura Comunità Energetica Pilota del Campus di Parma, dall'altro costituirà una vetrina interattiva aperta al pubblico in cui sarà possibile vedere in funzione, in tempo reale, i prodotti fotovoltaici del futuro e partecipare interattivamente ad alcuni esperimenti.

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 e la gestione degli

impianti FV, 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

I principali progetti, a cui le attività previste nel progetto sono collegate in maniera sinergica, sono di seguito indicati.

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 del Piano triennale 2019-2021 della ricerca di sistema elettrico nazionale, Periodo: 2023-2026. GoPV è 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 (Monitoraggio e gestione Avanzata in Rete di impianti fotovoltaici), Bando: Fondo per la Crescita Sostenibile - Accordi per l'innovazione - Periodo: 2023-2026]. MARTA è coordinato dall'azienda TeaTek e vede 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. Il progetto è 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.

RdS - Pro2.3 - Evoluzione, pianificazione, programmazione ed esercizio delle reti elettriche [MASE PTR 2022-2024], coordinato da RSE. Supporto alle istituzioni nell'ambito delle attività regolamentarie sugli impianti agrivoltaici e, in genere, sulle applicazioni del fotovoltaico nel sistema energetico nazionale.

RdS - Pro2.5 - Energia da fonti rinnovabili e integrazione nel territorio [MASE PTR 2022-2024], coordinato da RSE.

I dati osservativi, acquisiti ed archiviati nell'ambito del progetto integrato 1.1 saranno utilizzati per la validazione della metodologia ARTEMIS, sviluppata nel WP2 del progetto RdS 2.5. Nello stesso WP2, verranno condotte valutazioni sulla possibile evoluzione della tecnologia agrivoltaica in Italia che si avvarranno, tra l'altro, dell'attività di sperimentazione e delle analisi LCA svolte nel Progetto 1.1. Viceversa, nel WP2 del presente progetto, verranno condotte attività di sperimentazione e di analisi LCA di impianti agrivoltaici che si avvarranno delle valutazioni sulla possibile evoluzione della tecnologia agrivoltaica in Italia svolte nel progetto RdS 2.5.

Inoltre, ci sarà uno scambio di informazioni relativamente alla tecnologia del solare galleggiante nell'ambito dell'attività sull'ibridizzazione degli impianti offshore (WP1).

I due progetti RdS 1.1 e 2.5 condivideranno il contratto per avvio di dottorato di ricerca su "Sperimentazione su agrivoltaico, applicazione di LCA e studi sul potenziale di sviluppo della tecnologia agrivoltaica in Italia".

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. TANDEM è coordinato da OLIVOTTO GLASS TECHNOLOGIES, con la partecipazione di ENEA, CNR e 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 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 oltrepassare il 30% di efficienza per l'architettura perovskite/silicio). Quest'ultimo materiale assorbente, la perovskite, sarà studiato anche nel suo utilizzo in dispositivi a singola giunzione, focalizzando l'attenzione sulla scalabilità dei processi (con studi di tecniche di coating per la larga area e delle potenzialità del processo di co-evaporazione termico), sulla possibilità di depositare i materiali anche fuori dalla glove box e sulla stabilità delle formulazioni individuate. In questo modo si intendono indagare quegli aspetti che possono consentire di valutare a fondo le potenzialità di questa emergente tecnologia.

In parallelo, si intende esaminare metodi per l'integrazione di altri materiali, quali composti III-V e film sottili di nitruri Zn-IV-N2, col silicio sempre con l'obiettivo di realizzare celle solari tandem di nuova concezione. In particolare, composti III-V sono già utilizzati con procedure

mature (basate sulla deposizione con MOCVD) per celle a multigiunzione con risultati soddisfacenti; si cerca tuttavia di diminuirne i costi di fabbricazione investigando l'approccio monolitico e quello meccanico per il posizionamento della cella top dei composti III-V nella cella tandem.

Si intende, inoltre, sviluppare celle a concentrazione solare (a singola e a multigiunzione) adottando soluzioni che consentano di ridurne i costi di realizzazione. Si effettueranno studi di nuove strutture di celle MJ basate sui composti III-V e IV a 3 terminali per la media e alta concentrazione (con deposizione nella stessa camera di crescita e quindi superando i rischi di reciproca contaminazione), si opererà per l'assottigliamento e il riciclaggio del substrato delle celle (con risparmio di materiali). Inoltre, si opererà nel miglioramento delle prestazioni delle celle, adottando griglie metalliche e coating antiriflesso innovativi utili, questi ultimi, anche per supportare l'accoppiamento "meccanico" tra i composti III-V e il silicio e per l'utilizzo con substrati virtuali Ge/Si nell'approccio tandem monolitico. Il miglioramento di sistemi a concentrazione solare si gioverà dello sviluppo di ottiche basate su nuove configurazioni e nuovi materiali in grado di ridurre l'ingombro e il peso dei moduli CPV e ibridi CPV/PV. Questi ultimi moduli, utili per varie applicazioni sia di piccola che di grande taglia, saranno sviluppati valutando una movimentazione planare delle celle CPV tramite attuatori a memoria di forma e un'ottica innovativa, che li renderanno più compatti ed eviteranno la necessità di inseguitori solari molto precisi. Le prestazioni dei moduli ibridi CPV/PV saranno valutate anche tramite l'implementazione di nuovi metodi di misura, che saranno utilizzati come base per la stesura di nuove norme sui moduli ibridi in ambito IEC, in un team coordinato da RSE.

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; queste attività potranno avvalersi anche degli studi di LCA condotti in questo progetto che riguarderanno tecnologie FV consolidate ed emergenti.

Per quanto riguarda lo sviluppo di tecnologie che possano promuovere un uso integrato del fotovoltaico, si agirà su scale differenti nei contesti del BIPV e dell'agrivoltaico.

Per quanto riguarda il BIPV si lavorerà all'ingegnerizzazione e allo scale-up di moduli DSSC aventi dimensioni pari a 10x10 cm² e buona stabilità nel tempo. In continuità con l'attività svolta nel triennio precedente, verranno considerati moduli con connessione delle celle in serie come evoluzione di quelli in parallelo precedentemente studiati. Verranno inoltre integrati nuovi materiali, studiati e sviluppati nell'ambito di questo progetto, allo scopo di aumentare la stabilità nel tempo di questi dispositivi, mantenendo come principale tecnologia di deposizione l'inkjet printing.

Fra le attività relative all'agrivoltaico, saranno sviluppati dispositivi innovativi (organici e a film sottile di silicio) su scala di laboratorio progettati per trasmettere la parte della radiazione solare necessaria alla crescita delle piante, saranno condotti studi multidisciplinari che potranno consentire di adottare definizioni e parametri per identificare caratteristiche e qualificare gli impianti agrivoltaici (anche fornendo supporto alla stesura di documenti regolamentari e normativi), nonché di valutare i potenziali benefici ambientali di un sistema agrivoltaico rispetto a un usuale impianto fotovoltaico a terra.

Le metodologie che riguardano l'agrivoltaico saranno sviluppate anche a partire dai dati sperimentali che saranno raccolti ed elaborati su alcuni impianti agrivoltaici esistenti e su quelli di nuova realizzazione. Tra questi ultimi rientrano i due dimostratori realizzati all'interno del progetto, uno a Scalea da circa 18 kW e uno a Piacenza all'interno del Campo sperimentale fotovoltaico di RSE costituito da 28 settori (o sotto-generatori) fotovoltaici per complessivi 260 kW. Quest'ultimo dimostratore agrivoltaico sarà costituito da tre sezioni:

- Sezione AFV: utilizzata per sperimentazioni agrivoltaiche e composta da 6 settori del Campo sperimentale fotovoltaico per un totale di circa 60 kW;
- Sezione FV: utilizzata per sperimentazioni fotovoltaiche senza sperimentazioni agricole e composta da 3 settori del Campo sperimentale fotovoltaico per un totale di circa 26 kW
- Sezione agricola: utilizzata per sperimentazioni agricole senza installazioni fotovoltaiche e composta da una superficie del Campo sperimentale fotovoltaico di ampiezza pari alla sezione FV, nella quale saranno condotte le stesse coltivazioni della sezione AFV.

Le sperimentazioni e i confronti nelle tre sezioni si goveranno del sistema di acquisizione dati per impianti fotovoltaici messo a punto da RSE, nonché per la parte agricola utilizzeranno un sistema di monitoraggio messo a punto in collaborazione con UNICATT, nell'ambito del dottorato di ricerca attivato in questo progetto.

Per quanto riguarda gli impianti esistenti, il progetto disporrà, come indicato nella LA2.6, dei dati di monitoraggio di un impianto agrivoltaico realizzato presso Laterza (Bari) e di proprietà La Svolta, che si estende su un'area di circa 2,5ha per una potenza di circa 1MW, in cui il fotovoltaico è abbinato alla coltivazione a vite. Inoltre, sarà possibile avviare la valutazione fisiologica e produttiva anche di ulteriori specie da frutto, sia arboree sia arbustive, al fine di avere la più ampia disponibilità di dati sulla compatibilità dei moduli fotovoltaici con colture da frutto. Inoltre, presso Scalea, oltre al dimostratore agrivoltaico elevato che sarà realizzato nell'ambito di questo progetto, si avrà a disposizione un impianto analogo, già presente in un'area contigua (di proprietà EF Solare), realizzato con tecnologia ad inseguimento solare monoassiale, e una zona di confronto in pieno campo localizzata nello stesso sito con le medesime specie agrarie.

La scala degli impianti di nuova realizzazione è sicuramente ridotta, in quanto commisurata ai fondi disponibili ed alla tempistica di autorizzazione di impianti di maggiori dimensioni, non compatibile con quella del progetto. Tuttavia, sperimentazioni a questa scala sono funzionali alla realizzazione di impianti di più grandi dimensioni. In particolare, lo sviluppo di piccoli dimostratori è funzionale alla messa a

punto di un protocollo di monitoraggio adatto a supportare la verifica di condizioni tali da garantire una buona produttività delle colture per gli impianti di scala commerciale. Un impianto agrivoltaico è tale se assicura la funzionalità legata al fotovoltaico e quella legata alle attività agricole. Quindi, anche in un impianto piccolo, con un non elevato numero di piante disponibili, i dati raccolti sulle risposte fisiologiche delle piante all'ombreggiamento continuo e/o presente in alcune ore della giornata, abbinati alla raccolta dei dati produttivi potranno fornire sicuramente utili informazioni che poi potranno essere il punto di partenza per impostare alcuni parametri fondamentali nella realizzazione di impianti di larga scala (ad esempio percentuale di ombreggiamento massimo, minima altezza degli impianti da terra). Per quanto non sono stati ancora messi a punto protocolli di monitoraggio univoci e condivisi e non esistono dati sperimentali pubblici sui pochi impianti in esercizio, in quanto la tematica ha avuto un interesse solo negli ultimissimi anni, alcune sperimentazioni su colture arboree condotte dall'Università di Bari forniscono dati molto incoraggianti sul proficuo utilizzo integrato del terreno.

Saranno studiate soluzioni innovative per la mappatura, il monitoraggio degli impianti FV, nonché per l'ottimizzazione della loro produzione energetica. In particolare, saranno sviluppate metodologie per la valutazione del potenziale fotovoltaico su scale e ambiti differenti (urbano, territorio nazionale, aree rurali a scala regionale), includendo studi riguardanti le misure della radiazione solare (nelle componenti diretta, diffusa e spettrale) e la validazione di metodi di stima indiretta o di previsione della produzione delle nuove tecnologie FV. Tali metodologie consentiranno di caratterizzare i siti idonei all'installazione delle diverse tipologie FV e identificare le aree agricole idonee all'installazione di impianti agrivoltaici a livello regionale, integrando anche la valutazione degli effetti che tali sistemi possono determinare sul paesaggio e sui livelli di servizi ecosistemici.

Inoltre, lo sviluppo di nuove soluzioni per la gestione di impianti fotovoltaici con l'impiego di tecniche avanzate di monitoraggio, basati su algoritmi di riconoscimento delle principali condizioni di guasto e l'utilizzo di O&M digitale, contribuirà a rendere la manutenzione degli impianti FV più rapida, più efficiente e meno onerosa, incrementando l'energia generata a parità di potenza installata e riducendo il costo del kWh prodotto (LCOE).

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, ottiche, 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 organismi o comitati normativi nazionali o internazionali (CEI, IEC, IEA-PVPS) con l'intento di redigere norme, linee guida, best practice che tengano conto dei risultati ottenuti dalla ricerca di questo progetto.

b) Principali risultati attesi/deliverable

I principali risultati e i deliverable attesi sono:

- Strutture di celle a singola giunzione (SJ) in Ge e (Al)InGaP e strutture ad hoc 2J Ge-Ge per lo studio dei contatti profondi e per la determinazione delle costanti ottiche di alcuni strati del dispositivo CPV, con relativo prodotto costituito da celle CPV a 2J Ge-Ge con struttura ottimizzata;
- Sviluppo di celle a 4 giunzioni a 3 terminali innovative con coating avanzati, con relativo prodotto costituito da celle CPV a 4J a 3 terminali
- Sviluppo e ottimizzazione di ottiche innovative e caratterizzazione di moduli ibridi FV-CPV, con relativo prodotto costituito da concentratore ottico per modulo planare con inseguimento 2.5D;
- Sviluppo del processo post crescita per la realizzazione di celle fotovoltaiche ultraleggere e sottili cresciute su substrati di Ge, con relativo prodotto costituito da celle ultraleggere e sottili a SJ;
- Materiali assorbitori a base di perovskite con differenti formulazioni chimiche e realizzati con tecniche differenti (spin-coating, tecniche di coating scalabili, evaporazione termica, ink-jet printing) per celle solari a singola giunzione in perovskite e da utilizzare in celle solari tandem perovskite/silicio;
- Materiali trasportatori di carica e processi innovativi per celle solari ad eterogiunzione di silicio e per celle a base di perovskite;
- Celle solari a singola giunzione in perovskite di piccola area idonee ad essere integrate in celle tandem perovskite/silicio con efficienze massime >20% per le celle opache e > 15% per celle semitrasparenti;
- Prototipi di moduli FV in perovskite (circa 300 cm²) con efficienza massima di almeno il 16%;
- Celle a eterogiunzione di silicio con correnti di circa 40 mA/cm² sviluppate su sistemi di deposizione idonei per lo scale-up;
- Prototipi di moduli FV di nuova concezione realizzati con nuovi materiali polimerici o con vetri testurizzati e celle in silicio su wafer flat.
- Celle tandem perovskite/silicio (area di circa 1 cm²) con efficienza massima maggiore del 30% e prototipi di cella tandem perovskite/silicio di area almeno pari a 20 cm²;

- Analisi della situazione attuale della tecnologia delle celle tandem su Si con ricerca su nitruri Zn-IV-N₂ e sulla loro deposizione mediante sputtering HiPIMS da target di Zn e Sn, per ottenere film sottili di ZTN;
- Studio preliminare sulle strutture tandem III-V//Si, con approfondimento conoscitivo sulle possibilità di integrazione dei materiali III-V su silicio;
- Studio LCA di impianti FV, sia utility scale che domestici, facenti uso di tecnologie FV emergenti, nonché di tecnologie esaminate in questo progetto;
- Analisi della situazione attuale dell'agrivoltaico in Italia, aspetti normativi e linee guida per redigere uno studio LCA di tali sistemi, accompagnati dall'analisi dei dati riguardanti l'integrazione agraria ed energetica durante il loro esercizio;
- Impianto agrivoltaico dimostratore all'interno del campo sperimentale fotovoltaico da 260 kW presso RSE a Piacenza;
- Impianto agrivoltaico dimostratore a Scalea da circa 18 kW;
- Indirizzi per la sostenibilità ambientale e paesaggistica di sistema agrivoltaici, espressi in Linee guida nella forma di set di indicatori e raccomandazioni per lo sviluppo di progetti agrivoltaici che soddisfino i requisiti di integrazione ecosistemica, di tutela paesaggistica e dei valori culturali; ;
- Valutazione della crescita di colture/piante sotto impianti agrivoltaici o in serre con copertura fotovoltaica;
- Sviluppo di celle solari a film sottile di nuova generazione per serre fotovoltaiche con materiali di tipo inorganico (cella a base di silicio con degli opportuni riflettori spettralmente selettivi) e di tipo organico, a base di materiali polimerici semiconduttori con opportuno assorbimento nel range spettrale di interesse;
- Prototipo di serra con copertura fotovoltaica circa 100 x 40 cm² realizzata con vetri fotovoltaici spettralmente selettivi;
- Metodo per l'elaborazione di un catasto solare fotovoltaico urbano, basato sulla mappatura tridimensionale degli edifici urbani e della vegetazione e la stima accurata del potenziale di energia solare dei tetti urbani valutati idonei all'installazione di sistemi fotovoltaici;
- Metodo per la definizione della vocazionalità dei siti all'agrivoltaico, basato su un'analisi spaziale multicriteriale che valuta le priorità di criteri opportunamente identificati, tali da influenzare sia il potenziale fotovoltaico di un dato terreno agricolo che la sua resa agricola, massimizzando le performance di un sistema agrivoltaico ivi installato;
- Unità funzionale di modulo ibrido FV / CPV integrato con il sistema di inseguimento solare planare (sensore di puntamento, unità di controllo, attuatori a memoria di forma)
- Acquisizione e analisi dei dati di irraggiamento solare (nelle diverse componenti e a livello spettrale) provenienti da diversi siti italiani e procedure automatiche di validazione dei dati (per maggiori dettagli sulle procedure adottate si veda il par. "Descrizione attività" della LA3.1);
- Algoritmi di Machine Learning per il monitoraggio e l'ottimizzazione dell'energia generata da impianti fotovoltaici
- Repository dei dati di guasto di impianti FV per consentire la realizzazione e validazione di algoritmi per il riconoscimento delle principali condizioni di guasto, in grado di contribuire a rendere la manutenzione degli impianti FV più efficiente e meno onerosa; il repository sarà realizzato presso RSE a Milano e reso disponibile on-line ad altri centri di ricerca e operatori FV;
- Modelli matematici a supporto dell'O&M, con diagnosi dei guasti combinati e dell'invecchiamento della tecnologia fotovoltaica;
- Metodo di stima della produzione di impianti con moduli bifacciali in funzione delle condizioni ambientali e del sistema di sostegno utilizzato (fisso o ad inseguimento solare);
- Protocollo per la produzione di celle CIGS (2.5x2.5cm² ed efficienza $\geq 14\%$) mediante un processo ad alta riproducibilità basato sulla Pulsed Electron Deposition;
- Processo per la fabbricazione di celle di CuInSe₂ per dispositivi tandem a 2T in accoppiamento con la perovskite;
- Protocollo di fabbricazione di celle in perovskite inorganica (CsPbBr₃) con elevata trasparenza e uniformità di spessore, depositata mediante tecniche da vuoto (Single Source Thermal Ablation);
- Processo per la deposizione da soluzione di perovskite semi-trasparente su substrati di CIGS;
- Metodo per l'ottimizzazione celle tandem perovskite/CIGS;
- Risultati sperimentali delle caratterizzazioni delle celle tandem perovskite/CIGS;
- Protocollo di produzione di moduli DSSC 10x10 cm² ad elevata stabilità per BIPV;
- Proprietà dei moduli DSSC 10x10 cm² ad elevata stabilità per BIPV;
- Formulazione di miscele elettrolitiche per DSSC ad alta tensione di vapore;
- Combinazioni coloranti/elettroliti per dispositivi DSSC ad alta stabilità e trasparenza;
- Realizzazione di un modulo fotovoltaico DSSC di dimensioni 20x30 cm² tramite linea pilota;
- Realizzazione di un pannello fotovoltaico DSSC ottenuto integrando moduli DSSC 20x30 cm²;
- Linea Pilota DSSC e caratteristiche moduli DSSC realizzati con linea pilota;
- Dati sulle caratterizzazioni dei moduli DSSC;
- Progetto di massima e previsione delle prestazioni dell'impianto fotovoltaico del CNR-IMEM e previsioni su autoconsumo e scambio di energia con prosumer della futura Comunità Energetica (CER) del Campus di Parma. Il progetto di massima dell'impianto consisterà nella definizione dettagliata delle varie sezioni dell'impianto, nella stima (PV-GIS) della produzione media oraria di energia da parte di ciascuna sezione, nel calcolo dell'autoconsumo orario, e del surplus di energia che può essere messo a disposizione della CER a partire dai dati messi a disposizione dal DSO ;

• Progetto di “Laboratorio Aperto” dedicato alle tecnologie per la transizione energetica e programma delle attività. La CER del Campus di Parma di cui alla LA3.8, sarà il quartier generale delle iniziative di disseminazione organizzate in collaborazione con Università e Comune di Parma, destinate ad un pubblico generico e in parte rivolte ad aziende, studenti e policy makers. Presso la sede dal CNR si potrà accedere agli strumenti di monitoraggio in tempo reale dei flussi energetici all'interno della CER e alle tecnologie adottate per ottimizzare lo scambio energetico. Ci sarà anche uno spazio espositivo dedicato alle tecnologie oggetto delle attività di ricerca collegate al fotovoltaico e alle comunità energetiche. Il Laboratorio Aperto sarà accessibile in occasione dei seminari tematici previsti in questa LA4.5 e visitabile, su prenotazione, in qualsiasi momento dell'anno.

2.6 Fattibilità tecnico-scientifica

a) Fattibilità tecnico-scientifica

Il progetto, i cui obiettivi sono stati discussi nelle sezioni precedenti, si avvale dalle forti competenze sul tema fotovoltaico degli affidatari, maturate anche nel contesto della ricerca di sistema elettrico, e viene arricchita e completata 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 l'integrazione del FV in vari contesti.

Nello sviluppo di dispositivi fotovoltaici ad alta efficienza, il progetto prenderà in considerazione differenti soluzioni sia in termini di materiali che di architetture. Saranno studiati materiali assorbitori e trasportatori di carica per celle solari (quali ad esempio, perovskiti, CIGS, composti III-V e nitruri) con la prospettiva di utilizzarli sia in configurazione a singola giunzione sia in celle tandem che utilizzino il silicio o il CIGS come cella bottom. Per l'architettura tandem perovskite/Si, per la quale nello scorso triennio è stata mostrata la possibilità di ottenere alte efficienze, l'attività si concentrerà sul miglioramento dei risultati ottenuti e sulla progettazione dell'upscaling di alcune delle architetture di dispositivo.

Riguardo le celle a concentrazione solare (a singola e a multigiunzione) saranno studiate nuove soluzioni che consentano (1) di ridurre i costi di realizzazione, partendo dalle conoscenze acquisite con la deposizione dei composti III-V nella stessa camera di crescita e superando i rischi di reciproca contaminazione, (2) di adottare strutture a 3 terminali e (3) di migliorarne le prestazioni. Proseguirà lo sviluppo di ottiche innovative per CPV e per moduli ibridi FV / CPV, compatte ed economiche, basandosi sui componenti e sulle strutture che si sono dimostrati applicabili nelle precedenti attività di ricerca.

Gli studi sui materiali e dispositivi saranno completati da indagini di LCA che riguarderanno tecnologie FV commerciali ed emergenti, ed anche quelle sviluppate in questo progetto, utilizzando metodologie condivise in gruppi di lavoro internazionali (IEA PVPS Task 12 “PV Sustainability”).

Per quanto riguarda lo studio di soluzioni per il BIPV e agrivoltaico si lavorerà su scale differenti, mettendo a punto celle/prototipi di modulo innovativi basate su differenti tecnologie e materiali e realizzando dimostratori in campo. In particolare, saranno realizzati e monitorati due impianti dimostratori agrivoltaici, uno a Scalea da 18kW e uno a Piacenza nel Campo sperimentale fotovoltaico da 260 kW, i cui dati contribuiranno a stabilire indicatori e metriche relativi alla sostenibilità complessiva dei sistemi agrivoltaici. In questo caso è fondamentale l'approccio di tipo multidisciplinare che consente di integrare gli aspetti energetici con quelli di produzione agricola e di qualità ecosistemica.

Saranno poi sviluppate tecniche di machine learning e O&M digitale, utilizzando metodologie già in parte studiate nelle attività di ricerca sin qui condotte e potenziando apparecchiature innovative già esistenti; in aggiunta a ciò, si effettuerà lo sviluppo di strumenti spazialmente basati (sistemi GIS-based) per definire le aree idonee per le installazioni FV in aree urbane e agricole.

Nella definizione delle attività che saranno dettagliate per le varie linee più avanti si è tenuto conto di eventuali criticità che possono limitare il raggiungimento dei vari target previsti e 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 consente di assicurare un'efficace conduzione del progetto e l'ottenimento dei principali obiettivi previsti nei differenti ambiti.

Il progetto è articolato in quattro work package: il WP1 è dedicato allo sviluppo di materiali e processi che possano migliorare gli attuali moduli fotovoltaici o innovarli con materiali e architetture di celle solari innovativi; il WP2 ha lo scopo di progettare e realizzare nuove soluzioni per integrare il fotovoltaico negli edifici e per coniugare produzione di energia elettrica e agricola (agrivoltaico); il WP3 è dedicato allo sviluppo di metodologie per la mappatura, il monitoraggio e l'ottimizzazione degli impianti FV; infine il quarto WP è focalizzato sulle azioni di coordinamento, di gestione e di disseminazione dei risultati del progetto.

Il WP1 è costituito da 37 LA che vedono il coinvolgimento dei 3 affidatari e di numerosi co-beneficiari. Sono previsti studi che riguardano lo sviluppo di celle a multigiunzione a concentrazione, di componenti ottiche per moduli a concentrazione, di celle solari a base di silicio, CIGS, composti III-V e perovskite da utilizzare anche per celle solari tandem con l'obiettivo da un lato di dare una prospettiva industriale a materiali e architetture di dispositivo in parte sviluppati nello scorso triennio e dall'altra di sperimentare l'utilizzo di materiali alternativi

e/o di tecniche di deposizione di possibile interesse industriale.

Nelle LA1.1 e LA1.2 vengono sviluppati processi innovativi e architetture di cella a MJ a concentrazione (CPV), in correlazione le LA1.8 e LA1.9 relative a materiali e tecnologie innovative per celle e moduli di nuova generazione. Nelle LA1.3 e LA1.4 si effettuerà lo sviluppo di ottiche per moduli CPV e ibridi FV/CPV, nonché la loro caratterizzazione sia in termini di potenza che di energia. Queste misure saranno utilizzate per valutare l'unità funzionale completa di modulo ibrido FV/CPV con sistema d'inseguimento solare planare interno al modulo, sviluppata nelle LA2.3 e LA2.4.

Saranno effettuati studi mirati allo sviluppo di celle solari tandem III-V/Si e nitruro/silicio, prendendo in considerazione nelle LA1.5 e LA1.6 la deposizione di nitruro su silicio e nella LA1.7 la deposizione di elementi III-V su silicio in sinergia e collaborazione con le LA dove si studiano celle tandem con componente posteriore in silicio.

Nelle LA1.12, LA1.13, LA1.16, LA1.18 e LA1.19 vengono sviluppati dispositivi FV in perovskite, con il supporto di altre LA dove si studiano materiali (LA1.14 e LA1.15) e metodi computazionali (LA1.17). Lo studio di celle a eterogiunzione di silicio è affrontato nelle LA1.20 e LA1.21 dove confluiscono anche gli studi su materiali/tecniche innovativi per celle in Si svolti nelle LA1.22, LA1.23, LA1.24 e LA1.25. Le linee LA1.27 e LA1.28 si occupano dello sviluppo di celle tandem perovskite/Si, valutando la possibilità di incrementare le prestazioni dei dispositivi rispetto ai risultati conseguiti nello scorso triennio e di studiare lo scaleup delle strutture ritenute più promettenti per promuoverne un trasferimento industriale. Lo sviluppo di modelli circuitali analitici è l'argomento di ricerca delle LA1.26 e LA1.29 per supportare la comprensione dei fenomeni fisici alla base di alcuni comportamenti osservati sui dispositivi. E', inoltre, previsto lo studio di materiali e approcci innovativi utili alla realizzazione di moduli FV di nuova generazione che possano ridurre gli impatti ambientali della produzione (LA1.30-LA1.32).

Nelle LA1.10 e LA1.11 saranno condotti studi di LCA di tecnologie FV ad alta efficienza già commercializzate e di quelle emergenti sebbene in fase di sviluppo; saranno inoltre analizzate alcune tecnologie selezionate fra quelle sviluppate nelle LA1.12, 1.13, 1.27, 1.28, 1.35 e 1.36.

Le linee di attività da LA1.33 a LA1.37, sono dedicate all'integrazione di due gruppi di tecnologie a film sottile consolidate e correntemente utilizzate, rispettivamente per la realizzazione di celle solari a film sottile di perovskite e di celle a base di CuInGaSe_2 (CIGS). L'obiettivo di queste attività, complementari a quelle dedicate all'accoppiamento fra perovskite e silicio, è quello di sfruttare la forte complementarità fra le due tecnologie al fine di realizzare dispositivi interamente a film sottile, in grado di migliorare sia le efficienze di conversione che la stabilità delle attuali celle a perovskite. A questo fine verranno realizzati sia dispositivi a singola giunzione che celle tandem perovskite/CIGS a due e a 4 terminali. Verranno studiate e ottimizzate soprattutto le caratteristiche che distinguono questa tipologia di cella tandem a film sottile dalle celle tandem perovskite/Si (i.e. leggerezza e flessibilità di celle e moduli che possono determinarne una più facile integrazione in un'ampia tipologia di prodotti).

Il WP2 è articolato in 14 LA che si occupano di soluzioni tecnologiche per l'agrivoltaico e il BIPV.

Per quanto riguarda l'agrivoltaico, la LA2.1 e la LA2.2 si occuperanno di stabilire definizioni e parametri idonei per identificare caratteristiche e qualificare i sistemi agrivoltaici (anche fornendo supporto alla stesura di documenti regolamentari e normativi), a partire dalle risultanze di sperimentazioni su impianti dimostratori (realizzati nella LA2.2 di RSE e nella LA2.5 di ENEA) e su impianti in esercizio, nonché valutando con studi LCA i potenziali benefici ambientali di un impianto agrivoltaico rispetto a un usuale impianto fotovoltaico a terra. In questo contesto gli affidatari potranno effettuare una campagna di "intercomparison" per la caratterizzazione delle coltivazioni agricole nei rispettivi impianti agrivoltaici analizzati.

La linea di attività LA2.5 comprende la realizzazione di un dimostratore agrivoltaico da circa 18 kW ed il suo confronto con altri dimostratori esistenti, fornendo, così, uno specifico oggetto di studio sul quale sviluppare metriche ed indicatori idonei. Accanto agli aspetti energetici, saranno considerati temi legati all'agricoltura, alla qualità ecosistemica e alla pianificazione paesaggistica e territoriale (LA2.6-2.8).

Le LA2.9 e 2.10 si occupano, su scale di intervento differenti, di studiare coperture fotovoltaiche per serre partendo da moduli semitrasparenti o da concetti più avanzati di celle solari spettralmente selettive (organiche o inorganiche), con l'obiettivo di valutarne l'effetto sulla crescita delle colture poste all'interno delle serre.

Le LA2.3 e LA2.4 sono dedicate alla progettazione e realizzazione di una unità funzionale di modulo ibrido FV/CPV con inseguimento solare integrato (interno), concepito per essere installato su un inseguitore solare esterno a bassa risoluzione.

Il WP2 include anche attività dedicate allo sviluppo di moduli DSSC (LA2.11-2.14). Da un lato le tecnologie a stampa, sviluppate nel triennio precedente, verranno integrate in un processo di produzione adatto allo scale-up industriale, dall'altro verranno consolidati step di processo da cui dipende in modo cruciale la vita media dei prodotti realizzati, con particolare riguardo alla stabilità dei coloranti. Molto importante, in termini di scalabilità industriale del processo, sarà la disponibilità della mini-linea di produzione messa a disposizione dal CNR a Roma, dove i nuovi step di processo verranno sperimentati e verificati in un ambiente di tipo industriale (LA2.13).

La linea di produzione su cui verranno innestati i nuovi step di processo era stata originariamente concepita per la realizzazione di moduli DSSC destinati all'integrazione nelle facciate (semi)trasparenti di un edificio.

Questa rimarrà la caratteristica fondamentale dei moduli anche dopo l'aggiornamento della linea di produzione. Fra le attività del WP2, la LA2.14 si occupa di verificare che i nuovi moduli mantengano le specifiche richieste per l'integrazione in facciata a partire dalle caratteristiche termiche ed ottiche e alla loro evoluzione temporale in diverse condizioni ambientali.

Alcuni dei moduli realizzati nell'ambito della LA2.13 e testati nella LA2.14, verranno poi destinati al "laboratorio aperto" del CNR a Parma, come previsto nel programma della LA4.5. Qui i moduli verranno installati su pareti o mock-up di facciata e il loro funzionamento verrà monitorato nel tempo, oltre che illustrato ai visitatori del laboratorio.

Infine, le caratteristiche dei moduli combinate con i dati del monitoraggio verranno rese disponibili al team di lavoro del progetto CANVAS (WP6) affinché i moduli vengano inseriti nel database di prodotti virtuali usati dal software di simulazione (gemello digitale più realtà aumentata) degli impianti BIPV realizzato dal CNR e sperimentato proprio a Parma presso la sede amministrativa del Comune di Parma.

Il WP3 è articolato in 8 LA e ha l'obiettivo di investigare metodologie e tecnologie avanzate per mappatura, monitoraggio e ottimizzazione dell'energia generata da FV

In particolare, la LA3.1 e la LA3.2 si occupano della valutazione del potenziale FV per sito di installazione e per tecnologia di cella/modulo; tramite misure della radiazione solare (nelle componenti diretta e diffusa, nonché nella distribuzione spettrale) e con la validazione di metodi di stima indiretta o di previsione della produzione delle nuove tipologie FV, sarà possibile caratterizzare i siti idonei all'installazione delle diverse tecnologie FV.

Le LA3.3 e LA3.4 svilupperanno strumenti per la gestione ottimale degli impianti FV e per massimizzare la produzione energetica, con l'impiego di tecniche avanzate di monitoraggio basati su algoritmi di riconoscimento delle principali condizioni di guasto e l'utilizzo di O&M digitale. In particolare, nella LA3.4 sarà creato un Repository dei dati delle principali tipologie di guasto acquisiti presso la Facility Guasti FV di RSE, da condividere con gli altri affidatari del progetto (LA3.6) e con la comunità scientifica internazionale per la validazione di algoritmi di riconoscimento guasto.

Le LA 3.5, 3.6 e 3.7 metteranno a punto metodologie e sistemi spazialmente basati in grado di identificare la vocazionalità di aree a diverse forme di fotovoltaico integrato, in particolare il fotovoltaico urbano e l'agrivoltaico. Inoltre, in un contesto dove i modelli di predizione della produzione, così come quelli dei comportamenti di singole componenti di impianto, permangono incompleti mostrando difficoltà di generalizzazione, nella LA3.5 e LA3.6 sarà studiato e sperimentato l'utilizzo di componenti spaziali e concetti di similitudine tra impianti per generare informazioni rilevanti al fine di riconoscere tempestivamente anomalie nel comportamento di impianti FV.

La LA3.8, in forte sinergia con il resto del WP3 e con la LA4.5, apre una prospettiva rilevante per quanto riguarda l'impatto dei risultati di questo progetto sul futuro sviluppo delle Comunità Energetiche che utilizzano anche i sistemi di generazione fotovoltaici. I risultati delle LA3.1 e 3.2 costituiranno un input importante per la progettazione dell'impianto fotovoltaico sperimentale del CNR di Parma che comprenderà anche una sezione agrivoltaica. In prossimità del sito dell'impianto fotovoltaico sperimentale del CNR a Parma, verrà realizzato anche un "laboratorio aperto" interattivo (LA4.5), che interagirà con tutti i dimostratori fotovoltaici sviluppati nell'ambito di questo progetto da RSE, ENEA, CNR e i rispettivi partner cobeneficiari.

Il WP4 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 5 LA dove i tre affidatari opereranno in maniera sinergica e collaborativa col supporto anche di tutti i co-beneficiari.

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 dal PNIEC, dal pacchetto sul cambiamento climatico dell'UE "Fit for 55" e dal Green Deal europeo. La produzione mondiale di elettricità da solare fotovoltaico è un ordine di grandezza inferiore rispetto alle tecnologie convenzionali, giacché ha rappresentato circa il 5% della produzione nel 2021 [IEA PVPS Trends 2022]; tuttavia, il fotovoltaico dà evidenza di una progressione molto rapida, come dimostra il raggiungimento nel 2022 di 1 TW installato a livello mondiale. Ciò sta avvenendo grazie anche alla rilevante riduzione dei costi osservata negli ultimi anni, al continuo incremento dell'efficienza e alla 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 negli edifici (BIPV), e in generale nell'ambiente costruito, nonché in altri contesti che si

stanno rivelando competitivi sia dal punto di vista tecnico che economico; è questo il caso dell'agrivoltaico, che costituisce un approccio sinergico tra fotovoltaico e agricoltura a beneficio di entrambi.

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 un'ampia e completa 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, individuare dei possibili percorsi per lo sviluppo industriale del fotovoltaico in Italia che possano determinare 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 celle fotovoltaiche ad alta efficienza può tradursi in una riduzione dei costi di modulo e di tutto il resto dell'impianto (Balance of System, BoS) di generazione fotovoltaico, determinando benefici per gli utenti del sistema energetico italiano sia in termini di riduzione del costo dell'energia elettrica prodotta sia in termini di minore occupazione del suolo. Non è semplice ad oggi poter quantificare tali aspetti, in quanto per la realizzazione di celle solari innovative (tandem o multigiunzione) sono da analizzare ulteriormente i nuovi materiali nonché i recenti e innovativi processi di fabbricazione; solo a valle di questo percorso di ricerca e con l'avvio delle prime linee di produzione sarà possibile dare una stima dei costi industriali di queste nuove tecnologie FV. Si può tuttavia affermare, anche sulla base delle conoscenze di ENEA, RSE e CNR nonché della letteratura scientifica che si sta occupando della tematica tecnico-economica legata allo sviluppo di celle tandem, che è ragionevole ipotizzare per i moduli con celle tandem (con efficienza attesa di circa 30%) un costo di produzione inferiore a 20 c€/W, valore quest'ultimo confrontabile con gli attuali costi di moduli in Si con efficienze medie intorno al 20% e richiedono quindi una maggiore superficie di installazione e strutture di sostegno più ampie; ne potrà quindi conseguire, a parità di potenza FV installata, una diminuzione del costo di installazione.

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 200 GW/anno nel 2021 con una localizzazione degli impianti produttivi per circa il 90% in Asia [IEA PVPS Trends 2022]. Tuttavia, 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. Attualmente la tecnologia di celle e moduli FV dominante è quella basata su celle in silicio cristallino con share del 94% ed efficienze di modulo mediamente intorno al 20%. Le celle solari tandem e le celle a multigiunzione sono la nuova frontiera dell'alta efficienza dato che la tecnologia basata su celle in silicio (efficienza di laboratorio fino a circa 27%) è molto prossima alla massima efficienza raggiungibile (29,4%). 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 del BIPV e dell'agrivoltaico, possono generare delle ricadute applicative nel breve termine/medio termine, grazie anche al superamento di barriere di tipo amministrativo che oggi non favoriscono iniziative che potrebbero sottrarre suolo ad altri utilizzi (fra cui principalmente le attività agricole).

La diffusione dei risultati scientifici di questo progetto, verso Enti di ricerca, Università e Industria, 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 uno sviluppo futuro dei risultati raggiunti 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 e le metodologie sviluppate, essi 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 per ognuna delle singole LA del progetto). In particolare:

- i rapporti tecnici, così come i prodotti editoriali elencati nella Tabella della Sezione 4, saranno allegati al consuntivo tecnico di LA prodotto in occasione del SAL;
- i rapporti tecnici, prodotti editoriali e altri prodotti di LA elencati nella Tabella della sezione 4 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.