UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

AGRIVOLTAICO SOSTENIBILE:

STATO DELL'ARTE E POTENZIALI APPLICAZIONI IN VENETO

Relatore

Prof. Arturo Lorenzoni

Laureanda

Martina Deplano
1234072

Anno Accademico 2021/2022

Sommario

Introduzione 1

Capitolo 1. Le basi della tecnologia 3

La fonte solare 3

Le piante e l'interazione con la luce 6

La tecnologia fotovoltaica 12

I moduli fotovoltaici 17

Capitolo 2. L'agrivoltaico 26

La definizione di agrivoltaico 26

Le applicazioni agrivoltaiche 28

I metodi di classificazione e lo stato dell'arte degli impianti 34

Impianti alti 38

Impianti bassi 47

Gli indicatori di performance 53

Gli effetti dell'agrivoltaico 56

Effetti diretti 56

Effetti indiretti 60

Componenti di costo e modelli di business 63

Capitolo 3. Le potenziali applicazioni dell'agrivoltaico in Veneto 73

La scelta agrivoltaica in Veneto 73

Il quadro normativo 79

La progettazione di un impianto agrivoltaico 82

Simulazione e confronto tra configurazioni agrivoltaiche 87

Lo studio delle ombre 92

L'analisi energetica 105

Discussione dei risultati 107

Conclusione 110

Bibliografia 113

Ringraziamenti 121

Introduzione

Il cambiamento climatico è la principale minaccia della nostra epoca e richiede urgenti misure per il contenimento e la mitigazione dei suoi effetti [1].

Diversi scenari al 2050, individuano il fotovoltaico come la più promettente fonte di energia rinnovabile per la transizione energetica e il contrasto al cambiamento climatico. L'IRENA (International Renewable Energy Agency), in particolare, propone tre scenari al 2050: uno primo scenario di *business as usual* (Planned Energy Scenario), che prevede il mantenimento delle attuali policy energetiche, un secondo che ipotizza degli obiettivi più ambiziosi ma comunque realistici per la transizione energetica (Transforming Energy Scenario) e un terzo che considera le misure necessarie per mantenere l'aumento di temperatura globale al di sotto di 1,5°C e per ridurre le emissioni di CO_2 fino ad un valore netto nullo (Net-zero). Tutti gli scenari prevedono un notevole aumento della capacità fotovoltaica, con una totale potenza installata al 2050 di 4'443 GW, 8'519 GW e 14'036 GW, rispettivamente per i tre scenari. Anche nel caso dello scenario BAU, in circa 30 anni, si prevede un aumento della capacità installata di più del 500% [2].

La massiccia diffusione del fotovoltaico ha però delle conseguenze, in particolare in termini di consumo di suolo: benché gli impianti fotovoltaici sui tetti degli edifici siano largamente diffusi e permettono di ridurre la pressione sul settore energetico grazie all'autoconsumo, tali impianti raramente raggiungono le potenze degli impianti montati a terra, i quali possono godere di spazi più ampi per l'installazione. Tuttavia, gli impianti a terra hanno un forte impatto negativo sul suolo e la necessità di grandi superfici può portare alla competizione del settore energetico con quello agricolo.

La capacità degli impianti agrivoltaici di sfruttare in maniera duale il terreno rappresenta una possibile soluzione a questa competizione. Un impianto agrivoltaico, infatti, prevede l'installazione di moduli fotovoltaici elevati o distanziati, in modo da garantire la continuità dell'attività agricola e produrre energia su uno stesso terreno. La tecnologia agrivoltaica, benché presente in tutto il mondo, non è ancora molto conosciuta al di fuori del settore energetico: per questo, questa tesi si pone l'obiettivo di spiegare in maniera chiara e semplice i vantaggi che l'agrivoltaico sostenibile può portare al settore agricolo, attraverso l'analisi dello stato dell'arte, e le potenziali applicazioni dell'agrivoltaico in Veneto.

Capitolo 1. Le basi della tecnologia

La fonte solare

La radiazione solare è la principale fonte di energia disponibile sulla terra: si tratta di una fonte inesauribile, gratuita e presente in pressoché ogni parte del mondo durante tutto l'anno. Ad essa, sono riconducibili le principali fonti energetiche rinnovabili, quali il fotovoltaico e il solare termico ma anche l'eolico, le biomasse e l'energia legata ai moti ondosi.

L'energia solare è il risultato della fusione termonucleare dell'idrogeno, che porta il nucleo del sole a temperature di diversi milioni di Kelvin, mentre la sua superficie ha una temperatura apparente di corpo nero di 5777 K: infatti, lo spettro della radiazione solare segue quello di un corpo nero a tale temperatura, come dimostra la Fig. 1.1 [3].

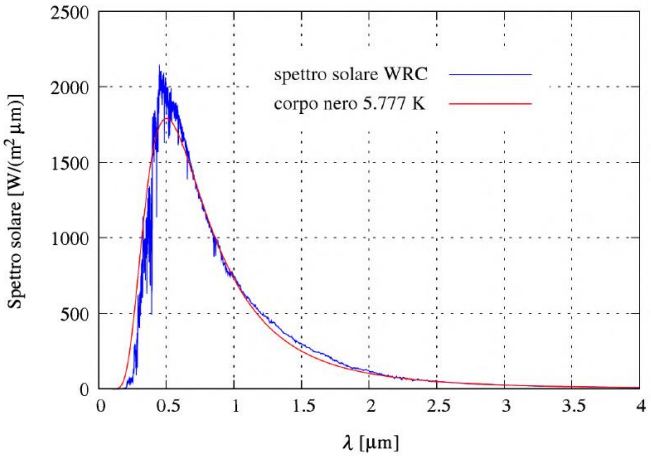

Figura 1.1 Confronto tra la distribuzione spettrale solare e quello di un corpo nero a 5777 K

La luce ha una doppia natura: può essere descritta come un'onda elettromagnetica, con una certa lunghezza d'onda o frequenza, ma anche come un flusso di particelle, i fotoni, la cui energia dipende dalla loro lunghezza d'onda.

Il World Radiation Center ha stimato che, ai limiti dell'atmosfera, il flusso di energia incidente su una superficie unitaria orientata in direzione ortogonale ai raggi solari è pari a 1367 W/m^2; tale valore, prende il nome di costante solare [3]. Tuttavia, l'energia che effettivamente raggiunge la superficie terrestre attraversando l'atmosfera è minore e varia tra 0 e 1050 W/m^2 [4]. Infatti, l'intensità e la distribuzione spettrale della radiazione solare sulla superficie terrestre sono influenzate dall'interazione della luce con particelle sospese, solide o liquide, e con i gas atmosferici, come l'anidride carbonica (CO_2), il vapore acqueo (H_2O) e l'ozono (O_3).

I due principali meccanismi di interazione sono:

- L'assorbimento: per cui particelle e molecole assorbono parte della radiazione solare, con una certa direzione, e la re-irradiano in maniera isotropa, generalmente a lunghezze d'onda maggiori (spettro infrarosso); le particelle assorbono la radiazione in maniera uniforme lungo lo spettro, mentre i gas prediligono delle bande di assorbimento, mutando fortemente lo spettro solare.
- La dispersione: anche detto scattering, per cui i raggi solari vengono deviati, senza modificare lo spettro solare. La direzione in cui i raggi vengono deviati dipende dal rapporto tra la dimensione dell'ostacolo e la lunghezza d'onda: quando tale rapporto è piccolo, la dispersione è isotropa (dispersione di Rayleigh), quando è circa 1 si ha una dispersione anisotropa, con direzione prevalente coincidente con quella originale (dispersione di Mie), e quando è molto grande si ha pura riflessione.

Poiché l'intensità della radiazione solare è legata all'interazione con l'atmosfera, si introduce il concetto di massa d'aria, che quantifica la lunghezza del percorso della luce in relazione all'angolo di incidenza dei raggi solari; all'aumentare dell'angolo di incidenza, infatti, il percorso della luce si allunga,

rispetto al percorso minimo, pari allo spessore dell'atmosfera. I valori più significativi di massa d'aria sono:

- AM0: si riferisce allo spettro fuori dall'atmosfera;
- AM1: si riferisce allo spettro con angolo di incidenza pari a zero, ovvero quando i raggi sono perpendicolari alla superficie terrestre, e quindi si ha la minima distanza attraversata, pari allo spessore dell'atmosfera stessa.
- AM1.5: si riferisce allo spettro con angolo di incidenza di 48,2° ed è utilizzato come spettro solare standard per i calcoli relativi alle applicazioni solari.

Inoltre, sempre a causa dell'interazione con l'atmosfera, solo parte della radiazione solare arriva sulla superficie terrestre direttamente, mantenendo la propria direzione costante. Per questo, possiamo considerare due componenti della radiazione:

- Diretta: ovvero la frazione di radiazione che arriva direttamente al suolo, senza essere perturbata dall'atmosfera, mantenendo quindi la direzione originale;
- Diffusa: ovvero la frazione di radiazione che arriva al suolo dopo aver interagito con l'atmosfera; in prima approssimazione, la radiazione diffusa può essere considerata isotropa.

La presenza di una componente diffusa permette ad un oggetto di essere parzialmente illuminato anche in presenza di un ostacolo, che blocca la componente diretta.

Le condizioni atmosferiche influiscono fortemente sia sull'intensità della radiazione globale, che considera la somma della radiazione diretta e diffusa, sia sul rapporto tra le due: in condizioni di cielo sereno, si ha una netta prevalenza

di radiazione diretta, mentre, al crescere del grado di copertura del cielo, la componente diffusa cresce, finanche ad annullare la componente diretta.

Nel caso di superfici captanti inclinate, si introduce un'altra componente:

- Riflessa: ovvero la frazione di radiazione che viene riflessa dal suolo o da superfici adiacenti, proporzionale ad un coefficiente di riflessione, legato alle caratteristiche ottiche dei materiali riflettenti.

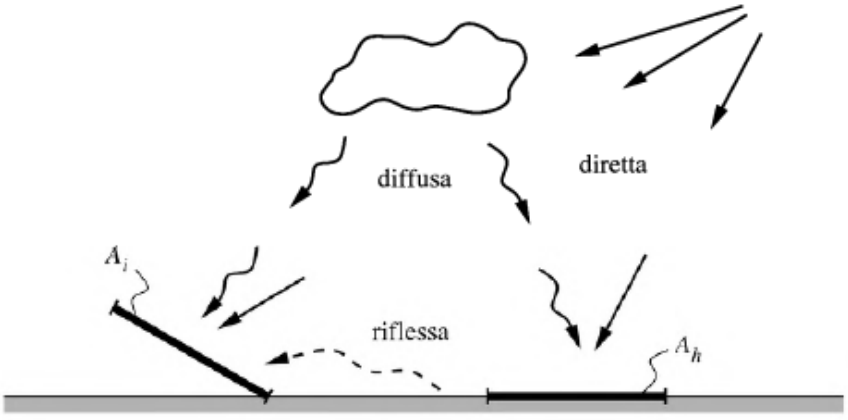

Figura 1.2 Componenti dell'irradianza al suolo e su una superficie inclinata [3]

Le piante e l'interazione con la luce

Il Sole è di fondamentale importanza per la vita sulla terra. Il principale processo di importanza biologica che sfrutta l'energia solare è la fotosintesi, che permette la formazione e il mantenimento della biomassa terrestre, inclusa quella antica, rappresentata dalle fonti fossili.

La fotosintesi è un processo molto complesso, che comprende più di 50 reazioni intermedie, ma che può essere riassunto nella seguente reazione chimica:

$$6\,CO_2 + 6\,H_2O \rightarrow C_{16}H_{12}O_6 + 6\,O_2$$

In sintesi, l'acqua e l'anidride carbonica vengono convertiti in ossigeno e carboidrati, per effetto della luce. La reazione di fotosintesi ha una costante di equilibrio pari quasi a zero, il che significa che in assenza dell'energia fornita dalla luce, la reazione non potrebbe avvenire spontaneamente.

La porzione di spettro solare intercettata dalle piante viene definita radiazione fotosinteticamente attiva e coincide con lo spettro solare del visibile (400-700 nm), il quale rappresenta circa il 40% della totale radiazione solare. Il processo fotosintetico avviene nei cloroplasti, degli organuli al cui interno sono presenti pigmenti attivi nella fotosintesi, i quali, assorbendo i fotoni, promuovono gli elettroni che guidano le reazioni di ossidoriduzione per la conversione dell'energia luminosa in energia chimica, fondamentale per il ciclo metabolico. L'energia luminosa in eccesso nella promozione degli elettroni viene convertita in calore.

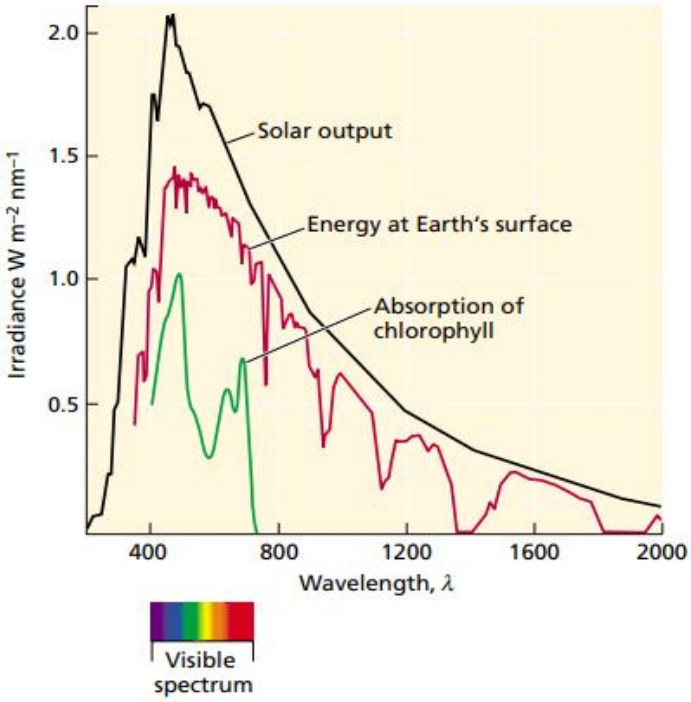

Figura 1.3 Lo spettro solare e lo spettro di assorbimento della clorofilla

Il pigmento più noto è la clorofilla, che presenta dei picchi di assorbimento nelle bande del blu (430 nm) e del rosso (660 nm) (Fig 1.3); la banda verde, invece,

viene prevalentemente riflessa, conferendo alle piante il loro caratteristico colore. Vi sono poi altri tipi di pigmenti, come i carotenoidi che, assorbendo le bande più energetiche, con picchi tra i 400 e i 500 nm, e riflettendo il resto dello spettro, esibiscono un tipico color arancione [5].

Il ciclo metabolico della fotosintesi è il ciclo di Calvin-Benson, che prevede la produzione di carboidrati a partire dall'anidride carbonica atmosferica, dall'acqua e dall'energia chimica, derivata dalla conversione dell'energia luminosa. Il ciclo dipende dall'azione di numerosi enzimi, tra cui, il principale è il bienzima Rubisco. Questo enzima può anche agire sull'ossigeno, secondo un processo detto fotorespirazione, che libera la CO_2 assimilata e riduce il bilancio di carbonio.

A seconda del meccanismo di immagazzinamento del carbonio, e quindi del tipo di fotosintesi, si distinguono tre tipi di piante:

- C_3: sono le piante più antiche, in cui si alternano fotosintesi e fotorespirazione (20%). Sono tipiche dei climi temperati, con massimi valori di efficienza fotosintetica per temperature tra i 20°C e i 25°C. Per temperature di foglia maggiori, invece, la fotorespirazione aumenta, riducendo l'attività fotosintetica. D'altra parte, queste piante beneficiano di un aumento della concentrazione di CO_2 atmosferica, che comporta un aumento dell'attività fotosintetica. Tipi di piante C_3 sono: patate, riso, soia, grano e ortaggi.
- C_4: queste piante si sono evolute dalla forma C_3 circa 30 Milioni di anni fa, per compensare i bassi livelli di CO_2 atmosferica, l'aumento di O_2 e lunghi periodi di siccità e radiazione intensa. Presentano un meccanismo di concentrazione dell'anidride carbonica all'interno della pianta, che permette di minimizzare la fotorespirazione e la traspirazione, ovvero la perdita d'acqua. Sono tipiche di ambienti tropicali, con massimi valori di

efficienza fotosintetica per temperature tra i 25°C e i 35°C. Poiché la fotorespirazione è ridotta al minimo, un aumento della temperatura delle foglie non comporta la riduzione dell'attività fotosintetica. Inoltre, in ragione dell'alta concentrazione di CO_2 interna, un aumento della concentrazione di CO_2 atmosferica non influisce sull'attività fotosintetica. Tipi di piante C_4 sono: barbabietola da zucchero, mais e sorgo.

- CAM: si sono evolute dalle C_3 circa 35 milioni di anni fa in luoghi con forti carenze idriche, come i deserti. In queste piante, la cattura della CO_2 e la sua incorporazione nella struttura carboniosa avvengono in momenti diversi, rispettivamente di notte e di giorno, il che minimizza la perdita d'acqua. Sono tipiche di climi caldi e aridi. Tipi di piante CAM sono: piante grasse, ananas, agave e orchidee.

La produttività delle piante dipende strettamente dall'attività fotosintetica. L'attività fotosintetica, a sua volta, è legata a due principali fattori limitanti: la quantità di luce e la concentrazione di CO_2. In relazione alle piante, la luce viene espressa in PPFD (Photosynthetic photons flux density) [μmol/(m² s)], che si riferisce al flusso luminoso nel range fotosinteticamente attivo (PAR); con cielo sereno, la radiazione solare equivale a circa 2000 μmol/(m² s).

L'importanza della luce è testimoniata dall'evoluzione delle piante e dai meccanismi di adattamento sviluppati; la capacità di adattamento delle piante è definita plasticità. Nel caso degli alberi, per esempio, le foglie della chioma hanno diverse morfologie a seconda che si trovino nella parte superiore, dove ricevono più luce, o nella parte inferiore, dove ricevono meno luce. Inoltre, le foglie di alcune piante presentano meccanismi di tracking, per ricercare, ma anche evitare, la radiazione a seconda delle esigenze.

La Fig. 1.4 mostra la dipendenza dalla luce dell'attività fotosintetica, espressa come velocità di assimilazione della CO_2 per una pianta C_3.

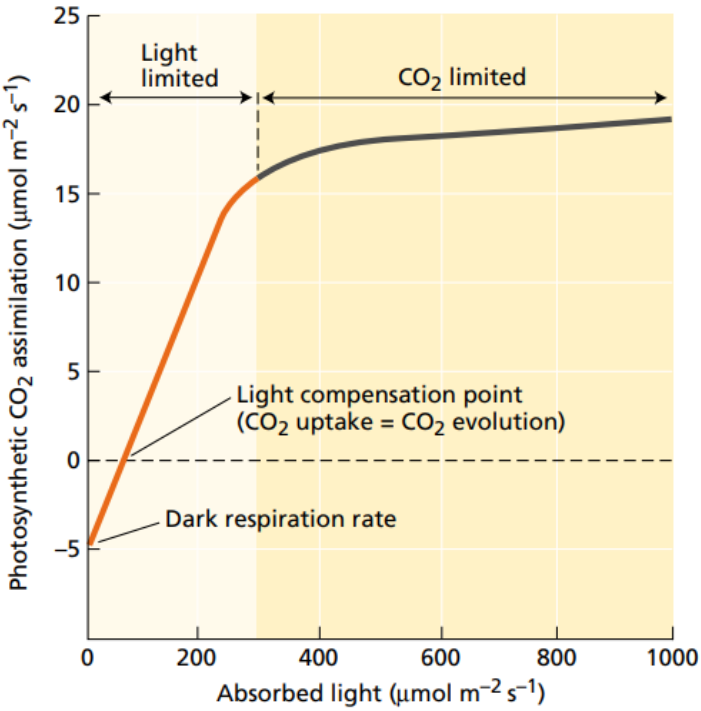

Figura 1.4 La risposta fotosintetica alla luce in una pianta C_3

In assenza di luce o in caso di luce molto ridotta, si ha prevalenza di respirazione, con rilascio di CO_2 in atmosfera. All'aumentare della disponibilità di luce, si riduce la respirazione, fino a raggiungere il punto di compensazione della luce, per cui non si ha né rilascio né assimilazione di anidride carbonica. Oltre il punto di compensazione, l'aumento di luce porta all'aumento della CO_2 assimilata, con una pendenza lineare legata all'efficienza fotosintetica della pianta, fino a che non si raggiunge un plateau: si dice allora che è stato raggiunto il punto di saturazione, oltre il quale l'attività fotosintetica non aumenta perché limitata da altri fattori interni al meccanismo della fotosintesi. Poiché non tutte le foglie ricevono la stessa quantità di luce contemporaneamente, è raro che le piante arrivino a saturazione e, generalmente, maggiori livelli di radiazione coincidono con un aumento di biomassa.

L’esposizione alla luce comporta il riscaldamento della pianta: poiché la fotosintesi dipende dalla temperatura, è necessario che le piante rimangano entro certi range di temperatura per mantenere un’efficienza fotosintetica ottimale. Le piante utilizzano prevalentemente tre meccanismi di raffrescamento: il raffrescamento radiativo, con l’emissione di radiazione secondo la legge di Stefan-Boltzmann, il raffrescamento sensibile, dato dalla differenza di temperatura tra la foglia e l’aria ambiente, e il raffrescamento latente, che prevede l’evaporazione dell’acqua presente nella pianta. Il rilascio di acqua, anche detto traspirazione, avviene in maniera più pronunciata nelle piante C_3, rispetto che nelle piante C_4, per effetto del diverso meccanismo di fotosintesi: per questo, le piante C_3 sono più suscettibili alla scarsità d’acqua e prediligono climi temperati. Inoltre, un aumento di temperatura comporta una maggiore fotorespirazione nelle piante C_3, con una conseguente riduzione dell’attività fotosintetica, mentre rimane pressoché costante nelle piante C_4.

È possibile poi che una pianta riceva troppa radiazione. Per evitare il danneggiamento dell’apparato fotosintetico, le piante cercano innanzitutto di dissipare il surplus tramite diversi meccanismi, tra cui la dissipazione di calore, la modifica dell’orientamento dei cloroplasti o i movimenti delle foglie. Se questi meccanismi non sono sufficienti e il numero di fotoni assorbiti risulta eccessivamente alto, è possibile che si abbia fotoinibizione, la quale può essere dinamica o cronica. La fotoinibizione dinamica è temporanea e può avvenire giornalmente nei momenti di massima radiazione solare. La fotoinibizione cronica, invece, comporta un danneggiamento permanente dell'apparato fotosintetico e una riduzione dell’attività fotosintetica. L’effetto della fotoinibizione è particolarmente evidente alle basse temperature [5].

La tecnologia fotovoltaica

L'effetto fotovoltaico permette la conversione diretta di energia luminosa in energia elettrica; in particolare, una cella fotovoltaica sfrutta la radiazione solare per generare una corrente continua.

Questo effetto è stato dimostrato per la prima volta nel 1839 dal fisico francese Edmond Becquerel, il quale osservò una differenza di potenziale tra due elettrodi di una cella elettrolitica, quando uno di questi era esposto alla luce. In seguito, la tecnologia si è evoluta, fino alla creazione della prima cella fotovoltaica nel 1954, presso i laboratori Bell, nel New Jersey: si trattava di una cella in silicio, con un'efficienza del 6% ed un costo di circa 300$/W. Oggi, i progressi tecnologici hanno portato ad un aumento dell'efficienza delle celle e ad una crescente riduzione dei costi di produzione, ma la scienza alla base del fenomeno è rimasta la stessa.

L'effetto fotovoltaico avviene in presenza di una giunzione p-n (Fig. 1.5), formata dall'accostamento di due semiconduttori, uno cosiddetto drogato p (drogato con atomi che hanno un elettrone di valenza in meno) e uno drogato n (drogato con atomi che hanno un elettrone di valenza in più); tale accostamento comporta la diffusione delle cariche maggioritarie, le lacune nel tipo-p e gli elettroni nel tipo-n, verso la giunzione. Alla giunzione, le cariche si ricombinano, creando una zona con carica positiva nel tipo-n e una con carica negativa nel tipo-p, il che forma un campo elettrico alla giunzione, generando un potenziale che può influire sui liberi portatori di carica all'interno del materiale.

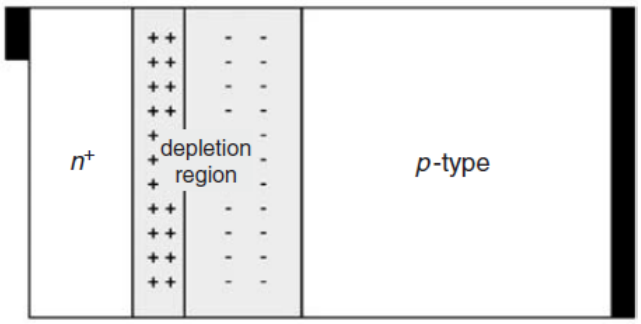

Figura 1.5 Rappresentazione schematica di una giunzione p-n [6]

La fotogenerazione avviene in due fasi:

- una prima fase, in cui il materiale assorbe un fotone sufficientemente energetico da promuovere un elettrone, creando una coppia elettrone-lacuna;
- e una seconda, in cui l'elettrone e la lacuna migrano per diffusione verso la giunzione, dove il campo elettrico devia l'elettrone verso il polo negativo e la lacuna verso il polo positivo.

In assenza di contatti metallici, o in condizioni di circuito aperto, le cariche si accumulano agli estremi del materiale, andando a generale un potenziale massimo, detto tensione a vuoto o tensione di circuito aperto (V_{oc}). La presenza di contatti metallici permette di chiudere il circuito e di far circolare una corrente, il cui valore massimo è dato dalla corrente di cortocircuito (I_{sc}) [7].

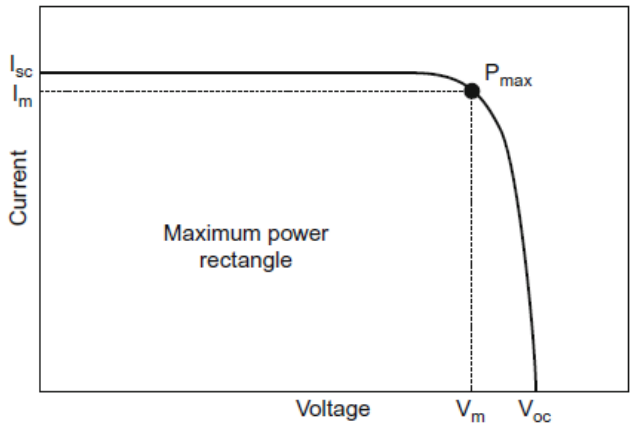

Figura 1.6 Curva caratteristica di una cella fotovoltaica [8]

La relazione tra tensione e corrente è espressa dalla curva caratteristica della cella (Fig. 1.6). Ad ogni punto della curva corrisponde un valore di potenza: la potenza massima generata da una cella è data dal massimo prodotto tra tensione (V_m) e corrente (I_m), mentre in condizioni di circuito aperto e di cortocircuito la potenza estratta dalla cella è nulla. Un indicatore dell'efficienza di una cella fotovoltaica è il fattore di forma, espresso come il rapporto tra la potenza massima e il prodotto tra tensione a vuoto e corrente di cortocircuito, come:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}}$$

L'efficienza di una cella fotovoltaica è legata a diversi fattori [6]:

- Proprietà ottiche all'interfaccia:

  Quando la luce incide su una superficie, questa può essere riflessa, assorbita o trasmessa. Nel caso di una cella fotovoltaica, è opportuno massimizzare l'assorbimento, quindi minimizzare la riflessione e la trasmissione. Ciò può essere fatto in diversi modi:

  - Testurizzazione della superficie anteriore: permette di aumentare la probabilità di assorbimento facendo in modo che il raggio riflesso possa incidere nuovamente sul materiale.
  - Testurizzazione della superficie posteriore: aumenta la possibilità di assorbimento per riflessione totale, allungando la distanza percorsa dal raggio all'interno del semiconduttore.
  - Rivestimento antiriflesso e armonizzazione del coefficiente di rifrazione: permette di ridurre la riflessione sfruttando le proprietà ottiche del vetro e di un materiale antiriflesso. Lo spessore del rivestimento antiriflesso è ottimizzato per un'unica lunghezza d'onda, per la quale si ha riflessione pressoché nulla; le altre lunghezze d'onda hanno riflessione ridotta ma non nulla.

- Specchio posteriore: usato riflettere la luce dentro il semiconduttore, aumentando la distanza percorsa e la possibilità che venga assorbita dal materiale.

- Efficienza quantica:

  È definita come il numero di coppie elettrone-lacuna per il numero di fotoni incidenti sulla superficie. L'assorbimento della luce, secondo la legge di Lambert-Law, dipende dallo spessore del materiale e dal coefficiente di assorbimento, il quale a sua volta dipende dalla lunghezza d'onda del fotone incidente. Infatti, per essere assorbito e generare una coppia elettrone-lacuna, un fotone deve avere un'energia maggiore o uguale all'energy gap: in caso di un'energia minore, il fotone risulta trasparente al materiale e lo attraversa, mentre per fotoni più energetici, l'energia in eccesso viene rilasciata sottoforma di calore.

  I semiconduttori si dividono in due categorie:

  - Semiconduttori diretti: tendono ad avere coefficienti di assorbimento alti, il che permette di avere spessori di cella ridotti (thin film). Tuttavia, il coefficiente crolla per fotoni meno energetici e quindi si ha una banda spettrale di assorbimento ridotta.
  - Semiconduttori indiretti: hanno coefficienti di assorbimento mediamente minori rispetto ai diretti, per cui sono necessari spessori di cella maggiori (thick film). D'altra parte, riescono ad assorbire fotoni con un'energia minore dell'energy gap, quindi lo spettro di fotoni che possono assorbire è più grande.

Il fatto che non si riesca a sfruttare l'intero spettro fotonico causa una forte perdita di potenza nella cella e per questo sono state introdotte celle multi-giunzione, con diversi energy gap per assorbire una più vasta sezione di spettro. Queste celle sono però molto costose e sono usate prevalentemente per applicazioni spaziali.

- Proprietà del materiale:

  Poiché la seconda fase della fotogenerazione prevede la migrazione di cariche minoritarie, vi è la possibilità che queste si ricombinino prima di arrivare alla giunzione e generare corrente. In generale, tale probabilità è maggiore nei semiconduttori di tipo-n, dove la carica minoritaria è la lacuna, la quale ha una mobilità minore rispetto all'elettrone, e, per questo motivo, nelle celle tradizionali (Silicio – Thick film) si ha che il semiconduttore di tipo-n, detto emettitore, è molto più sottile rispetto alla base, formata dal semiconduttore di tipo-n.

  Esistono tre meccanismi di ricombinazione ed il principale è legato alla presenza di difetti nel materiale, come impurità, atomi dopanti e difetti di superficie, che fungono da centri di ricombinazione. I difetti di superficie sono comuni a tutte le celle solari: per ridurli, è opportuno passivare sia la superficie anteriore che quella posteriore, attraverso un sottile strato di ossido. Inoltre, specialmente in corrispondenza della superfice posteriore, si effettua un drogaggio maggiore, che genera un nuovo potenziale (Back Surface Field) che respinge le cariche minoritarie. La quantità di difetti dipende sia dal tipo di semiconduttore considerato che dal metodo di lavorazione: il silicio monocristallino, per esempio, presenta meno difetti del silicio policristallino, il quale presenta difetti di interfaccia tra i singoli cristalli. Nel caso del silicio amorfo, che non presenta una struttura cristallina ordinata, i difetti dovuti a legami spaiati vengono passivati tramite atomi di idrogeno.

- Contatti metallici:

  In una cella fotovoltaica, sono necessari dei contatti metallici, sia sulla superficie anteriore (polo negativo) che sulla superficie posteriore (polo positivo) per permettere la circolazione di corrente. Poiché la presenza di contatti frontali riduce l'area di incidenza dei fotoni, coprendo parte della superficie assorbente, la loro geometria è il risultato di un'ottimizzazione

tra le perdite per ombreggiamento e le perdite di resistenza del conduttore. Per ridurre l'ombreggiamento frontale, è anche possibile avere contatti *buried* o contatti frontali posti nella parte posteriore, come avviene nelle celle IBC (Interdigitated Back Contact).

Oltre alle perdite ohmiche dei contatti metallici, vi sono anche delle perdite dovute alla resistenza di contatto tra il conduttore metallico e il semiconduttore. Queste possono essere ridotte attraverso il maggiore drogaggio dell'area di contatto.

Dunque, l'efficienza di una cella fotovoltaica dipende fortemente sia dalla sua geometria che dal materiale utilizzato. Nel 2022, l'efficienza di cella massima misurata in laboratorio è del 26,1% per il silicio monocristallino, del 24,4% per il silicio multicristallino e tra 23,4 e 21.0% per le tecnologie thin film [9].

I moduli fotovoltaici

Le celle fotovoltaiche hanno generalmente dimensioni di 15 x 15 cm, e potenza tra i 3 e i 5 W [7]. Poiché le celle sono caratterizzate da una bassa tensione e un'alta corrente, i moduli fotovoltaici sono formati da celle poste in serie tramite contatti metallici, per aumentare la tensione mantenendo costante la corrente. È importante che le celle abbiano le stesse caratteristiche, in modo da evitare perdite di mismatch interne al modulo. Attualmente, i moduli più potenti superano i 600 W, mentre in commercio si trovano prevalentemente moduli tra i 300 W e i 450 W [9].

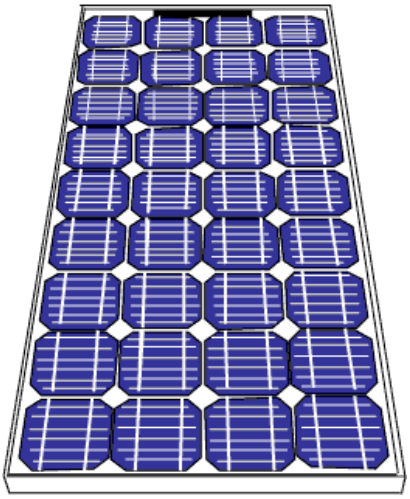

Figura 1.7 Tipica struttura di un modulo fotovoltaico monocristallino [7]

I materiali più utilizzati per la produzione di moduli fotovoltaici sono il silicio monocristallino (80% della produzione globale), seguito dal silicio multicristallino (15%) e infine dai materiali per le celle thin film (5%). L'efficienza di un modulo fotovoltaico dipende fortemente dalla tecnologia utilizzata: i moduli fotovoltaici in silicio cristallino presenti in commercio hanno efficienze che variano dal 16,4%, per celle traduzionali, al 22,4%, per celle innovative [9].

I valori di efficienza indicati fanno riferimento a prove in condizioni standard, ovvero con un'irradianza di 1 kW/m^2, una temperatura di modulo di 25°C e spettro AM1.5. Tuttavia, per la maggior parte del tempo, il modulo opera in condizioni non standard e le sue prestazioni sono strettamente legate alle condizioni ambientali, quali l'irraggiamento e la temperatura. [10]

All'aumentare dell'irraggiamento, aumenta la quantità di fotoni che incidono sulla superficie del pannello e, in proporzione, la quantità di fotoni assorbiti. Per questo si ha un sostanziale aumento di corrente di cortocircuito, che, unito ad un leggero aumento di tensione di circuito aperto, comporta un aumento della potenza.

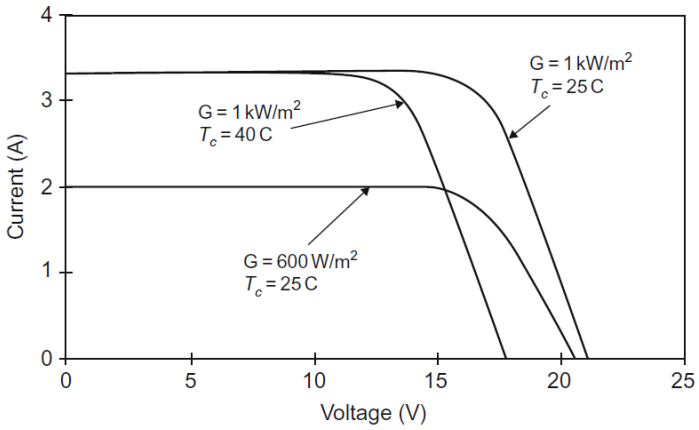

Figura 1.8 Curve caratteristiche di un modulo fotovoltaico al variare dell'irraggiamento e della temperatura di cella [8]

All'aumentare della temperatura, aumenta la concentrazione di cariche libere all'interno del semiconduttore, che causa una riduzione della tensione a vuoto. D'altra parte, la maggiore temperatura riduce leggermente l'energy gap, permettendo l'assorbimento di fotoni in uno spettro più ampio e aumentando leggermente il valore di corrente di cortocircuito. Tuttavia, tale aumento non è sufficiente a contrastare la riduzione di tensione, perciò la potenza decresce all'aumentare della temperatura [7].

Moduli monofacciali

Sono moduli fotovoltaici tradizionali, con una sola faccia assorbente, quella anteriore, mentre quella posteriore è opaca e non è attiva nella produzione energetica.

Le celle fotovoltaiche sono inserite in una struttura protettiva a strati, che conferisce rigidità, fornisce protezione da agenti atmosferici e dagli impatti, e garantisce l'isolamento elettrico.

La struttura è composta da:

- Vetro: a basso tenore di ferro, in modo che abbia un'alta trasmittanza; ha generalmente uno spessore di 3-4 mm e conferisce anche la rigidità al pannello.
- Film incapsulante: un composto polimerico trasparente e chimicamente stabile, che garantisce l'isolamento elettrico delle celle. I materiali più usati sono l'EVA (Ethylene Vinyl Acetate) e il POE (PolyOlefin Elastomer) e il PVB (PolyVinyl Butyral).
- Celle: diverse a seconda della tecnologia usata.
- Film incapsulante.
- Strato opaco anteriore: generalmente composto da uno o più strati polimerici, tra cui il tedlar, un fluoropolimero estremamente durevole, resistente alla temperatura e con alta riflettività.

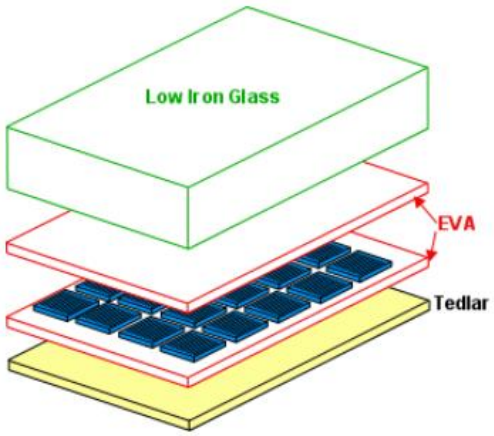

Figura 1.9 Tipica stratificazione dei materiali in un modulo fotovoltaico [7]

Una cornice, solitamente in alluminio, tiene insieme i vari strati. Per permettere la connessione elettrica delle celle con l'esterno, viene posta una scatola di giunzione sul retro del pannello.

Moduli bifacciali

Le prime ricerche sul fotovoltaico bifacciale risalgono agli anni Sessanta mentre la prima produzione di moduli bifacciali commerciali ebbe inizio nel 1984, presso una compagnia spagnola chiamata ISO-FOTON [11]. Negli anni, i moduli bifacciali si sono conquistati una fetta di mercato sempre maggiore, fino ad arrivare a circa il 50% nel 2021, valore che si prospetta superi l'80% nel 2032 [12].

Come suggerisce il nome, i moduli bifacciali si differenziano da quelli monofacciali per il fatto che entrambe le facce, sia l'anteriore che la posteriore, partecipano alla produzione energetica. Ciò è possibile grazie a celle fotovoltaiche avanzate per le quali sono sufficienti contatti metallici posteriori localizzati, permettendo quindi l'assorbimento di fotoni anche nel retro dei moduli. È necessario sottolineare che la parte posteriore dei moduli è generalmente meno efficiente rispetto alla parte frontale e il rapporto tra l'efficienza della parte posteriore e quella anteriore è espresso attraverso il fattore di bifaccialità. Attualmente, i moduli in commercio hanno fattori di bifaccialità che vanno dallo 0,7 allo 0,9 a seconda della tecnologia impiegata. [12].

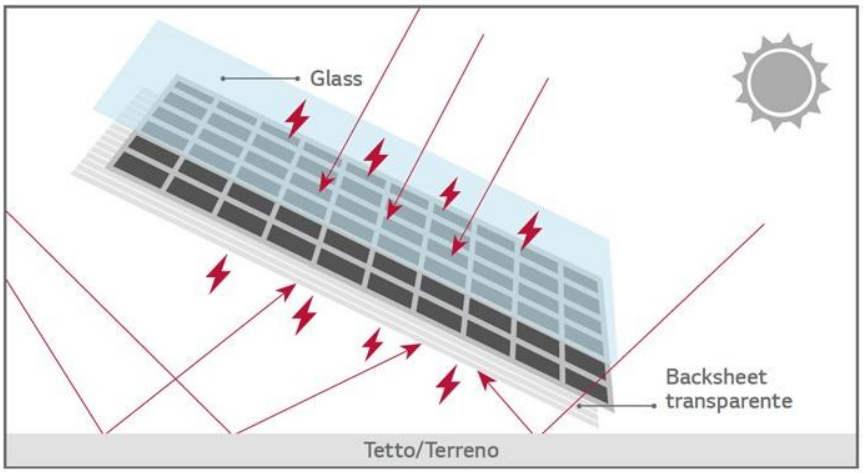

Figura 1.10 Funzionamento di un modulo bifacciale [Fonte: LG]

Per permettere la bifaccialità, la tradizionale struttura a strati del modulo fotovoltaico viene leggermente modificata: infatti, lo strato opaco posteriore viene sostituito con uno strato di vetro, che può essere totalmente trasparente o con mesh opache nelle porzioni di superficie non attive nell'assorbimento. Vista la struttura vetro-vetro, la scatola di giunzione ha una forma allungata per minimizzare l'ombreggiamento delle celle.

L'aumento di produttività di un sistema bifacciale rispetto ad uno monofacciale con le stesse caratteristiche è detto *bifacial gain*; infatti, rispetto ai tradizionali moduli monofacciali, adottare moduli bifacciali può aumentare la produttività di un impianto del 15% nel caso di strutture fisse, e fino al 35% per sistemi di tracking a singolo asse. [13]. Tale aumento è caratteristico del singolo impianto e dipende da fattori esterni, come l'albedo della superficie sottostante, e interni, come l'altezza di installazione dei moduli [14].

Moduli semitrasparenti

I moduli semitrasparenti prevedono la trasmissione di una porzione della radiazione incidente. Si tratta di tecnologie innovative, disponibili solo presso alcuni produttori specializzati; sono utilizzate soprattutto nell'ambito dell'integrazione di moduli fotovoltaici negli edifici, ma presentano un interessante potenziale anche per le applicazioni agrivoltaiche.

È possibile dividere i moduli trasparenti in commercio in due categorie:

- Moduli con celle fotovoltaiche opache: prevedono una maggiore distanza tra le file di celle all'interno dello stesso modulo (Fig. 1.11); a parità di superficie del modulo, maggiore la distanza tra le file, maggiore è la trasparenza ma minore è la potenza del modulo. In questa categoria, rientrano anche moduli con celle fotovoltaiche dalle forme particolari, come le celle sferiche della Sphelar Power (Fig.1.12).

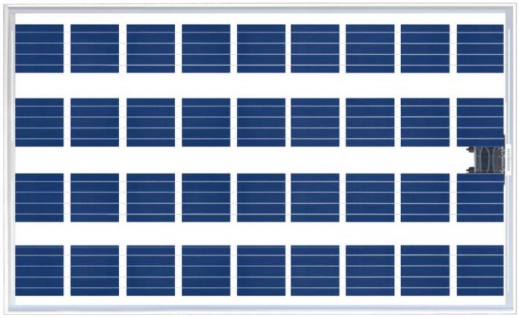

Figura 1.11 Modulo fotovoltaico trasparente con celle opache [Fonte: VGS]

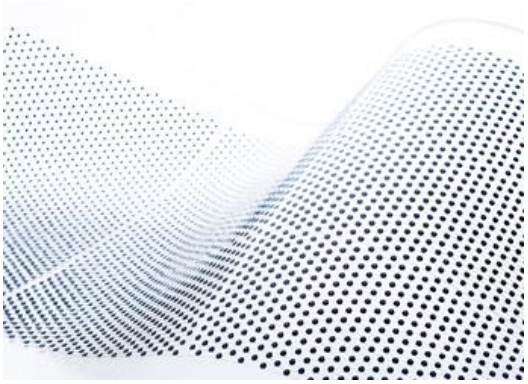

Figura 1.12 Fotovoltaico sferico SPHELAR® BIPV [Fonte: Sphelar Power]

- Moduli con celle fotovoltaiche semitrasparenti: si tratta di celle thin film, come le celle organiche sviluppate da ASCA® (Fig.1.13), che garantiscono una trasparenza fino al 20%. Anche in questo caso, la trasparenza è ottenuta a spese della resa energetica.

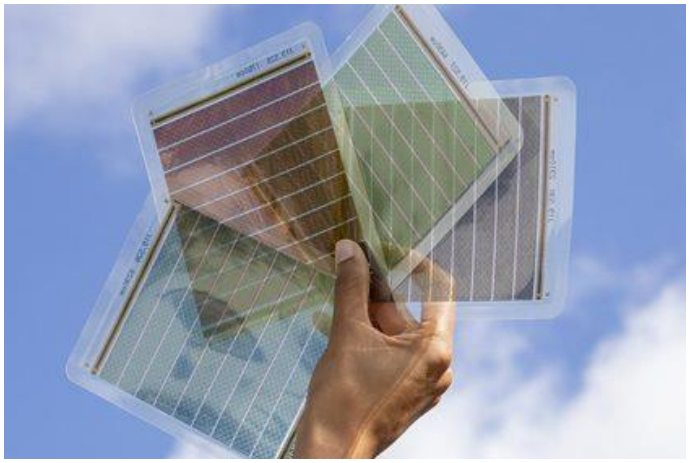

Figura 1.13 Esempi di celle fotovoltaiche trasparenti [Fonte: ASCA®]

Moduli innovativi per l'agrivoltaico

Sono pannelli fotovoltaici sviluppati con l'idea di essere applicati a sistemi agrivoltaici. Se ne citano due, in particolare:

- Moduli Insolagrin: prodotti dalla Insolight, sono moduli fotovoltaici che si basano sulla tecnologia THEIA (Translucency and High Efficiency in Agrivoltaics) e forniscono un ombreggiamento dinamico con strutture statiche (Fig.1.14). Le particolarità di questo modulo sono due: da un lato, le file di celle fotovoltaiche sono molto strette e sono alternate da file trasparenti di uguale dimensione e, dall'altro, nella parte frontale del modulo vi sono delle lenti, che possono essere adattate per massimizzare la produzione elettrica o massimizzare la trasmissione della luce al suolo, a seconda delle necessità. Attualmente, vi sono otto impianti pilota che sfruttano questa tecnologia, tra cui anche uno in Italia, sviluppato in collaborazione con ENEA e l'Università degli Studi di Napoli [15].

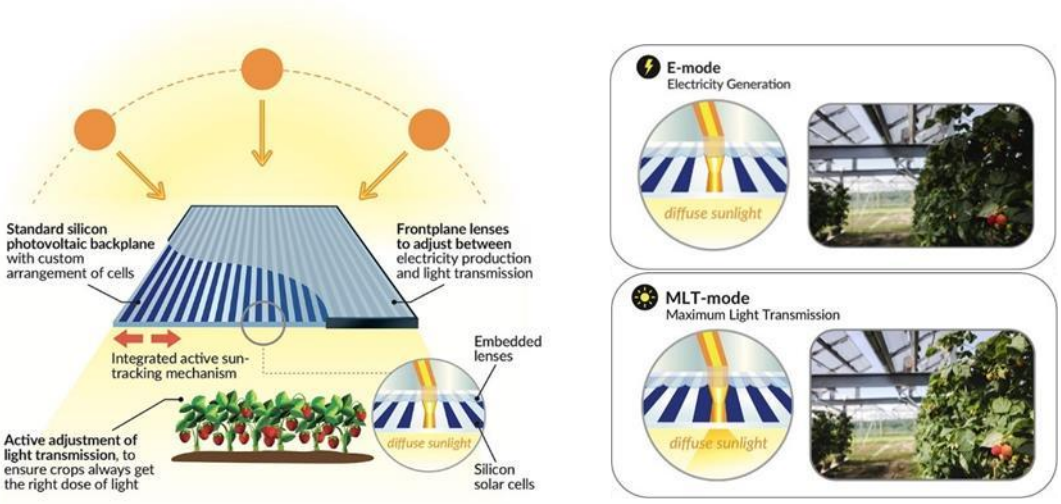

Figura 1.14 La tecnologia Insolagrin [15]

- Moduli tubolari: prodotti dalla TubeSolar AG, sono formati da strisce fotovoltaiche flessibili, incapsulate in tubi di vetro. Secondo il produttore, si tratta di moduli leggeri, auto-pulenti e facili da installare. Inoltre, la struttura a tubi garantisce una buona trasmissione della luce e una ottimale distribuzione dell'acqua piovana alla vegetazione sottostante; per questo sono stati definiti il futuro del fotovoltaico agricolo [16].

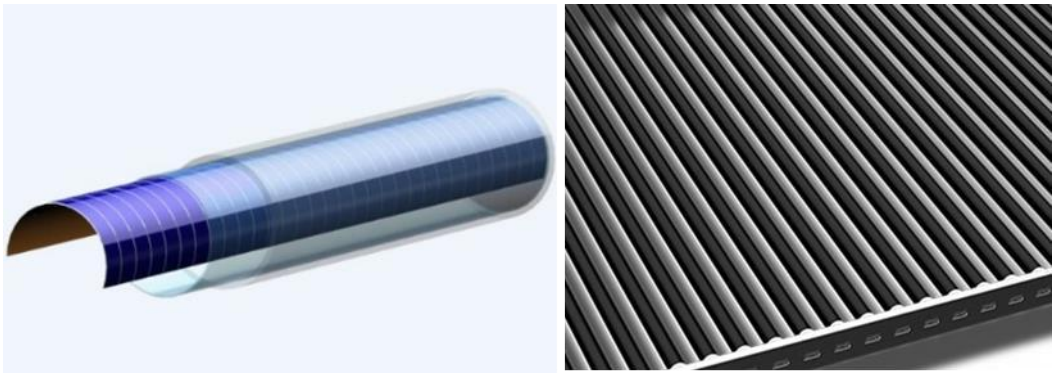

Figura 1.15 La tecnologia TubeSolar per moduli tubolari [16]

Capitolo 2. L'agrivoltaico

La definizione di agrivoltaico

Nel 2011, la potenza fotovoltaica installata a livello mondiale era pari a 72 GW, mentre nel 2021, dieci anni dopo, tale valore è più che decuplicato, arrivando a 843 GW [2]. L'aumento della potenza fotovoltaica installata, però, comporta un aumento dell'utilizzo del suolo ai fini energetici; considerando i trend di crescita attesi, si prevede che la filiera energetica rinnovabile, dalla produzione allo stoccaggio, sarà responsabile per gran parte dell'occupazione del suolo nel corso del XXI° secolo, il che può diventare un problema non solo per l'evoluzione del landscape, ma anche per la competizione con il settore agricolo per l'uso del suolo [17].

Il concetto di agrivoltaico è stato introdotto per la prima volta nel 1982, come alternativa ai classici impianti fotovoltaici a terra, per affrontare il problema della competizione per l'uso dei terreni tra il settore agricolo e il settore energetico [18]. Gli impianti rinnovabili, e nello specifico gli impianti fotovoltaici, hanno infatti una minore densità energetica rispetto ai tradizionali impianti a fonti fossili, ovvero necessitano di grandi superfici per produrre la stessa quantità di energia. Tali superfici possono essere ricavate sfruttando i tetti di edifici residenziali e non ma, nel caso di grandi impianti, la soluzione più efficiente è rappresentata da impianti a terra, con la conseguente riduzione della superficie libera di un territorio e la modifica dell'identità del paesaggio [17].

Se l'idea alla base dell'agrivoltaico è semplice, ovvero progettare impianti fotovoltaici su terreni agricoli in modo da non compromettere l'attività agricola stessa, dare una vera e propria definizione di agrivoltaico risulta più complesso. Lo stesso termine *agrivoltaico* non è il solo usato per descrivere la stessa tecnologia: in Italia sono diffusi anche i termini *agrovoltaico* e *agro-fotovoltaico*; in

inglese si utilizzano *agrivoltaics* o *agro-photovoltaics*, in tedesco *agri-photovoltaik*, in francese *agrivoltaïque*, *agrivoltaïsme* o *agri-photovoltaïsme*, mentre in Giappone si parla di *solar sharing*.

Per fare chiarezza, è necessario innanzitutto distinguere i concetti di agrivoltaico e agrisolare. Il termine *agrisolar* viene definito dalla SolarPower Europe come:

"*the integration of solar photovoltaic projects within an agricultural activity*" [19]

Ovvero si riferisce ad un insieme di applicazioni più ampie rispetto al solo agrivoltaico. In Italia, il termine agrisolare fa riferimento, nello specifico, all'installazione di pannelli fotovoltaici sui tetti di edifici, come capannoni agricoli, per la riqualificazione delle strutture produttive e la riduzione dei consumi energetici del settore agroalimentare [20].

D'altra parte, alcune definizioni di agrivoltaico presenti in letteratura sono riportate in seguito:

"*Con il termine agro-fotovoltaico (abbreviato AFV) si indica un settore, ancora poco diffuso, caratterizzato da un utilizzo "ibrido" dei terreni agricoli tra produzione agricola e produzione di energia elettrica, attraverso l'installazione, sullo stesso terreno coltivato o adibito ad allevamento, di impianti fotovoltaici*" [21]

"*Agrivoltaic systems (or Agri-PV) are Agrisolar solutions where a PV installation and a sustainable agricultural activity are co-located, and light management is performed*." [19]

"*L'utilizzo combinato della medesima superficie di terreno per la produzione agricola come destinazione d'uso primaria e per la produzione di energia elettrica tramite un impianto fotovoltaico come destinazione d'uso secondaria.*" [22]

Da queste definizioni emergono diversi concetti fondamentali: l'utilizzo duale dei terreni per la produzione combinata di energia e prodotti agricoli, l'importanza della gestione della luce al di sotto dei moduli fotovoltaici, ed il mantenimento dell'attività agricola come attività principale, mentre la produzione energetica è secondaria. In effetti, uno degli obiettivi che l'agrivoltaico si pone è quello di valorizzare il settore agricolo, rendendolo non solo più innovativo, ma anche più resiliente. Per quanto riguarda la gestione della luce, l'idea di agrivoltaico si avvicina a quella dell'agroforestazione, una tecnica di coltivazione tradizionale per il quale si affiancano a colture alimentari o pascoli, delle specie arboree per fornire ombra e creare sistemi produttivi sinergici [23]. Nel caso dell'agrivoltaico, la sinergia avviene tra la produzione agricola e la produzione energetica, e rappresenta una spinta rilevante verso la riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra del settore energetico, verso la promozione di pratiche agricole sostenibili e verso lo sviluppo rurale. [19].

Le applicazioni agrivoltaiche

Il settore agricolo è uno dei settori più vulnerabili al cambiamento climatico, il che può mettere a rischio la sicurezza alimentare del pianeta, intesa come la disponibilità e la possibilità di accedere ad una sufficiente quantità di cibo di qualità per una vita sana. A causa del riscaldamento globale, si prevede una perdita di territori coltivabili dovuta all'innalzamento del livello del mare e ad una maggiore diffusione della salinizzazione, contemporaneamente ad una riduzione della quantità d'acqua disponibile per l'irrigazione e l'aumento di eventi atmosferici estremi, come periodi di siccità alternati a forti piogge. L'aumento di temperatura avrà quindi effetti sulla produttività delle piante, influenzando la loro domanda d'acqua e le condizioni del suolo, e sui modelli di produzione agricola, con un aumento della richiesta di fertilizzanti e pesticidi [1].

L’agrivoltaico rappresenta quindi una potenziale soluzione per attenuare lo stress climatico e migliorare l’efficienza d’uso dell’acqua delle piante, attraverso l’ombreggiamento controllato delle colture.

I sistemi agrivoltaici possono essere applicati a tutti i sottosettori agricoli, tra cui si individuano in particolare l’acquacoltura, l’apicoltura, l’allevamento, e, naturalmente, l’agricoltura.

L’acquacoltura è l’insieme di pratiche per la produzione controllata di organismi acquatici, come pesci, molluschi, crostacei e alghe [24]. Le applicazioni cosiddette acquavoltaiche (*acquavoltaics*) presentano un grandissimo potenziale e ammettono diverse configurazioni, come quelle formate da moduli alti, montati su delle strutture fisse poste al di sopra dell’area di coltivazione, e i moduli flottanti, che sono a contatto, diretto o indiretto con la superficie dell’acqua.

Figura 2.1 Esempio di applicazione acquavoltaica [Fonte: Akuo Energy]

È stato dimostrato che la presenza di moduli fotovoltaici flottanti riduce fino all’85% l’evaporazione in riserve idriche e l’effetto raffrescante dell’acqua porta ad un aumento della produttività dei moduli fino al 30%, aumentandone la competitività della tecnologia [25].

L'apicoltura è uno dei settori agricoli che più si presta alle applicazioni agrivoltaiche, tantoché è possibile retro fittare impianti esistenti o in via di costruzione per permettere l'uso condiviso del suolo, che diventa un habitat per api e insetti impollinatori. L'aumento delle specie impollinatrici porta grandi benefici per le coltivazioni nelle vicinanze di parchi solari, specialmente nel caso di prodotti che dipendono fortemente dall'impollinazione animale [26], come alberi da frutto e frutti di bosco, il che si può tradurre in guadagni economici anche molto importanti [27]. Nella maggior parte del mondo, mentre il numero di api, tra cui la più nota *Apis Mellifera*, risulta stabile o crescente, grazie alle campagne di sensibilizzazione e alle eventuali agevolazioni economiche, il numero di insetti impollinatori è in declino a causa dei pesticidi, della degradazione degli ecosistemi e del cambiamento climatico. Poiché circa il 75% delle colture alimentari, a livello mondiale, fanno affidamento sull'impollinazione animale, risulta evidente come la preservazione delle specie impollinatrici sia di fondamentale importanza [28]. Nei sistemi agrivoltaici, è stato osservato che vi sono più impollinatori e più fiori sotto i moduli che attorno ad essi e che si allunga il periodo di fioritura prima dell'inverno, aumentando quindi la produzione di miele [29].

Figura 2.2 Esempio di applicazione agrivoltaica all'apicoltura [Fonte: Byron Kominek]

L'unione tra fotovoltaico e allevamento è anche detto *rangevoltaics* ed è una delle applicazioni agrivoltaiche più diffuse al mondo, spesso in concomitanza con l'apicoltura. L'intensità della radiazione solare influenza fortemente lo stato di salute degli animali allevati in campo aperto: è stato dimostrato che, con un'irradianza maggiore di 800 W/m^2, valore tipico dei climi tropicali, l'elevato stress termico causa una forte riduzione del benessere degli animali, riducendone la produttività e portando ad una perdita economica. Uno dei meccanismi di protezione dallo stress termico è la ricerca d'ombra, la quale può essere fornita dai moduli fotovoltaici. I benefici della presenza di fonti d'ombra sono stati dimostrati sia per i bovini che per gli ovini. In particolare, nel caso ovino, è stato osservato che gli animali passavano il 61% del tempo al sole, l'1% al di sotto di un telo ombreggiante (riduzione dell'80% della radiazione incidente) e il 38% all'ombra dei moduli fotovoltaici; nei periodi in cui l'irradianza era maggiore o uguale a 800 W/m^2 la percentuale di tempo passato sotto i pannelli aumentava all'80%, il che prova non solo l'utilità delle fonti d'ombra nell'area di pascolo ma anche la preferenza degli ovini per l'ombra generate dai moduli rispetto a quella generata da un telo [30].

Figura 2.3 Esempio di applicazione agrivoltaica all'allevamento ovino [Fonte: Temple University]

Inoltre, studi preliminari mostrano come la lana di pecore allevate in sistemi agrivoltaici mantenga la sua qualità, anche in periodi di siccità. Infatti, la presenza dei moduli favorisce la crescita concentrata dell'erba da pascolo anche in periodi di siccità grazie al fatto che la condensa e le piogge lievi vengono indirizzate dai pannelli verso una singola striscia di terra (Fig. 2.4). I moduli possono anche essere sfruttati per la divisione dell'area di pascolo, utile per il *cell grazing*, una pratica agricola che prevede di far pascolare il bestiame su piccole porzioni di terreno alla volta [29].

Figura 2.4 Effetto di un impianto agrivoltaico in condizioni climatiche aride [29]

L'agricoltura è il settore di maggior interesse per le applicazioni agrivoltaiche e anche quello che pone maggiori sfide dal punto di vista del design. Se nel caso dell'apicoltura e dell'allevamento, infatti, si hanno animali che possono muoversi per cercare o evitare l'ombra, nel caso dell'agricoltura è necessario studiare attentamente l'evoluzione della proiezione delle ombre al suolo per preservare l'integrità e soprattutto la qualità delle colture.

Le coltivazioni possono essere classificate in colture permanenti-pluriennali e in colture annuali-biennali: le prime includono prevalentemente specie arboree, come vite, alberi da frutto, alberi da agrumi e frutti di bosco, che hanno un alto

valore economico e richiedono protezione dagli agenti atmosferici [31]; le seconde comprendono la maggior parte delle colture erbacee, siano coltivazioni cerealicole, orticole, leguminose, foraggere o prative temporanee, che generalmente hanno un basso valore economico e per le quali i processi di semina e raccolta sono fortemente meccanizzati [32]. Dal punto di vista tecnico-economico, per le applicazioni agrivoltaiche si raccomanda di evitare la rotazione stagionale delle colture, mentre si prediligono coltivazioni permanenti poste in filari, in quanto i supporti alle strutture possono essere integrati senza ridurre l'area coltivabile e comportano costi minori [31].

D'altra parte, ogni coltura è potenzialmente adatta ad un'applicazione agrivoltaica, proprio perché è il sistema stesso ad essere progettato attorno alla coltivazione. Poiché il principale effetto della presenza di moduli fotovoltaici nei campi agricoli è la riduzione di radiazione incidente al suolo, vi è un grande interesse per le piante dette *shade-tolerant*, ovvero che si adattano a condizioni d'ombra mantenendo un'alta efficienza fotosintetica; la tolleranza all'ombra di una specie può essere dedotta dal suo punto di saturazione della luce. Alcune piante *shade-tolerant* sono: erba medica, rucola, broccolo, bietola, luppolo, lattuga, spinaci, patate dolci, prezzemolo e scalogno che ammettono un'ombra semi-totale; fagiolo, carota, cavolfiore, corianolo e cipolla che invece necessitano di luce moderata; infine, è noto che i funghi prediligono ambienti poco illuminati [33]. Tuttavia, molti prodotti commerciali, come cavolo, mais, cetriolo, zucca, riso, pomodoro, rapa e anguria, sono invece classificati come *shade-intolerant*, in quanto hanno un punto di saturazione della luce elevato. Pensare di limitare le applicazioni agrivoltaiche solo alle specie *shade-tolerant* porta ad escludere una notevole fetta di mercato: è utile quindi portare avanti ulteriori studi sulla fattibilità delle applicazioni agrivoltaiche anche per piante *shade-intolerant* [34]. Attualmente, tra le piante più comunemente coltivate in sistemi agrivoltaici vi sono le verdure a foglia verde, come la lattuga [35] e gli spinaci, le patate, i

legumi, i pomodori, gli alberi da frutto (pomacee, come meli e peri, e drupacee, come peschi e mandorli), i frutti di bosco e la vite [33]; solo in Giappone, vengono coltivate più di 120 specie diverse con sistemi agrivoltaici [34].

Figura 2.5 Esempio di applicazione agrivoltaica all'agricoltura [Fonte: Hyperion Systems]

I metodi di classificazione e lo stato dell'arte degli impianti

Negli ultimi dieci anni, le installazioni agrivoltaiche sono quasi triplicate, in termini di potenza complessiva installata, passando da 5 MW nel 2012 a 14 GW nel 2021, anche grazie alla spinta data dalle policy energetiche in diversi paesi come Giappone, Cina, Francia, Stati Uniti e Corea del Sud [36]. Per quanto riguarda le grandezze dei singoli impianti, si passa da sistemi piccoli, tra 30 kW e 120 kW, tipici del Giappone, in cui si prediligono sistemi snelli e facilmente smantellabili, a sistemi molto grandi, da centinaia di MW, come quelli presenti in Cina [31].

Se la tecnologia fotovoltaica è simile, se non identica, a quella usata in altre installazioni, l'unicità delle applicazioni agrivoltaiche risiede nella struttura di

supporto dei moduli e nel design dell'impianto, in quanto deve essere pensato per garantire la continuità dell'attività agricola.

Una prima distinzione può essere fatta tra sistemi chiusi e sistemi aperti: i sistemi chiusi vedono l'applicazione di moduli fotovoltaici a strutture esistenti chiuse, come le serre, mentre nei sistemi aperti i moduli si trovano direttamente sopra o accanto alle colture. In entrambi i casi, è necessario prestare particolare attenzione al pattern di ombreggiamento dovuto ai moduli, ma vista la maggiore varietà di impianti e la maggiore sfida dal punto di vista tecnologico, questa tesi verterà prevalentemente sui sistemi aperti.

Nell'ambito dei sistemi aperti, è possibile classificare le strutture a seconda di due criteri: la flessibilità e l'altezza dal suolo dei moduli.

Per quanto riguarda la flessibilità, le strutture agrivoltaiche si dividono in:

- Strutture fisse: non sono spostabili e le strutture sono costruite per durare almeno per il tempo di vita dell'impianto fotovoltaico, che è generalmente pari a 25 anni; sono le strutture più diffuse perché seguono la tradizionale idea di impianto fotovoltaico. Le strutture fisse possono essere statiche, con moduli generalmente orientati a sud con inclinazione fissa, o dinamiche, con un tracking solare monoassiale, generalmente ad asse orizzontale N-S, o biassiale. Gli impianti dinamici hanno un costo maggiore rispetto ai sistemi fissi e sono più sensibili ai venti, per cui necessitano di un'accurata analisi dei carichi in fase di progettazione [32]. D'altra parte, gli impianti dinamici permettono un migliore controllo sul microclima e sull'ombreggiamento generato dai moduli; per questo, gli impianti statici si trovano prevalentemente accoppiati con attività di allevamento e pascolo, in cui gli animali possono scegliere o meno di godere dell'ombra data dai moduli, mentre gli impianti dinamici sono particolarmente efficaci nel caso

di coltivazioni agricole, più sensibili ai pattern di ombreggiamento, in quanto è possibile modificare l'inclinazione dei pannelli a seconda della stagione e delle necessità della coltura.

- Strutture mobili: si tratta di strutture che possono essere completamente smontate, spostate e riassemblate in un'altra area, senza l'utilizzo di macchinari pesanti, quindi senza impattare sul suolo sottostante e sulle colture. Spostare una struttura può essere utile per favorire la produzione agricola: è il caso del sistema a rotaie proposto dall'Università Cattolica di Leuven (Katholieke Universiteit Leuven) per la coltivazione degli asparagi bianchi, una coltura generalmente coltivata sotto tunnel di plastica. L'idea si sviluppa in tre step: al momento della preparazione del terreno e della semina, i moduli sono ripiegati, per permettere il passaggio delle macchine agricole (Fig. 2.6); successivamente, i moduli vengono posti al di sopra delle file coltivate, per limitare la quantità di luce al fine di mantenere la colorazione bianca (Fig. 2.7); infine, i moduli vengono posti tra le file coltivate, in modo da ridurre l'ombreggiamento e prevenire la crescita di erbacce durante l'estate (Fig. 2.8) [37].

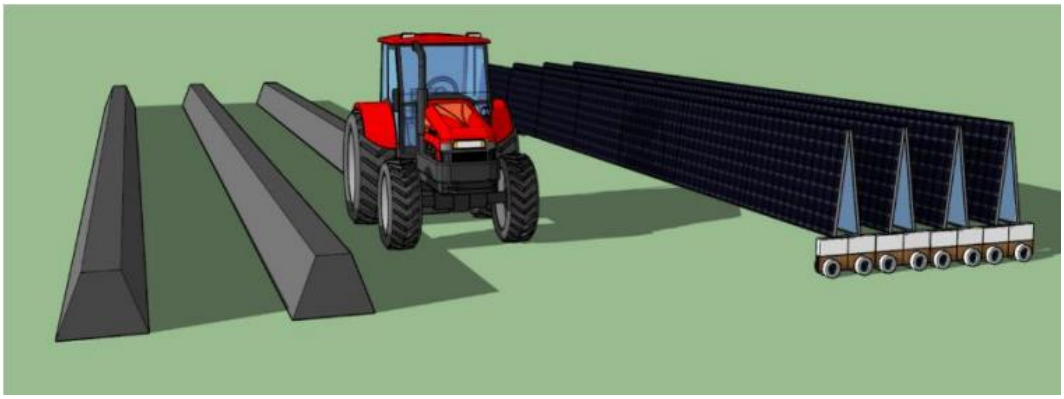

Figura 2.6 Posizione dei moduli durante la preparazione del terreno

Figura 2.7 Posizione dei moduli durante la crescita

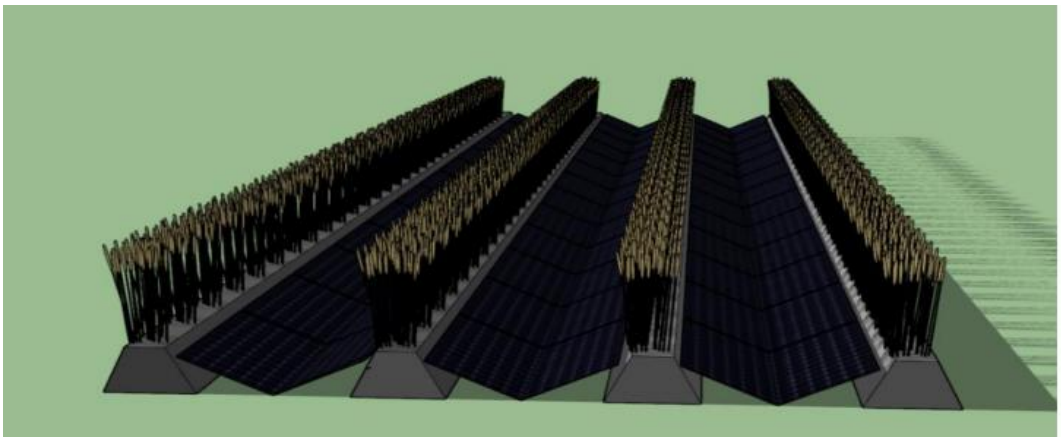

Figura 2.8 Posizione dei moduli in estate

Inoltre, una struttura mobile può risultare necessaria per soddisfare dei vincoli normativi: in Giappone, per esempio, prevede il rilascio di permessi e l'accesso ad una *Feed in Tariff* per l'agrivoltaico per un tempo tra i 3 anni e i 10 anni, a seconda del caso [38].

Un'altra interessante applicazione, apparentemente lontana dal concetto di agrivoltaico, è l'H2arvester, un sistema mobile, leggero, formato da una matrice di pannelli fotovoltaici che si muove autonomamente sui campi coltivati, senza interrompere l'attività agricola e sfruttando dualmente la terra, con un'occupazione massima del suolo del 10% per ettaro. Questo sistema prevede che l'energia generata sia convertita in idrogeno verde

direttamente all'interno dell'azienda agricola, dove può poi essere usato come combustibile in loco o rivenduto a terzi [39].

Figura 2.9 L'H2arvester [Fonte: H2arvester]

La classificazione in base all'altezza dei moduli verrà approfondita nei seguenti paragrafi, distinguendo tra i cosiddetti impianti alti e impianti bassi.

Impianti alti

Benché non vi sia una definizione unanime a livello internazionale, è possibile definire alte quelle strutture agrivoltaiche la cui altezza minima è maggiore di 2 m. In particolare, la norma tedesca pone l'altezza minima che distingue sistemi alti e sistemi bassi a 2,1 m [22]. La maggiore altezza di installazione dei moduli non dà particolari benefici dal punto di vista energetico, a meno dell'utilizzo di moduli bifacciali, mentre, dal punto di vista agricolo, ha numerosi vantaggi, tra cui la maggiore radiazione solare incidente direttamente al di sotto dei moduli, la possibilità di utilizzare dei macchinari agricoli sotto le strutture e, in assenza di meccanizzazione, si ha il miglioramento delle condizioni dei lavoratori, grazie all'ombra fornita dai moduli. Generalmente, l'altezza media di tali strutture varia tra i 3,5 e i 4,5 m, ma vi sono impianti con altezze maggiori, fino a 10 m.

L'aumento dell'altezza comporta maggiori difficoltà costruttive e maggiori costi di investimento, ma permette anche un maggiore Ground Coverage Ratio (GCR), che si traduce in una maggiore densità di potenza, in quanto la distanza tra le file di moduli è generalmente minore rispetto ai sistemi bassi. I sistemi alti sono indicati per qualsiasi tipo di applicazione agrivoltaica, e in particolare sono diffusi per la viticoltura e la frutticoltura, grazie alla protezione che offrono dalle intemperie.

Il primo brevetto per una struttura elevata per l'agrivoltaico è stato depositato in Giappone, nel 2005, da Akira Nagashima, in base all'esperienza nella fattoria solare del CHO Institute of Technology di Ichihara, nella prefettura di Chiba. La struttura è composta da tubi metallici e particolari pannelli stretti (1354 mm x 345 mm), elevati da terra ad un'altezza di 2,7 m ed inclinati di 30°, orientati a sud. I pannelli sono posti secondo due densità: una *high density*, con distanza tra le file di 0,71 m, per favorire la produzione fotovoltaica, e una *low density*, con distanza tra le file di 1,67 m, per aumentare l'apporto di luce al suolo. Nel complesso, l'impianto ha una potenza di picco di 4,5 kW, per 100 m^2, con una densità di potenza media di 0,45 MW/ha.

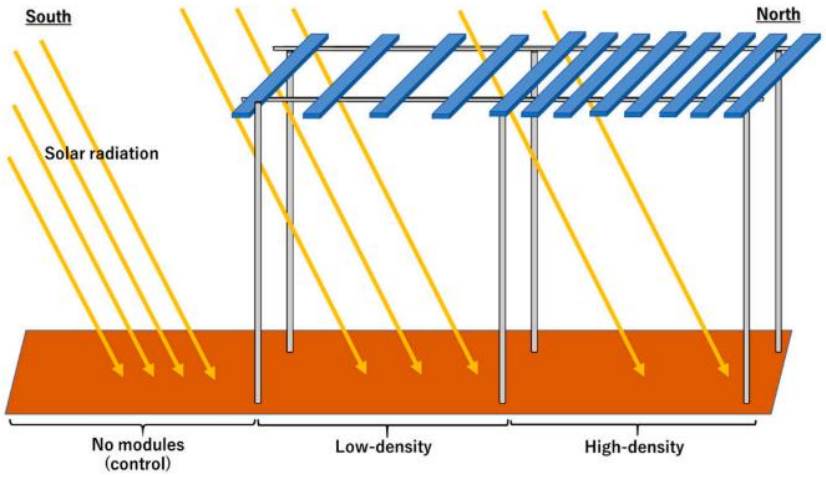

Figura 2.10 Layout schematico dell'impianto agrivoltaico di Ichihara [34]

Un esperimento condotto tra il 2017 e il 2018 ha mostrato come questo tipo sistema agrivoltaico sia particolarmente efficace per la produzione di mais, un tipo di pianta generalmente riconosciuto come *shade intolerant*. La configurazione a bassa densità è risultata quella con la più alta resa, con un aumento del 4,9% rispetto al lotto di controllo, mentre la configurazione a bassa densità ha visto una resa minore del 3,1% rispetto al controllo. Dal punto di vista energetico, la configurazione ad alta densità ha generato in un anno 2974 kWh, mentre quella a bassa densità 1487 kWh. Il vantaggio economico è evidente, in particolare nel caso a bassa densità, per cui si hanno maggiori entrate grazie al maggiore raccolto, a cui si somma la vendita della produzione elettrica [34].

Il primo impianto agrivoltaico sperimentale in Europa è stato costruito a Montpellier, in Francia, nel 2010, grazie alla collaborazione tra l'IRSTEA (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture) e Sun'Agri (Sun'R), una compagnia francese leader del settore. L'impianto (Fig. 2.11) è formato da due sezioni, una statica e una dinamica. La prima è formata da moduli statici tradizionali, disposti in configurazione *landscape*, di larghezza 0,8 m, rivolti a sud con un'inclinazione di 25° e posti ad un'altezza di 4 m dal suolo. L'impianto è diviso in due parti per testare due diverse distanze: una minima di 1,64 m (*full density*) per favorire la generazione energetica, e una doppia di 3.2 m (*half density*) per favorire invece la produzione agricola; le due soluzioni presentano una densità di potenza rispettivamente di 0,72 MW/ha e 0,36 MW/ha, e una riduzione media della radiazione incidente rispettivamente del 55% e del 28% [40]. La seconda sezione, più recente, prevede dei moduli disposti in una configurazione *portrait*, di larghezza 2 m, posti ad un'altezza di 5 m dal suolo, dotati di un meccanismo di tracking ad asse orizzontale N-S, che permette un'inclinazione di +/- 50° nelle direzioni Est e Ovest. Come per la sezione precedente, l'impianto è diviso in due parti: uno con un tracking solare, ottimizzato per la produzione elettrica, che provoca una

riduzione del 35% della radiazione incidente al suolo, ed uno con un tracking controllato, per il quale i moduli sono posti parallelamente ai raggi solari, ad eccezione delle ore centrali della giornata, quelle più calde, durante le quali si ha invece il massimo ombreggiamento: questa tecnica porta ad una riduzione del 20% della radiazione incidente [41].

Dal confronto tra i diversi layout, è emerso che la configurazione che massimizza la somma della produzione agricola ed energetica è quella con una singola fila di moduli in configurazione *portrait* e tracking solare.

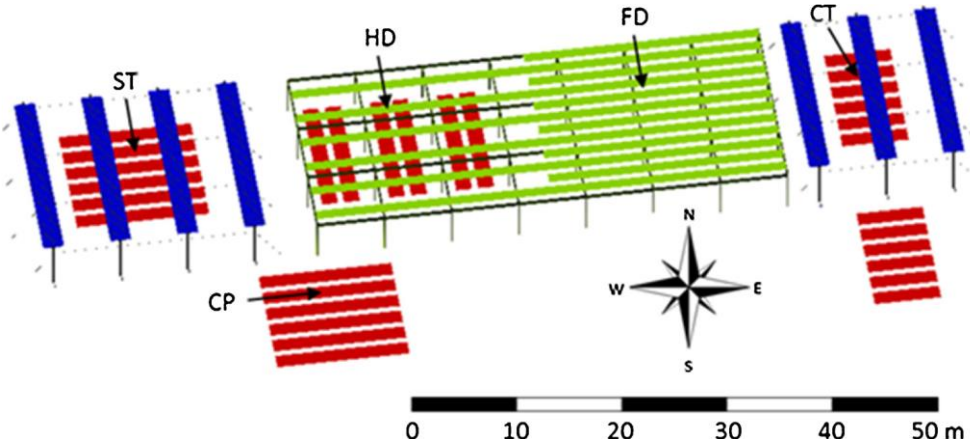

Figura 2.11 Layout schematico dell'impianto sperimentale di Montpellier [35]

La stessa Sun'Agri ha costruito in Francia diversi impianti che seguono una configurazione *portrait* a tracking monoassiale, con inclinazione +/- 90°, le cui altezze variano da 4,2 a 4,5 m. Gli impianti sono di piccola scala, come quelli di Piolenc (Fig. 2.12) e di Mallemort, con potenze di picco rispettivamente di 84 kW e 61 kW, ma anche di grande scala, come l'impianto Nidolères, presso Tesserre, che include più di 7800 pannelli su 4,5 ha di terreno.

Figura 2.12 Impianto agrivoltaico di Pionlenc [Fonte: Sun'Agri]

Figura 2.13 Impianto agrivoltaico di Nidolères [Fonte: Sun'Agri]

In Germania, nel 2016, l'Istituto Fraunhofer ha costruito presso la comunità agricola di Haggelback un impianto sperimentale da 194,4 kW con moduli fissi, orientati a sud-ovest inclinati di 20°, per una densità di potenza di circa 0,56 MW/ha. L'impianto, chiamato APV-RESOLA, ha una configurazione *portrait*, con doppia fila di pannelli, per una larghezza totale di 3,4 m, un'altezza minima di 5,5 m e una distanza tra le file di moduli di 9,5 m (Fig. 2.14); tale configurazione garantisce che almeno il 60% della PAR, la radiazione fotosinteticamente attiva, raggiunga le coltivazioni.

Figura 2.14 Impianto agrivoltaico APV-RESOLA

La particolarità di questa installazione riguarda l'utilizzo di moduli bifacciali che permette sia l'aumento dell'energia prodotta che l'aumento della radiazione diffusa al di sotto dei pannelli. Le colture sperimentate al di sotto dei moduli sono diverse, tra cui il grano invernale, il sedano rapa e la patata [42].

In Italia, i primi impianti agrivoltaici sono stati realizzati tra il 2010 e il 2012 dall'azienda RemTec s.r.l., la quale ha brevettato i suoi singolari design con il nome di Agrovoltaico®. L'azienda propone quattro design, due con tracking e due fissi, e sono tra le soluzioni più efficaci ed innovative del settore. Gli impianti con tracking sono modulari e prevedono un sistema di monitoraggio molto accurato, con un inseguimento biassiale del sole; tra le configurazioni proposte, una, detta Tracker 1.0, prevede 10 pannelli per tracker, con un GCR di 0,13 (Fig. 2.15), mentre l'altra, detta Tracker 2.1, ne prevede 24, con un GCR di 0,36 (Fig. 2.16) [43]. In entrambi i casi l'altezza minima dal suolo è di 4 m e la distanza tra le file di tracker è variabile. Gli impianti sono generalmente di grande scala, con potenze di picco che variano dai 2,15 MW dell'impianto di Virgilio, in provincia di Mantova, ai 2,19 MWp dell'impianto di Castelvetro Piacentino, ai 3,23 MWp dell'impianto di Monticelli d'Ongina, in provincia di Piacenza. Tra le specie coltivate al di sotto di questo tipo di moduli vi sono il frumento e specie orticole come i pomodori [44].

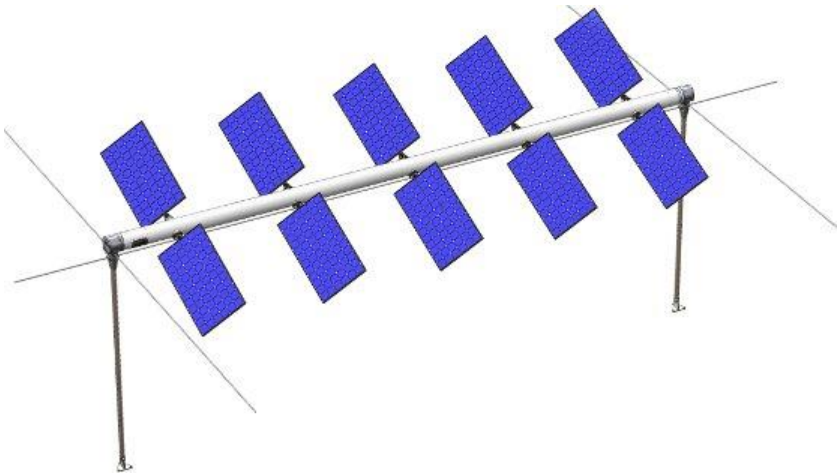

Figura 2.15 Configurazione Tracker 1.0 [Fonte: REM Tec]

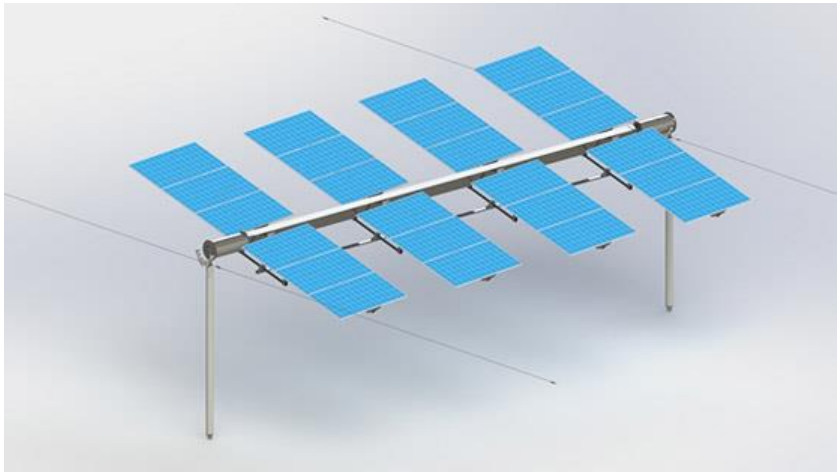

Figura 2.16 Configurazione Tracker 2.1 [Fonte: REM Tec]

Per quanto riguarda gli impianti fissi, la particolarità principale è l'elevata lunghezza delle campate, tra i 15 e i 25 m, che unita all'altezza minima di 4 m, permette l'utilizzo di macchine agricole di grandi dimensioni, come quelle usate nelle risaie. Le configurazioni presentano rispettivamente un pattern lineare (Fig. 2.17) e uno a scacchiera (Fig. 2.18): nel primo caso, la distanza tra le file è di 6 m, nel secondo è di 3 m. La densità di potenza può raggiungere 0,85 MW/ha [44].

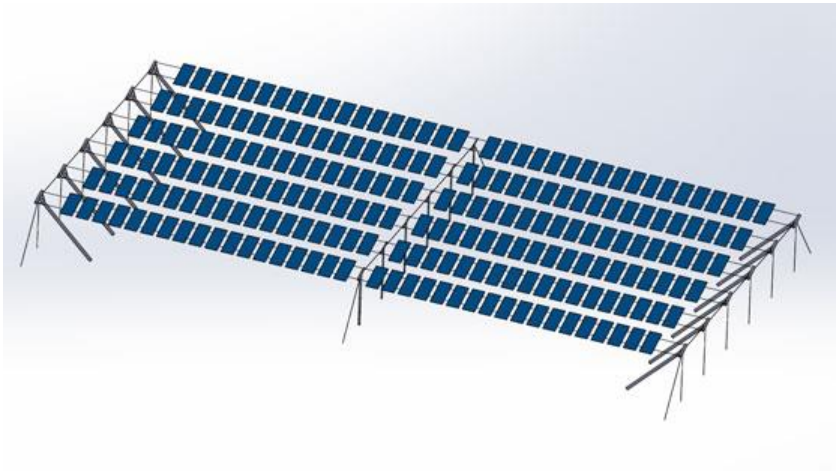

Figura 2.17 Configurazione lineare [Fonte: REM Tec]

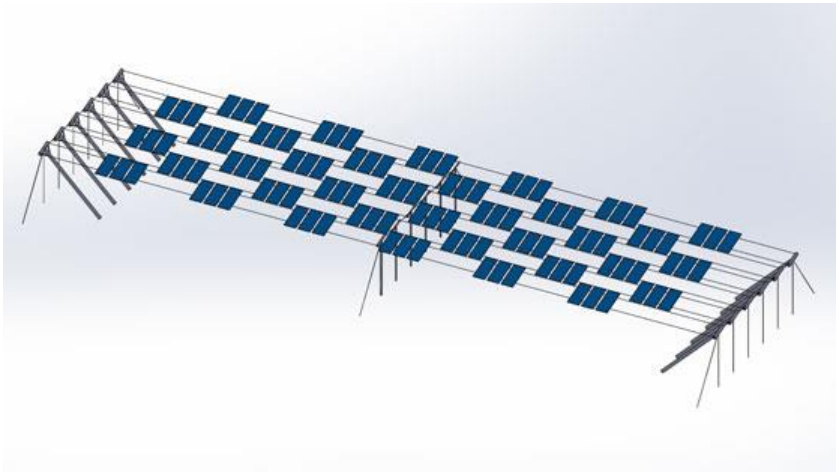

Figura 2.18 Configurazione a scacchiera [Fonte: REM Tec]

Un altro tipo di impianto agrivoltaico elevato è quello sviluppato dalla BayWa r.e., nel contesto di una coltivazione di lamponi a Babberich, nei Paesi Bassi. Si tratta di un impianto fisso, in cui i moduli sono disposti al di sopra delle file coltivate e sono orientati rispettivamente a est e a ovest, formando delle strutture protettive molto efficaci. Per massimizzare la trasmissione della luce, vengono usati dei particolari moduli fotovoltaici trasparenti e privi di cornice. La protezione dalle intemperie comporta il minore utilizzo di pesticidi e l'altezza delle strutture permette una buona ventilazione; inoltre, l'andamento della temperatura risulta più stabile se comparato con l'andamento misurato al di sotto di semplici coperture di plastica. L'impianto ha una potenza installata di 2,67 MWp e si estende per 3,3 ha [45].

Figura 2.19 Impianto agrivoltaico di Babberich [Fonte: BayWa r.e.]

Esistono poi alcuni impianti pilota in Africa: un impianto da 36 kW in Tanzania, con clima semi arido, tre impianti da 60 kW ciascuno in alcuni villaggi dell'Uganda, con clima umido, e un impianto da 56 kW presso il Latia Resource Center in Kenya (Fig. 2.20-2.21), che include un sistema di gestione dell'acqua piovana, che viene raccolta dai moduli tramite una grondaia e stoccata in un serbatoio da 10'000 litri. La particolarità della configurazione risiede nella disposizione dei moduli, che sono fissi ed orientati a sud, ma formano delle file sull'asse N-S, permettendo una maggiore penetrazione della radiazione [46].

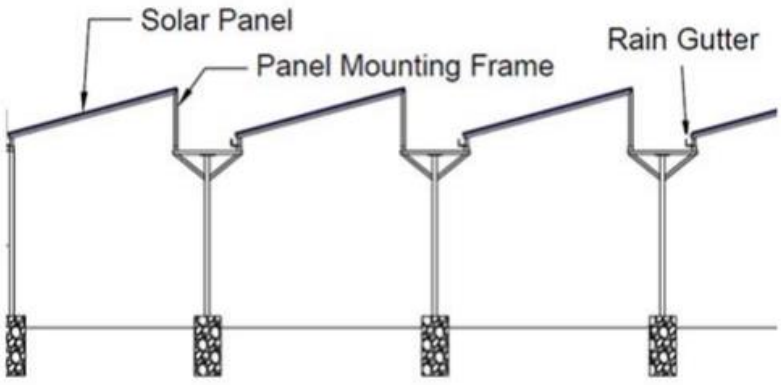

Figura 2.20 Layout schematico dell'impianto agrivoltaico presso il Latia Resource Centre [46]

Figura 2.21 Impianto agrivoltaico presso il Latia Resource Center [Fonte: Chloride Exide Ltd]

Impianti bassi

È possibile considerare come bassi, quegli impianti che hanno un'altezza minima dal suolo minore di 2 m, generalmente tra 0,8 e 1 m. Gli impianti di questo tipo sono particolarmente adatti all'accoppiamento con l'allevamento, in particolare quello ovino, e con l'apicoltura. Come nel caso degli impianti alti, esistono diverse configurazioni tra cui, la più diffusa, prevede un impianto molto simile ad un impianto a terra, che può essere fisso o dinamico. Impianti di questo tipo sono presenti in tutto il mondo, dall'Australia agli Stati Uniti all'Europa, e generalmente si tratta di impianti di grande potenza, come il parco solare di Aurora, in Minnesota, che combina una potenza installata di 150 MW con la creazione di un habitat favorevole alle specie impollinatrici, e gli impianti di Los Naranjos e Las Corchas, situati in Spagna, con una potenza totale installata di 100 MW, in cui si unisce la crescita di erbe aromatiche, all'allevamento ovino all'apicoltura. In entrambi i casi, si tratta di impianti dinamici, a singolo asse, per massimizzare la produzione energetica [47].

Figura 2.22 Impianto agrivoltaico di Las Corchas [Fonte: Enel Green Power]

Nel caso di sistemi accoppiati alle coltivazioni, la minore altezza risulta un ostacolo sia alla crescita delle colture che alla loro raccolta, in quanto rendono difficile l'utilizzo di macchinari agricoli. Per ovviare a tale problema, viene prevista una maggiore distanza tra le file di moduli, variabile da 4 a 20 m, in modo che l'attività agricola possa compiersi tra le file e non al di sotto [48]. Questo comporta una riduzione della potenza installata per ettaro, ma i costi di installazione risultano minori rispetto al caso di impianti alti, vista la maggiore semplicità costruttiva. Un esempio è l'impianto Le Syndacat, progettato dalla francese Akuo Energy presso La Réunion, un impianto fisso di 2,1 MW tra le cui file vengono prodotti frutta, verdura ed erbe aromatiche [49].

Figura 2.23 Impianto agrivoltaico di La Réunion [Fonte: Akuo Energy]

Per ridurre l'ombreggiamento, è anche possibile introdurre dei pattern eterogenei, come quello semi-alternato sviluppato presso il Central Arid Zone Research Institute (ICAR) a Jodhpur, in India [50].

Figura 2.24 Impianto agrivoltaico presso l'ICAR [Fonte: P. Santra]

D'altra parte, è anche possibile sfruttare la disomogeneità della luce che raggiunge il suolo, coltivando diverse specie in file parallele alle file di moduli, in modo che alcune specie, coltivate al di sotto dei moduli, possano beneficiare dell'ombra e di un microclima più forte, mentre altre, coltivate invece tra i moduli, ricevono più radiazione.

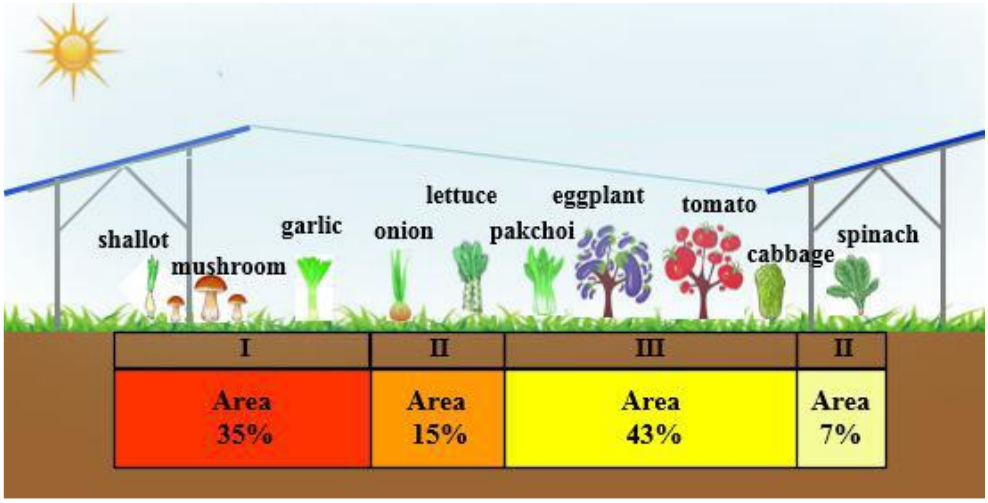

Figura 2.25 Posizione ottimale per diversi tipi di ortaggi in un impianto agrivoltaico [51]

Un esempio, è quello proposto in Fig. 2.25, in cui si considera un impianto di altezza minima pari ad 1 m, situato a Zhangjiakou, in Cina, e si differenziano le colture a seconda della loro richiesta di luce, o meglio, del loro punto di saturazione della luce: da un lato, colture come funghi, cipollotti e aglio beneficiano della minore radiazione solare, e quindi sono posizionate sotto e a nord del modulo, mentre colture come il pomodoro, il cavolo e gli spinaci sono posizionati più a sud, in quanto presentano un punto di saturazione della luce più alto [51].

In particolare, nel caso dei pomodori, uno studio condotto dall'Università dell'Oregon, ha mostrato come, benché la resa fosse inferiore rispetto al caso di controllo, le piante di pomodori coltivate nella parte più a sud delle file tra i pannelli in presentavano una maggiore efficienza idrica. L'altezza minima dal suolo dei moduli è pari a 0,8 m (Fig. 2.26) [52].

Figura 2.26 Coltivazione di pomodori tra le file di impianti agrivoltaici bassi [52]

Un'altra configurazione, sfruttata soprattutto in accoppiamento con il pascolo ovino e avicolo, consiste nell'installazione di tracker fotovoltaici singoli: generalmente si installano dagli 8 ai 10 tracker per ettaro. Si tratta di soluzioni che tendono a mettere al primo posto la produzione energetica ma, essendo i

tracker di grandi dimensioni, sono naturalmente posti a grande distanza tra loro per evitare l'ombreggiamento interno, permettendo quindi il pascolo e garantendo benefici simili alle altre configurazioni per il suolo e per gli animali [48].

Figura 2.27 Esempio di impianto con tracker singoli applicato all'allevamento

Un particolare tipo di sistema basso prevede l'utilizzo di moduli verticali. Le file di moduli seguono l'asse N-S e sfruttano la tecnologia bifacciale per produrre energia captando la radiazione solare proveniente da est e da ovest. I moduli hanno generalmente un'altezza minima dal suolo di 0,9 m e possono essere singoli, raggiungendo altezze di circa 2 m, o doppi, come in figura, raggiungendo altezze fino a 4 m; la distanza tra le file varia tra 8 m e 18 m, a seconda del tipo di applicazione, del tipo di macchinari agricoli usati, e dell'altezza massima delle installazioni, per minimizzare perdite per ombreggiamenti interni [48]. Questa configurazione è particolarmente efficace per latitudini maggiori di 65°, in quanto permette di sfruttare la minore altezza solare, caratteristica delle zone vicino ai poli, portando ad un aumento della produzione energetica fino al 71%, rispetto ad un modulo tradizionale; per latitudini minori, invece, risultano più convenienti moduli con minore inclinazione o inclinazione variabile. Disporre i moduli verticalmente permette di ridurre le perdite di soiling, ovvero quelle

perdite legate alla presenza di neve o polveri che coprono parte del modulo [53]. Generalmente, questi impianti sono accoppiati al pascolo, in particolare ovino e bovino, ed i moduli possono rappresentare una sostituzione alle tradizionali recinzioni. Dal punto di vista agricolo, i moduli verticali comportano un ridotto consumo di suolo, così che più del 90% della superficie rimane sfruttabile ai fini agricoli. Benché questa configurazione non permetta la diretta protezione delle colture dalle intemperie, i benefici per le piante derivano dalla protezione dal vento e dalla conseguente riduzione dell'erosione del suolo. Dal punto di vista economico, queste installazioni hanno costi di investimento più elevati rispetto ad altri impianti bassi, ma minori rispetto agli impianti alti. Data la novità della tecnologia, al mondo sono presenti pochi impianti di questo tipo e generalmente si tratta di impianti sperimentali, da poche decine di kW, con l'eccezione di due impianti in Germania da 2 e 4 MW. Gli impianti presentano una densità di potenza media tra 0,3 e 1 MW/ha [48].

Figura 2.28 Impianto agrivoltaico verticale [Fonte: Next2sun]

Gli indicatori di performance

La fase di progettazione di un impianto agrivoltaico è molto delicata in quanto richiede un'accurata valutazione degli impatti ambientali e socio-economici che l'impianto può avere, oltre che studiare se e come l'attività agricola possa sposarsi con un certo tipo di layout.

Il principale indicatore di performance dei sistemi agrivoltaici è il cosiddetto *Land Efficiency Ratio*, che misura l'efficacia della sinergia tra agricoltura e generazione energetica valutando il rapporto tra le produzioni nel caso di un uso combinato del terreno e nel caso di uso singolo, rispettivamente per la produzione agricola e per la produzione energetica, secondo la seguente formula:

$$LER = \left(\frac{Resa\ agricola\ con\ agrivoltaico}{Resa\ agricola\ senza\ agrivoltaico}\right) + \left(\frac{Resa\ energetica\ impianto\ agrivoltaico}{Resa\ energetica\ impianto\ a\ terra}\right)$$

Nel caso dell'attività agricola, il rapporto può essere maggiore o minore di 1, a seconda del tipo di coltivazione e del clima, mentre per la produzione energetica il rapporto è generalmente minore di 1, in quanto la gestione della luce richiede una densità di potenza minore rispetto agli impianti tradizionali e avendo moduli più distanziati, aumentano anche le perdite in cavo. Complessivamente, perché un'applicazione agrivoltaica sia ritenuta valida, è necessario che il LER abbia un valore maggiore di 1. Valori di LER misurati hanno raggiunto 1,7-1,8, il che significa un aumento dell'efficienza d'uso di un terreno del 70-80% [31]. Tuttavia, poiché il LER si compone della somma dell'efficienza agricola ed energetica, è possibile che tale somma sia sbilanciata verso l'una o l'altra. È quindi necessario valutare singolarmente le rese, ponendo particolare attenzione a quella agricola: nel caso di un impianto dinamico, lo sbilanciamento può essere recuperato agendo sul meccanismo di tracking, favorendo la

produzione energetica o quella agricola a seconda delle stagioni. Inoltre, il LER fornisce solo un'indicazione molto generale degli effetti di un sistema agrivoltaico: infatti, non specifica l'omogeneità della luce o della produzione al di sotto dei moduli o la qualità del prodotto agricolo, non considera possibili ritardi nella maturazione, né integra l'utilità dei moduli nel proteggere le colture dagli stress idrici, nel contrastare il cambiamento climatico e nel ridurre la degradazione del suolo.

Per garantire la corretta progettazione ed il corretto funzionamento di un sistema agrivoltaico, è necessario valutare e monitorare anche altri parametri [32]:

- Ground coverage ratio (GCR): si tratta di un parametro relativo alla produzione energetica, definito come il rapporto tra la superficie dei moduli e la superficie su cui insistono. Per un impianto agrivoltaico i valori consigliati vanno da 0,3 a 0,4.

- Risparmio idrico: monitorabile grazie al confronto con un'area di controllo, è un parametro molto importante, in quanto il risparmio idrico è uno dei principali vantaggi di un sistema agrivoltaico, in particolare in aree semiaride.

- Qualità del prodotto agricolo: non è importante solo la resa agricola, in termini di kg di biomassa per ettaro, ma anche la qualità del prodotto, in termini di grandezza media dei prodotti, siano frutti o ortaggi, e le loro caratteristiche nutrizionali.

- Benessere degli animali e tasso di mortalità delle api.

Per la valutazione economica, è stato introdotto il *price-performance ratio* (ppr), un parametro che non somma, come il LER, ma bensì confronta i costi dell'agrivoltaico e i benefici del mantenimento dell'attività agricola.

È calcolato come:

$$\mathrm{ppr} = \frac{\mathrm{p}}{\mathrm{pb}}$$

Dove:

- p: prezzo (*price*): l'extracosto annuo dovuto all'implementazione dell'agrivoltaico rispetto ad un impianto a terra, espresso come la differenza gli LCOE moltiplicati per le rispettive energie prodotte per i due casi.
- pb: beneficio della performance (*performance benefit*): si riferisce alla preservazione della superficie agricola e ai profitti generati dall'attività agricola. Questo parametro dipende dal tipo di coltura e dell'impatto dei moduli, in termini di ombreggiamento e occupazione del suolo.

Questo parametro permette sia di confrontare l'impianto agrivoltaico con un generico impianto a terra, nelle stesse condizioni, che di valutare la sinergia tra l'impianto fotovoltaico e l'attività agricola. Un valore di ppr maggiore di 1 è indicativo di un impianto troppo costoso o della combinazione non conveniente con l'attività agricola. Per valori pari ad 1, si ha comunque un vantaggio economico, in quanto entrano in gioco altri effetti positivi come l'introduzione di un secondo reddito per l'agricoltore e l'adattamento ai cambiamenti climatici. Se poi il costo di mantenere l'attività agricola (rispetto al caso di un impianto a terra in cui l'attività agricola verrebbe abbandonata) è minore rispetto al reddito prodotto dalla stessa, è evidente come l'agrivoltaico risulta essere la scelta migliore anche dal punto di vista economico [54].

Gli effetti dell'agrivoltaico

La coesistenza di moduli fotovoltaici e attività agricole su uno stesso terreno comporta necessariamente delle conseguenze, sia dirette che indirette. Gli effetti diretti riguardano prevalentemente la produzione agricola e la produzione energetica, mentre gli effetti indiretti toccano diversi ambiti, da quello ambientale a quello socio-economico. Se, per la maggior parte, gli effetti indiretti possono essere attribuiti a tutti gli impianti agrivoltaici, gli effetti diretti sono strettamente legati al caso a cui si riferiscono, in particolare per la resa agricola, la quale dipende non solo dal tipo di impianto e dal tipo di coltura, ma anche dalla latitudine e dal clima, perciò la letteratura presenta delle apparenti discrepanze. Di seguito viene proposta una sintesi degli effetti comuni a più casi riscontrati in letteratura, in modo da fornire un quadro chiaro dell'influenza dei moduli fotovoltaici in campo agricolo.

Effetti diretti

In primo luogo, si considerano gli effetti sulla produzione energetica. Poiché la generazione energetica è subordinata alla produzione agricola, la tendenza è quella di progettare gli impianti in modo da favorire quest'ultima, quindi con orientamenti e angoli di inclinazione dei moduli non necessariamente ottimizzati per la produzione energetica. Gli impianti agrivoltaici richiedono in media dal 20 al 40% in più di suolo, rispetto ad un impianto a terra, a parità di potenza installata [31]; questo avviene perché generalmente le file di moduli sono più distanti le une dalle altre, per garantire un certo irraggiamento al suolo o per permettere l'attività agricola tra le file. Di conseguenza, si registra una riduzione del GCR (Ground Coverage Ratio), dal 40-45% di un normale impianto a terra [50], al 36%, il valore massimo consigliato per gli impianti agrivoltaici [43], a

valori anche minori a seconda del tipo di installazione. Allo stesso tempo però, aumenta la produttività dei singoli moduli, in quanto, con una maggiore distanza tra le file, viene ridotto l'ombreggiamento interno, dovuto ai moduli stessi. Inoltre, per impianti alti, si ha maggiore raffrescamento convettivo dei moduli, e quindi maggiore produttività [31]. Per quanto riguarda il tipo di modulo, un sistema agrivoltaico alto è particolarmente interessante per lo sfruttamento dei moduli bifacciali, in quanto la maggiore altezza e il fattore di albedo permettono l'aumento della resa energetica [54]. A seconda dell'altezza delle strutture, la presenza di vegetazione al di sotto dei pannelli influenza il microclima e causa temperature dei moduli più omogenee, con picchi di temperatura più bassi nelle ore di luce, per una riduzione media di circa 9°C, e temperature più alte nelle ore di buio, quando però i moduli non producono energia [55]. D'altro canto, è necessario considerare una perdita di produttività causata da polveri, sporco o altre particelle che possono depositarsi sui moduli e ridurre la trasmittanza del vetro, specialmente in climi aridi con scarse piogge, che sono poi le aree che beneficiano maggiormente della sinergia agrivoltaica. Per ovviare al problema, è stato proposto di integrare i meccanismi di irrigazione e la pulitura dei pannelli, in modo da risparmiare acqua [56].

In secondo luogo, si considerano gli effetti sul suolo e sulle colture, legati prevalentemente all'intensità e alla distribuzione della luce. La presenza di moduli fotovoltaici al di sopra o accanto alle coltivazioni comporta la variazione dei pattern di ombreggiamento, rispetto al caso senza i moduli, il che si traduce necessariamente in una riduzione della radiazione incidente, che può essere più o meno pronunciata a seconda del tipo di installazione. Nel caso di impianti a terra, è noto che la forte riduzione di radiazione che raggiunge il suolo (riduzione dall'88 al 97% a seconda delle configurazioni) ne comporta il deterioramento, andando a compromettere la possibilità che quello stesso terreno possa essere riutilizzato a scopi agricoli al termine della vita dell'impianto fotovoltaico [57].

Nel caso dell'agrivoltaico, invece, l'impianto è progettato specificamente perché il suolo riceva una certa quantità di radiazione solare, ottimizzata a seconda del tipo di coltura.

L'ombreggiamento generato dai moduli influenza le caratteristiche del suolo, benché in maniera diversa a seconda del tipo di impianto: generalmente, la temperatura del suolo risulta minore, specialmente nei casi di cielo sereno, grazie all'ombreggiamento [33]; inoltre, l'umidità del suolo è mediamente maggiore, fino al 15% in più rispetto al caso in pieno sole [55], ma si riscontrano dei gradienti di umidità nei casi di ombreggiamenti non omogenei [33].
La presenza di moduli modifica anche il modo in cui le piante interagiscono con il clima, in quanto si ha la creazione di uno speciale microclima al di sotto dei pannelli, tanto più forte tanto minore è l'altezza d'installazione, a causa della minore convezione naturale. Se la temperatura dell'aria misurata al di sotto dei moduli è risultata essere minore o maggiore della temperatura dell'aria a cielo aperto, a seconda delle condizioni climatiche e del tipo di impianto, l'umidità misurata risulta essere generalmente uguale o maggiore di quella ambiente, il che può comportare il proliferare di funghi e parassiti [33]; d'altra parte, si ipotizza che la protezione fornita delle piante dalle forti piogge permetta la riduzione delle malattie fungine [58]. Anche la velocità del vento sotto i moduli risulta diversa ed è necessario studiare attentamente la configurazione d'impianto: la riduzione della velocità del vento contribuisce alla riduzione dell'erosione [31], ma è necessario fare attenzione ad evitare l'effetto tunnel, per il quale si avrebbe invece una maggiore velocità del vento [33].

L'ombreggiamento impatta anche il benessere delle piante stesse: è stato osservato che la riduzione della radiazione incidente può causare una diminuzione della temperatura della pianta, causando ritardi sul tempo di maturazione; d'altra parte, avere raccolti fuori stagione può portare un beneficio

agli agricoltori in termini economici, dato dall'aumento di valore del prodotto sul mercato e dai minori costi d'affitto delle macchine agricole [59]. Il principale effetto negativo legato alla presenza di impianti agrivoltaici è certamente la riduzione della biomassa prodotta: nella maggior parte dei casi studiati, infatti, si misura una riduzione della resa agricola, sia per la riduzione della superficie utile a causa della presenza delle strutture di sostegno dei moduli, ma soprattutto a causa della ridotta quantità di radiazione solare. Tuttavia, alcune piante possono beneficiare dall'ombreggiamento, in particolare le *shade-tolerant plants*. Per loro, la riduzione della radiazione incidente ha un effetto benefico, in quanto non comporta una riduzione dell'efficienza fotosintetica ma bensì riduce la necessità di dissipare calore e, di conseguenza, l'evotranspirazione. Con evotranspirazione, si intende l'effetto congiunto per il quale l'acqua passa allo stato di vapore attraverso la traspirazione delle piante e l'evaporazione dal terreno. Con la riduzione dell'evotranspirazione, si stima che sia possibile un risparmio d'acqua per le coltivazioni irrigate tra il 14% e il 29% a seconda del tipo di coltivazione: in particolare, è stata riscontrata una riduzione del 22% dell'evotranspirazione in alcuni tipi di lattuga, e tra il 9% e il 14% nei cetrioli, a seconda della densità dei moduli [60], e una riduzione del 63% dello stress idrico per gli alberi di mele, posti al di sotto di moduli dotati di tracking [61]. Il risparmio idrico è particolarmente importante nel caso di climi aridi o durante annate particolarmente calde e secche: è stato dimostrato infatti un aumento della resa nella coltivazione di patate, grano invernale (*winter wheat*) e sedano rapa, grazie proprio alla protezione fornita dai moduli [54]. Inoltre, è noto che elevati livelli di radiazione solare incidente possono causare stress nelle piante e scottature solari, che possono danneggiare fortemente i raccolti: questo rischio è fortemente ridotto dalla presenza dei moduli fotovoltaici. Inoltre, implementando un sistema di tracking dei moduli, è possibile agire direttamente sulla quantità di luce che le piante ricevono durante l'anno, ottimizzandola a seconda del tipo di coltura [59]. I moduli fotovoltaici non solo forniscono

ombreggiamento, ma anche protezione da forti piogge, grandine e altri eventi atmosferici eccezionali, che si prospetta saranno sempre più frequenti in futuro a causa del cambiamento climatico. La copertura fornita dai moduli, specialmente nel caso di regolare pioggia, può anche avere degli effetti negativi: infatti, è stato evidenziato che nel caso di moduli bassi, l'assenza di pioggia causa un accumulo di polvere sulle foglie, il che ne riduce l'efficienza fotosintetica. Inoltre, la pioggia scivola sui moduli e sgocciola al suolo, concentrando una grande quantità d'acqua in una piccola area, per un fenomeno chiamato *rain dripping* [31]. Per evitare questi effetti negativi, è possibile agire sul design dell'impianto agrivoltaico, come per esempio l'utilizzo di moduli con tracking, che permette di variare la distribuzione delle precipitazioni al suolo o sviluppare delle soluzioni innovative, come quella proposta da Kenergia S.r.l, che permette di raccogliere l'acqua piovana che arriva sui moduli al fine di conservarla e ridistribuirla per un'irrigazione più omogenea [62].

Dunque, risulta evidente che il principale vantaggio di un sistema agrivoltaico ben progettato è quello di aumentare la resilienza delle colture di fronte al cambiamento climatico e la mitigazione delle perdite negli anni di siccità.

Effetti indiretti

Il principale effetto indiretto dei sistemi agrivoltaici è l'aumento dell'efficienza di un terreno, in quanto si ha produzione combinata di energia elettrica e di biomassa agricola. Rispetto agli altri approcci per lo sviluppo delle energie rinnovabili in campo agricolo, come per esempio la produzione di biogas, l'agrivoltaico ha una densità energetica maggiore: ipotizzando di coltivare mais al fine di produrre biogas in un sistema agrivoltaico, la quantità di terreno necessaria a produrre una stessa energia è molto minore rispetto al caso in cui ci

fosse esclusivamente produzione di biogas, senza contare poi le minori spese di trasporto della biomassa, sia in termini energetici che in termini economici [43]. L'agrivoltaico rappresenta quindi un passo avanti verso il superamento della competizione tra il settore energetico e il settore agricolo per l'occupazione del suolo, particolarmente importante nel caso di isole o regioni densamente popolate, con ridotta disponibilità di suolo [58].

In Europa, ogni anno, circa 80'000 ettari di terreno vengono persi a causa dell'abbandono o dell'urbanizzazione; allo stesso tempo, vi è un crescente spopolamento delle campagne: si stima che tra il 2013 e il 2017, oltre mezzo milione di persone si sono spostate in centri urbani, a causa della mancanza di lavoro e dei bassi stipendi [19]. Lo sviluppo di impianti agrivoltaici può essere un'interessante alternativa per contrastare l'urbanesimo: non solo il fotovoltaico è una delle tecnologie con il maggiore numero di posti di lavoro creati per MW installato ma la presenza di zone d'ombra nei campi può portare ad un miglioramento delle condizioni dei lavoratori agricoli; inoltre, la peculiarità della tecnologia può portare alla richiesta di operatori agricoli specializzati, che possono gestire un impianto e allo stesso tempo monitorare le colture, dando vita alla nuova figura professionale del tecnico agrivoltaico. La rivitalizzazione delle aree rurali e lo sviluppo delle tecnologie rinnovabili può anche dare luce ad un nuovo tipo di turismo, un turismo rinnovabile, per esempio con la creazione di fattorie didattiche [59].

Il vantaggio economico non è solo per le comunità, ma è soprattutto per le aziende agricole stesse: l'energia prodotta può essere sia autoconsumata, ad esempio per sistemi di essiccazione, irrigazione o di purificazione dell'acqua, sia rivenduta alla rete, rappresentando una fonte di reddito secondaria stabile per l'agricoltore, che può essere molto importante specialmente di fronte all'incertezza del clima futuro [31]. La possibilità di un secondo reddito per gli

agricoltori è proprio uno dei driver per lo sviluppo della tecnologia agrivoltaica, specialmente in paesi come la Corea del Sud e il Giappone [59]. In futuro, la tendenza all'elettrificazione di tutti i settori economici può portare ad un aumento della richiesta elettrica anche nel settore agricolo, per esempio dovuta all'utilizzo di macchine agricole elettriche: secondo questo scenario, un sistema agrivoltaico può contribuire all'indipendenza energetica delle singole attività agricole, e così dell'intero settore.

Anche dal punto di vista ambientale l'agrivoltaico può portare dei benefici: i moduli possono sostituirsi a strutture di protezione esistenti, quali reti di plastica, largamente usate in agricoltura, riducendo la dipendenza del settore dai materiali potenzialmente inquinanti [31]. Nel caso dell'allevamento, il doppio uso della terra consente di aumentare la biodiversità vegetale, incentivare il pascolo all'aria aperta e allo stesso tempo evitare il sovrapascolamento: l'effetto dei moduli sul terreno, infatti, può portare alla creazione di nuovi pascoli, specialmente in zone aride [19]. In aggiunta, la produzione di energia rinnovabile può bilanciare le emissioni della filiera zootecnica, che rappresentano un contributo non trascurabile alle emissioni globali.

Rimane tuttavia un aspetto fondamentale da considerare, ovvero quello sociale. Negli ultimi decenni, con la diffusione delle energie rinnovabili, in particolare il fotovoltaico e l'eolico, è cresciuto anche lo scontento nei confronti di tali tecnologie per la loro capacità di modificare il paesaggio tradizionale. Anche nel caso dell'agrivoltaico, specialmente nel caso di grandi impianti, è possibile andare incontro a tale scontento, specialmente se la tecnologia viene percepita come un'invasione di un settore produttivo tradizionale come quello agricolo. Lo scontento può poi sfociare nel NIMBY, ovvero il rifiuto da parte di una comunità locale di accettare la realizzazione di una infrastruttura importante, come può essere la realizzazione di un impianto agrivoltaico di

grande scala. Per evitare l'opposizione da parte delle comunità locali, è allora necessario coinvolgere le comunità stesse nel processo decisionale e instaurare un rapporto di fiducia sia con i cittadini che con gli agricoltori, attraverso un'adeguata formazione e una chiara distinzione tra il concetto di fotovoltaico a terra e agrivoltaico [31]. È poi necessaria la creazione di policy locali e la messa in atto di piani energetici per studiare attentamente in che modo e in quale misura la tecnologia agrivoltaica può essere implementata a vantaggio dell'intera comunità. Gli impianti agrivoltaici devono essere pensati per essere parte integrante del paesaggio, fondendosi con esso e con le attività produttive, adattandosi alle specifiche necessità e alle preferenze della popolazione locale riducendo l'invadenza territoriale e allo stesso tempo decentralizzando il sistema energetico in una maniera che rende le comunità agricole protagoniste della transizione energetica [63].

Componenti di costo e modelli di business

I costi degli impianti agrivoltaici, come anche quelli degli impianti a terra, sono di due tipi: i costi CAPEX, ovvero i costi di investimento, e i costi OPEX, ovvero quelli di gestione e manutenzione. Negli impianti agrivoltaici, i primi sono quelli che vanno maggiormente ad influire sul costo dell'kWh prodotto (LCOE); è possibile dividere i costi di investimento nelle seguenti categorie [64]:

- Pianificazione, progettazione e approvazione: vi rientrano i costi legati alla ricerca del sito, alla progettazione dell'impianto e alla domanda di autorizzazione. Nel caso di impianti agrivoltaici, questi costi possono essere maggiori, in particolare quelli legati alla progettazione, a seconda del tipo di sistema scelto; inoltre, è necessario includere ulteriori costi legati ad indagini sulla natura del terreno, studi agronomici per dimostrare la continuità dell'attività agricola ed eventuali spese legali.

- Preparazione dell'area: per impianti a terra, questi costi includono il cambio di destinazione d'uso di un terreno e la predisposizione dello stesso alla costruzione dell'impianto, che può prevedere l'estirpazione di piante esistenti, la demolizione di edifici, l'innalzamento di recinzioni. Nel caso di impianti agrivoltaici, questi costi possono ridursi notevolmente, ma possono anche essere sostituiti da una compensazione all'agricoltore per la perdita del prodotto agricolo, nel caso in cui egli non sia proprietario dell'impianto.
- Componenti del sistema: è la componente di costo più importante e comprende:
    - Moduli: il loro costo dipende dalla tecnologia del modulo considerato; spesso nei sistemi agrivoltaici è consigliabile usare moduli bifacciali, per aumentare la resa elettrica, o moduli semitrasparenti, per aumentare la radiazione che raggiunge il suolo. Queste scelte possono comportare un aumento del costo dei moduli dal 15 al 35%.
    - Strutture: la maggiore elevazione dei moduli introduce una maggiore complessità nello studio dei carichi statici e può richiedere l'utilizzo di strutture rinforzate e di fondamenta che siano allo stesso tempo molto stabili e che non impattino eccessivamente sul suolo. Inoltre, data l'unicità di ogni applicazione, risulta difficile la produzione di strutture in serie, il che ostacola l'abbassamento dei costi. Per sistemi alti, questa è la componente di costo che maggiormente differisce dai sistemi a terra in quanto può essere fino a sei volte maggiore. Impianti agrivoltaici bassi, invece, non presentano eccessive variazioni di costo. Come anche per gli impianti a terra, l'utilizzo di meccanismi di tracking può incrementare il costo totale.
    - Componenti elettrici: tra cui inverter, protezioni, cavi e contatori, per i quali i costi sono pressoché identici a quelli per un impianto a terra. D'altra parte, gli impianti agrivoltaici richiedono generalmente una

lunghezza maggiore dei cavi, ma si tratta di percentuali marginali sul totale.

- Installazione: richiede l'utilizzo di metodi e macchinari per minimizzare l'impatto sul terreno e in particolare, per evitare il compattamento del suolo. È poi necessario prevedere l'interramento dei cavi ad almeno un metro di profondità per evitare l'interferenza con le attività agricole. Questo può comportare costi maggiori, fino al doppio dei costi previsti per un impianto a terra.
- Collegamento alla rete elettrica: i costi sono pressoché gli stessi di quelli per un impianto a terra.
- Monitoraggio: per il monitoraggio dei parametri elettrici i costi sono gli stessi di quelli di un impianto a terra, ma è possibile che venga richiesto il monitoraggio anche di altri parametri legati all'attività agricola, come la temperatura e l'umidità di suolo e aria al di sotto dei moduli, per ottenere informazioni sul microclima a cui sono esposte le coltivazioni, il che può richiedere un costo aggiuntivo.

Un'interessante analisi dei costi di investimento è stata portata avanti dall'NREL, il National Renewable Energy Laboratory, sulla base dei costi medi simulati negli stati americani dell'Oregon, Arizona, Michigan, Massachusetts, New York, Connecticut, California e Illinois, ovvero quegli stati in cui sono presenti impianti agrivoltaici. Lo studio valuta nove configurazioni di impianto, ciascuno con potenza installata pari 500 kW, di cui sette di applicazioni agrivoltaiche e due di impianti a terra per il confronto; in particolare, si considera un impianto a terra semplice ed uno con inseguimento monoassiale, un impianto fisso e uno dinamico accoppiato al pascolo, un impianto fisso e uno dinamico accoppiato all'apicoltura, un impianto con moduli verticali, uno dinamico e uno alto con struttura rinforzata accoppiati a coltivazioni (Fig. 2.29).

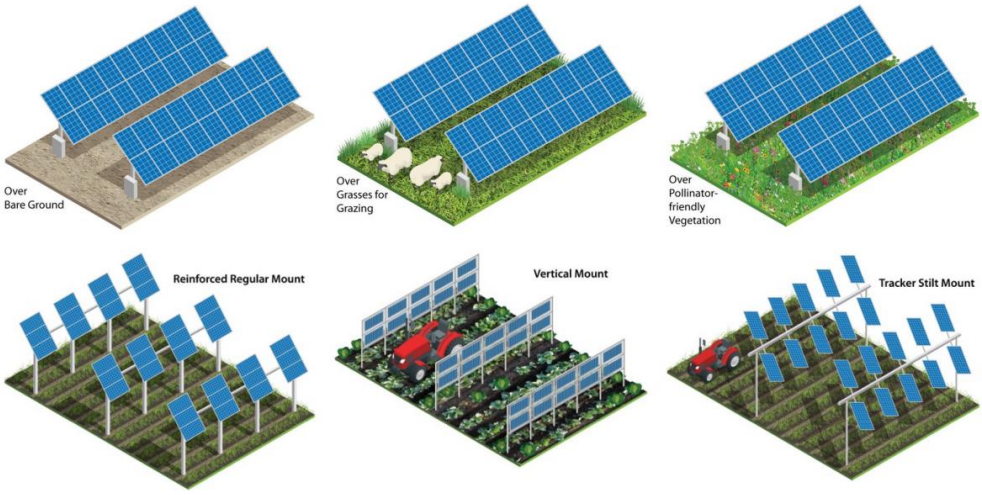

Figura 2.29 Configurazioni d'impianto [65]

Come emerge dall'istogramma (Fig. 2.30), tutte le configurazioni agrivoltaiche presentano costi maggiori del tipico impianto a terra fisso, e tra gli impianti agrivoltaici, quello più conveniente dal punto di vista economico prevede l'accoppiamento di moduli fissi e il pascolo, ovvero la configurazione che maggiormente si avvicina a quella di un classico impianto a terra. Ponendo l'attenzione sul fotovoltaico applicato alle coltivazioni, la soluzione meno costosa prevede moduli verticali, mentre quella più costosa consiste in moduli elevati da terra con strutture rinforzate; curiosamente, la soluzione con tracking non è la più costosa. I costi sono poi divisi per categorie: è opportuno notare che, in questa analisi, il costo dei moduli è stato ritenuto lo stesso per tutte le applicazioni, ma non è specificato il tipo di moduli ipotizzati, se non nel caso dei moduli verticali che richiedono necessariamente l'utilizzo di moduli verticali per mantenere una resa energetica accettabile. Come anticipato, i costi che variano maggiormente sono quelli legati alle strutture, che quadruplicano nel caso dei moduli con tracking sopra le coltivazioni.

Figura 2.30 Istogramma dei costi [65]

Lo stesso studio considera la possibilità di implementare economie di scala per ridurre i costi di installazione all'aumentare della potenza installata: dal grafico risulta evidente che, dal punto di vista dei costi, anche gli impianti agrivoltaici possono beneficiare di economie di scala, in misura pressoché identica a quella degli impianti a terra (Fig. 2.31).

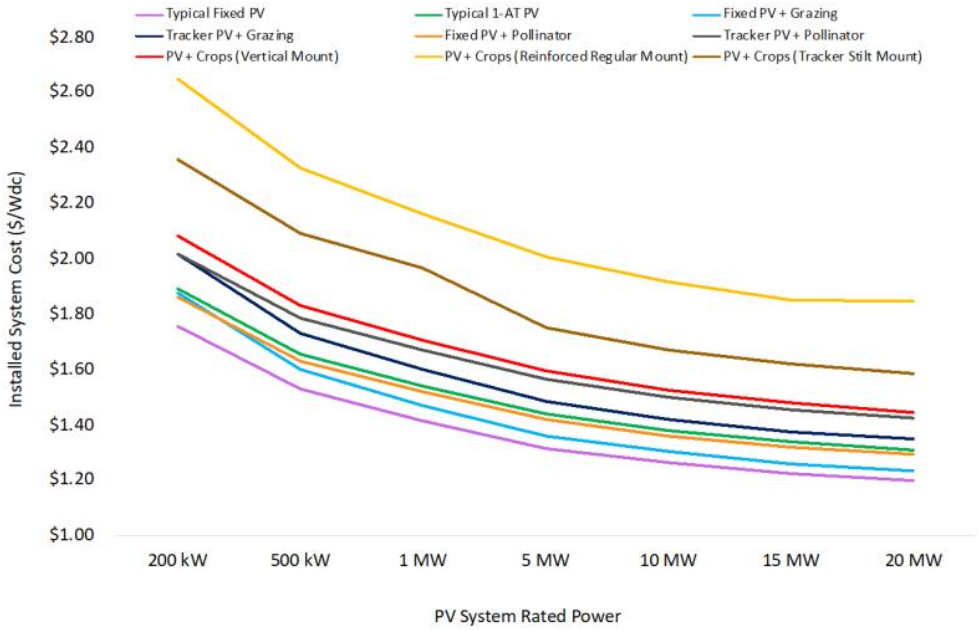

Figura 2.31 Andamento dei costi di CAPEX al variare della potenza installata per le diverse configurazioni [65]

In Germania, nel 2020, l'Istituto Fraunhofer ha calcolato la ripartizione dei costi relativi all'impianto APV-RESOLA [54]. La ripartizione dei costi del CAPEX (Fig. 2.32) risulta simile a quella presentata dall'NREL, ed evidenzia il maggiore costo dei moduli (1), delle strutture (3), dell'installazione (6) e delle misure per la protezione del suolo (13). Non è prevista una recinzione, quindi l'impianto agrivoltaico non ha la relativa voce di costo (7).

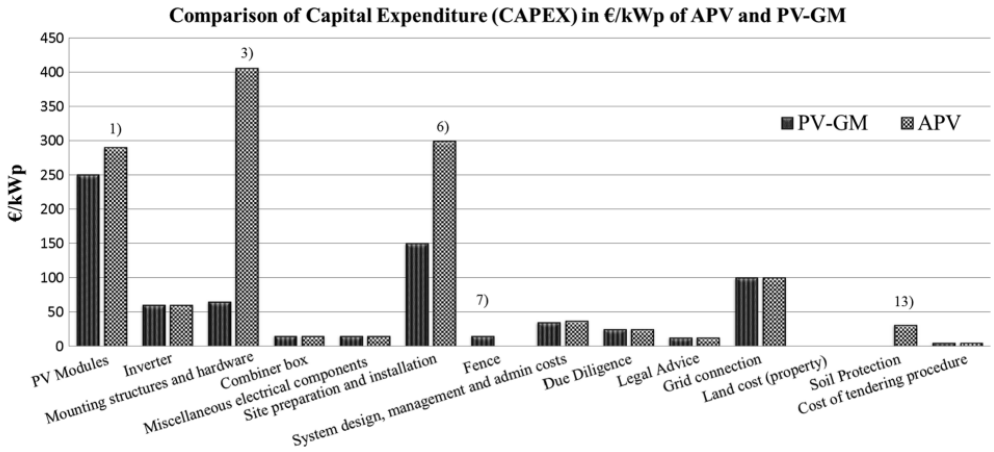

Figura 2.32 Ripartizione dei costi CAPEX [54]

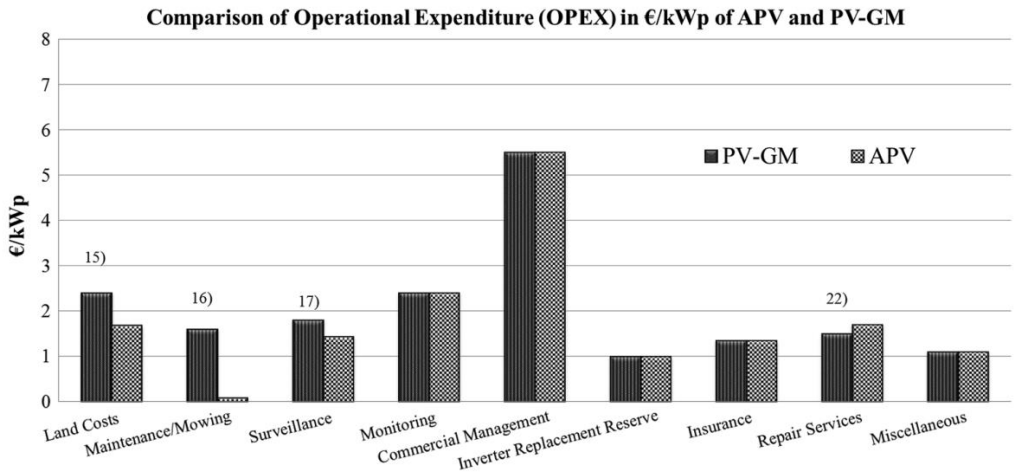

Figura 2.33 Ripartizione dei costi OPEX [54]

La ripartizione dei costi di OPEX (Fig. 2.33) mostra invece come i costi di mantenimento per un impianto agrivoltaico possano essere minori, in quanto i costi di affitto del terreno (15) sono minori (possono essere nulli se il proprietario dell'impianto è l'agricoltore stesso), così come i costi per la cura del suolo (16) e

per la sorveglianza (17). I costi di riparazione sono leggermente più alti a causa della maggiore altezza di installazione dei moduli (22).

L'istogramma in Fig. 2.34 mostra il confronto tra il LCOE di un impianto a terra e quello dell'impianto APV-RESOLA, evidenziando il CAPEX e l'OPEX. Il costo dell'energia al kWh di un impianto a terra è pari a 0,0603 €/kWh, di cui circa il 70% è attribuibile al CAPEX ed il restante 30% all'OPEX, mentre per l'impianto agrivoltaico il costo dell'energia è di 0,0829 €/kWh, di cui l'80% è relativo al CAPEX ed il 20% all'OPEX. Nonostante il costo dell'energia veda un aumento totale del 37% nel caso dell'impianto agrivoltaico, i costi relativi all'OPEX presentano una leggera diminuzione, grazie ai minori costi di manutenzione del terreno.

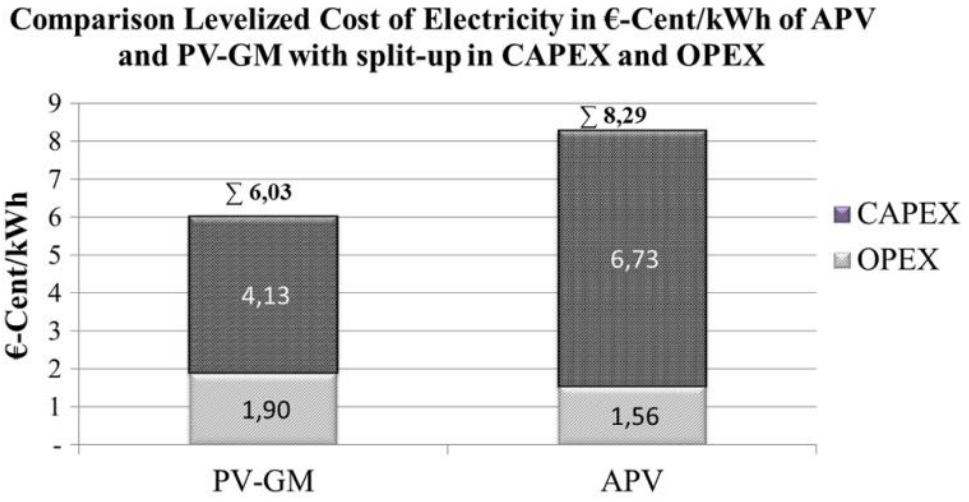

Figura 2.34 Confronto tra il LCOE per un impianto a terra e per l'impianto APV-RESOLA [54]

Data l'originalità dei singoli impianti agrivoltaici, risulta piuttosto complesso identificare un unico LCOE per caratterizzare tutti gli impianti. Generalmente, per impianti alti accoppiati alle coltivazioni, i valori di LCOE possono variare da 0,07 €/kWh a 0,13 €/kWh, mentre per impianti accoppiati a pascoli, si hanno valori tra 0,05 €/kWh e 0,09 €/kWh, che risultano essere confrontabili con i tradizionali impianti a terra (Fig. 2.35). [31]

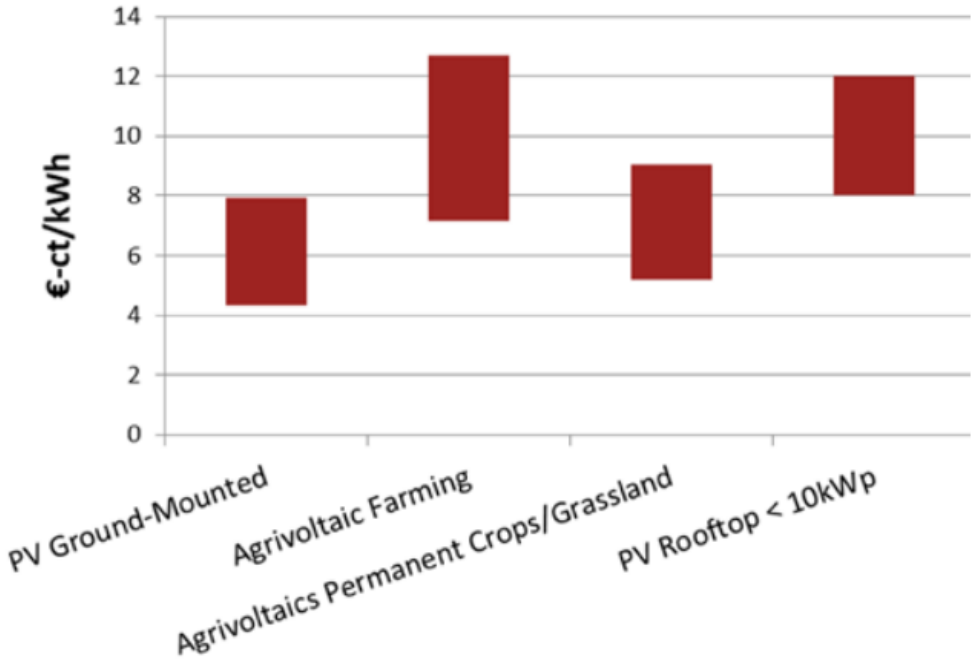

Figura 2.35 LCOE per diverse tecnologie fotovoltaiche [31]

La complessità degli impianti agrivoltaici emerge anche nella definizione dei modelli di business. A differenza dei tradizionali impianti fotovoltaici, infatti, si aggiunge un nuovo stakeholder, l'agricoltore, che gioca un ruolo fondamentale. I principali portatori di interesse in un progetto agrivoltaico sono: il proprietario del terreno, l'operatore agricolo, il proprietario dell'impianto fotovoltaico e il gestore dell'impianto [31].

Idealmente, l'operatore agricolo assume anche gli altri ruoli, in modo da avere la piena gestione dell'impianto, per garantire la sinergia tra produzione energetica e agricola, e per poter sfruttare in autoconsumo l'energia prodotta oppure ricavandone una seconda fonte di reddito, vendendola. Tuttavia, visti gli alti costi di investimento, è raro poter applicare questo modello se non per impianti di piccola taglia. È anche possibile che il proprietario terriero sia diverso dall'operatore agricolo, e quest'ultimo svolge la sua attività sul terreno pagando al proprietario un canone annuale; anche in questo caso, i ricavi ottenuti dalla produzione energetica rimangono all'operatore agricolo.

In ragione degli alti costi di investimento, specialmente nel caso di impianti alti, spesso il proprietario dell'impianto, che fornisce il capitale iniziale ed è proprietario dell'energia prodotta, è un soggetto diverso dall'operatore agricolo: in questo caso, il proprietario dell'impianto paga il canone d'affitto al proprietario terriero, sia esso lo stesso operatore agricolo o un soggetto terzo, e permette all'operatore agricolo di svolgere la sua attività a titolo gratuito; in taluni casi, il proprietario dell'impianto può anche conferire all'operatore agricolo una rendita, anche sottoforma di energia per l'autoconsumo, come risarcimento per la perdita della produzione agricola dovuta alla presenza dell'impianto, oppure può farsi carico della costruzione di infrastrutture utili all'attività agricola, come capannoni per lo stoccaggio dei prodotti o sistemi di irrigazione per le coltivazioni. Per quanto riguarda la gestione dell'impianto, questa può essere affidata al proprietario dell'impianto, all'operatore agricolo o può essere affidata a un diverso soggetto, per esempio, il detentore del brevetto per la tecnologia adottata nell'impianto. Quando il gestore e il proprietario dell'impianto sono due soggetti diversi, il proprietario dell'impianto è il vero e proprio produttore energetico e ha diritto ai ricavi ottenuti dall'energia prodotta, mentre il gestore viene pagato per il servizio [48].

È importante considerare che in un impianto agrivoltaico, la produzione agricola è di primaria importanza: lasciare la gestione dell'impianto, specialmente se si tratta di un impianto con tracking, unicamente a discrezione del produttore energetico può portare al favoreggiamento della produzione energetica rispetto a quella agricola. Per evitare questo tipo di situazione, è possibile introdurre modelli che prevedono la proprietà condivisa dell'impianto, costituendo una Associazione Temporanea di Imprese (ATI).

Un altro metodo per far fronte agli elevati costi di investimento, sia nel caso in cui il proprietario dell'impianto sia l'operatore agricolo o sia un operatore nel

campo delle energie rinnovabili, è il crowdfunding, ovvero una raccolta collettiva di fondi. Attraverso il *crowdfunding*, è possibile coinvolgere le comunità locali, rendendole degli stakeholder del progetto e aumentando il livello di gradimento nei confronti di questo tipo di installazioni. Un esempio particolare di *crowdfunding*, il cosiddetto *lending crowdfunding*, è quello portato avanti dalla Falck Renewables, un'azienda leader nel settore delle rinnovabili, che per il suo impianto agrivoltaico di Scicli, in Sicilia, ha voluto coinvolgere le comunità locali come parte dell'iniziativa "Coltiviamo energia": i residenti in Sicilia hanno avuto la possibilità di partecipare finanziariamente al progetto con un investimento volontario, variabile da 200 a 10'000 €, per il quale l'azienda ha garantito un tasso di rendimento fino al 6% per i sciclitani, e fino al 5% per il resto dei residenti in Sicilia [66].

Capitolo 3. Le potenziali applicazioni dell'agrivoltaico in Veneto

La scelta agrivoltaica in Veneto

Il Veneto è la seconda regione più energivora d'Italia, con un consumo totale di energia elettrica pari a 30,41 TWh nel 2019, pre-pandemia. Il settore agricolo rappresenta solo il 2% dei consumi totali, ma, a differenza degli altri settori, ha visto negli ultimi 20 anni un andamento complessivo nettamente crescente, dovuto ragionevolmente alla progressiva modernizzazione del settore. Sempre nel 2019, i consumi sono stati coperti solo per il 50% da impianti di produzione regionali, con una generazione di energia elettrica pari a 15,21 TWh, di cui il 41,4% prodotto da fonti rinnovabili, prevalentemente l'idroelettrico e, in misura minore, il fotovoltaico [10].

In ragione della attuale crisi del settore energetico, causata dalla precarietà del contesto geopolitico internazionale, uno degli obiettivi fondamentali che la Regione Veneto prevede di includere nel nuovo Piano Energetico Regionale è quello dell'aumento della sicurezza e dell'autonomia energetica della regione, rivedendo le fonti di approvvigionamento energetico in favore delle fonti rinnovabili.

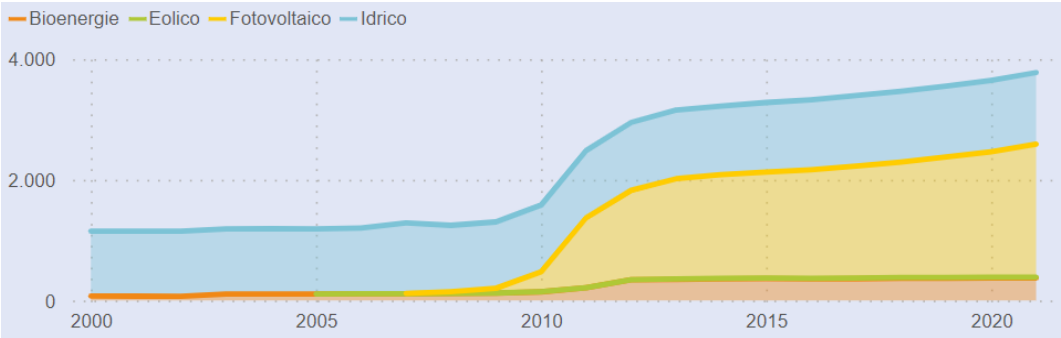

Figura 3.1 Evoluzione della potenza efficiente [MW] per fonte rinnovabile in Veneto [10]

Osservando l'evoluzione del parco di generazione rinnovabile mostrato in Fig. 3.1, è ragionevole ipotizzare che sarà il fotovoltaico a guidare la transizione energetica veneta nei prossimi decenni, anche considerando la saturazione dei potenziali siti idroelettrici e le condizioni climatiche poco favorevoli per l'eolico. Il rischio, d'altra parte, è che l'aumento della potenza fotovoltaica installata ad un aumento dell'occupazione dei terreni a scopi energetici, specialmente per la realizzazione di impianti di grossa taglia, con conseguenze negative per il terreno.

La degradazione del suolo rappresenta una preoccupazione importante, non solo a causa degli impianti fotovoltaici: negli ultimi 10 anni, le superfici a prati e pascoli permanenti, fondamentali per la conservazione del suolo ed il mantenimento della biodiversità, sono diminuite di più del 30%, in favore di coltivazioni seminative intensive, le quali, nel 2020, sono arrivate a rappresentare il 73% della superficie agricola utilizzata [67]. L'intensificazione agricola è stata motivata prevalentemente dalla grande competitività del settore e dalla maggiore resa di tali coltivazioni; tuttavia, la diffusione di monocolture ha diversi effetti negativi, tra cui la lentezza dello sviluppo dell'agricoltura biologica, meno competitiva dal punto di vista economico, la banalizzazione del paesaggio rurale e la riduzione della resilienza del settore al cambiamento climatico, per la minore diversificazione della produzione [68]. Nel tentativo di invertire il processo di specializzazione agricola, la Regione Veneto ha predisposto interventi per favorire le superfici foraggere e, in questo contesto, gli impianti agrivoltaici potrebbero essere un'interessante soluzione per aumentarne la resa economica. Inoltre, gli impianti agrivoltaici sono particolarmente adatti all'abbinamento con coltivazioni biologiche, in quanto queste ultime non prevedono l'uso di sostanze fitosanitarie che potrebbero danneggiare le strutture e i moduli fotovoltaici.

Il principale beneficio che la diffusione di impianti agrivoltaici può avere sul settore agricolo è certamente l'aumento della resilienza ai cambiamenti climatici e la riduzione della domanda idrica. I cambiamenti climatici sono un problema particolarmente sentito in Veneto, specialmente per l'innalzamento delle temperature medie (+0.55°C per decennio [69]) e per l'insorgenza sempre più frequente di eventi atmosferici estremi, che si riflettono direttamente sulla produttività: per esempio, nel 2021, la produzione di frutta fresca ha subito una contrazione del -48,1% rispetto al 2020, a causa delle gelate fuori stagione [70]. Un'evidente conseguenza dei cambiamenti climatici sono poi i periodi di siccità registrati negli ultimi anni: quest'anno, in particolare, il deficit idrico è stato così importante che è la regione ha imposto la limitazione dei consumi d'acqua, dichiarando lo stato di emergenza dal 4 luglio al 31 dicembre 2022 [71]. La carenza idrica ha influito anche sulla risalita del cuneo salino del fiume Po; per cuneo salino, anche chiamato intrusione marina, si intende l'avanzamento dell'acqua del mare verso l'entroterra che può comportare la contaminazione delle falde acquifere e la salinizzazione dei fiumi. Nel 2017, è stata misurata la risalita dell'acqua salata fino a 12-15 km dalla foce, in condizioni di alta marea [72]; nel 2022, questo numero è raddoppiato, arrivando ad oltre 30 km nella provincia di Rovigo [73]. Oltre ad essere un fenomeno preoccupante per l'intero ecosistema, la risalita del cuneo salino rappresenta una minaccia per le aree agricole nei pressi del Delta, che contano sulla risorsa idrica per le esigenze irrigue.

L'introduzione di sistemi agrivoltaici può avere un ruolo importante anche nel perseguimento degli obiettivi del Programma di Sviluppo Rurale Veneto, ed in particolare per la priorità 5 [74], che prevede l'uso efficiente delle risorse ed il passaggio ad un'economia a basse emissioni di CO_2. Tra gli obiettivi specifici di questa priorità, infatti, vi sono lo sviluppo delle energie rinnovabili in ambito rurale (obiettivo 5c), la riduzione delle emissioni prodotte dalle attività di

allevamento e dalla produzione energetica da fonti fossili (obiettivo 5d) e l'aumento dell'efficienza energetica (obiettivo 5b), quest'ultima raggiungibile grazie alla creazione di un dialogo tra produttori energetici e aziende agricole, che può sfociare in partnership per favorire la modernizzazione del settore agricolo. Inoltre, l'approvvigionamento energetico per l'autoconsumo viene individuato come fattore di importanza strategica nella gran parte delle attività agricole, necessità che non può non essere confermata nel contesto della attuale situazione economica che, a causa degli incrementi dei costi produttivi uniti ai forti rincari energetici, ha messo a dura prova le aziende del settore, secondo quanto riporta Confagricoltura Veneto [75].

FOCUS: L'agrivoltaico nelle comunità energetiche

In una comunità energetica, diversi utenti si uniscono volontariamente a formare un unico soggetto giuridico che si impegna a gestire l'energia in maniera comune: l'obiettivo principale di una comunità energetica è quello di autoprodurre energia, tramite degli impianti locali, e rivenderla ai propri componenti a prezzi accessibili. In questo modo, è possibile decentrare la produzione energetica, localizzandola nei pressi dei suoi stessi consumatori; l'energia prodotta in eccesso, può essere rivenduta alla rete [76].

Esistono tre livelli di autoconsumo:

- Autoconsumo individuale: l'utenza è composta da un singolo individuo che autoproduce la propria energia attraverso un impianto privato;
- Autoconsumo collettivo: l'utenza è composta da diversi individui presenti all'interno di uno stesso edificio, fornito di uno o più impianti di energia rinnovabile: è il caso di un impianto fotovoltaico sul tetto di un condominio la cui energia è condivisa tra i vari condomini;

- Comunità energetica: vi sono diverse utenze che si uniscono per condividere l'energia di impianti di generazione gestiti autonomamente, in modo da auto consumare l'energia prodotta, la quale viene condivisa attraverso la rete elettrica esistente. Uno dei vantaggi delle comunità rinnovabili è che permettono di mantenere la stessa configurazione della rete, in quanto l'autoconsumo è prevalentemente virtuale, per cui l'energia prodotta viene consegnata alla rete tramite gli appositi punti di consegna (POC). Gli impianti di generazione sono solitamente di proprietà di uno o più membri della comunità, ma il vantaggio è per tutti: coloro che possiedono gli impianti vengono remunerati tramite incentivi sulla percentuale di energia condivisa, mentre gli altri membri della comunità possono godere di un'energia a minor prezzo.

Le comunità energetiche sono nate in Germania, dall'unione spontanea di alcuni utenti per la gestione collettiva di impianti di cogenerazione, e tali esperienze sono state particolarmente efficaci, tanto che le comunità energetiche sono state previste dal Clean Energy Package e dalla successiva RED II europea, per poi essere recepite nei diversi paesi, tra cui anche l'Italia [77].

In Italia, dal punto di vista normativo, le comunità energetiche rinnovabili riconosciute per l'assegnazione di incentivi prevedono la presenza di impianti di potenza minore di 1 MW e la partecipazione di utenti connessi sotto la stessa cabina primaria. Inoltre, il PNRR prevede delle misure a sostegno delle comunità energetiche per l'installazione di circa 2000 MW di impianti rinnovabili a servizio dell'autoconsumo collettivo e in comunità, in particolare per i piccoli comuni con meno di 5'000 abitanti. In Veneto, circa il 50% dei comuni ha meno di 5'000 abitanti, mentre solo il 15% della popolazione vi risiede: l'introduzione di comunità rinnovabili può essere un incentivo per rivitalizzare l'economia delle zone rurali e ridurre il fenomeno dello spopolamento. In questo scenario, gli

impianti agrivoltaici possono non solo fornire l'energia necessaria alla realizzazione delle comunità, ma anche porre nuove opportunità di lavoro nei piccoli comuni, sia nel settore energetico che in quello agricolo.

L'introduzione dell'agrivoltaico nel contesto delle comunità energetiche può avvenire attraverso prevalentemente due modelli [77]:

- Consorzio di aziende: prevede l'unione di diverse aziende con carichi elettrici compatibili, in cui solo alcune aziende sono fornite di impianti rinnovabili e quindi possono condividere l'energia;
- Consorzio con la comunità: prevede l'accordo tra una comunità di cittadini ed un'azienda che possiede un impianto. Questo modello è particolarmente utile nel caso di borghi storici, in cui si preferisce evitare di installare impianti fotovoltaici sui tetti degli edifici.

Considerando l'attuale situazione economica, la possibilità di produrre e condividere l'energia può aiutare enormemente la ripresa. Per le aziende agricole, la possibilità di essere legati ad una comunità può portare alla fidelizzazione dei clienti, oltre che a ricevere gli incentivi sull'energia condivisa ed a migliorare la propria reputazione dal punto di vista della sostenibilità ambientale. Inoltre, rendere i cittadini partecipi dei benefici dell'agrivoltaico può essere un punto a favore verso l'accettazione delle energie rinnovabili e del loro inserimento nei panorami rurali.

Il quadro normativo

Fino allo scorso anno, agli impianti fotovoltaici su suolo agricolo non era permesso accedere agli incentivi, senza alcuna distinzione tra impianti agrivoltaici e impianti a terra, secondo l'articolo 65 comma 1 del D.L. n.1 del 24 gennaio 2012 [78], poi modificato dalla L. n.27 del 24 marzo 2012 [79].

Nel 2021, viene pubblicato il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza, che prevede 1,1 Mld di euro di investimenti per l'installazione di impianti agrivoltaici per una potenza complessiva di 1,04 GW. Il PNRR definisce l'agrivoltaico (agro-voltaico) come un sistema ibrido di agricoltura-produzione di energia che non compromette l'utilizzo dei terreni dedicati all'agricoltura, ma contribuiscono alla sostenibilità ambientale ed economica delle aziende coinvolte; inoltre, sottolinea l'importanza del monitoraggio dell'efficacia delle realizzazioni ed, in particolare, richiede la valutazione di aspetti di carattere agricolo, come il risparmio idrico e la resa delle coltivazioni, e ambientale, come il microclima, il recupero della fertilità del terreno e la resilienza ai cambiamenti climatici [20].

Le direttive del PNRR in materia di agrivoltaico sono state recepite tramite il D.L. n.77 del 31 maggio 2021 [80] che ha modificato il D.L. 01/2012, con l'introduzione di un nuovo comma all'articolo 65, il comma 1-quarter, che differenzia gli impianti a terra da quelli agrivoltaici, ritenendo questi ultimi adatti a ricevere gli incentivi statali. Tale comma, definisce gli impianti agrivoltaici come:

"*impianti […] che adottino soluzioni innovative con montaggio dei moduli elevati da terra, anche prevedendo la rotazione dei moduli stessi, comunque in modo da non compromettere la continuità delle attività di coltivazione agricola e pastorale, anche consentendo l'applicazione di strumenti di agricoltura digitale e di precisione*" [80]

La norma, dunque, sottolinea l'importanza della continuità dell'attività agricola e pone come requisito per l'agrivoltaico l'innovazione e l'elevazione dei moduli da terra, senza però indicare un'altezza minima.

Il D.L. 77/2021 è stato convertito nella legge n.108 del 20 luglio 2021 [81], che ha previsto l'aggiunta di altri due commi, per chiarire meglio i requisiti dell'agrivoltaico per l'accesso agli incentivi: sono il comma 1-quinques, per cui:

"l'accesso agli incentivi per gli impianti […] è subordinato alla contestuale realizzazione di sistemi di monitoraggio che consentano di verificare l'impatto sulle colture, il risparmio idrico, la produttività agricola per le diverse tipologie di colture e la continuità delle attività delle aziende agricole interessate." [81]

E il comma 1-sexies, che riafferma:

"*Qualora dall'attività di verifica e controllo risulti la violazione delle condizioni […], cessano i benefici fruiti.*" [81]

Questi commi recepiscono il PNRR, imponendo l'obbligo di dotare gli impianti di sistemi di monitoraggio dell'attività agricola. Gli aspetti da monitorare, secondo la norma, sono relativi prevalentemente alla produttività agricola e all'uso efficiente delle fonti idriche, mentre non sono menzionati gli aspetti ambientali presenti nel testo del PNRR.

Per quanto riguarda l'effettiva concessione dei benefici delle misure del PNRR, il D.Lgs. n.199 dell'8 novembre 2021 [82], oltre che sottolineare l'importanza del rispetto della L. 108/2021, menziona l'incentivazione degli impianti agrivoltaici attraverso la concessione di prestiti o contributi a fondo perduto. La consultazione pubblica del MITE in materia di agrivoltaico ha anticipato alcuni requisiti impiantistici degli impianti per l'accesso ai finanziamenti, tra cui la potenza nominale d'impianto che dovrà essere maggiore di 300 kW, ed il rispetto delle linee guida pubblicate dal MITE. Inoltre, gli incentivi saranno composti da

due contributi: uno in conto capitale, per un massimo del 40% dei costi ammissibili, prevedendo un costo di investimento massimo di 1'500 €/kW, e uno nella forma di una tariffa incentivante applicata alla produzione elettrica netta immessa in rete, riconosciuta per un periodo di 20 anni. La pubblicazione del primo bando per l'assegnazione degli incentivi è prevista entro il 31 dicembre 2022 [83].

Il crescente interesse per l'agrivoltaico ha portato la Regione Veneto alla pubblicazione della legge regionale n.17 del 19 luglio 2022 [84], per disciplinare la realizzazione di impianti fotovoltaici a terra. Tale norma definisce un impianto agrivoltaico come:

"*impianto per la produzione di energia elettrica che, secondo le diverse soluzioni tecnologiche rese disponibili, adotta soluzioni con moduli elevati da terra su terreni mantenuti in coltivazione, qualificati come Superficie Agricola Utilizzata (SAU) secondo la definizione ISTAT, in modo da non compromettere la continuità delle attività di coltivazione agricola e pastorale; l'attività agricola deve essere oggetto di un piano colturale formalizzato, nel rispetto di quanto previsto dalla relazione agronomica approvata nell'ambito del rilascio della autorizzazione*." [84]

La norma limita le aree agricole idonee per l'installazione di impianti fotovoltaici a terra, per motivi legati al patrimonio storico-architettonico e del paesaggio, all'ambiente e all'attività agricola, tra cui la presenza di produzioni agricole di pregio. I limiti legati all'agricoltura, però, non sono vincolanti nel caso di impianti agrivoltaici, fermo restando il mantenimento dell'attività agricola, la redazione di una relazione agronomica e il monitoraggio dell'impianto in fase di esercizio. Inoltre, considerando impianti di potenza maggiore o uguale a 1 MW, gli impianti agrivoltaici sono gli unici a poter essere realizzati senza vincoli di asservimento. Il prossimo passo della Regione Veneto sarà quello di definire il

Piano Energetico Nazionale per recepire il PNIEC (Piano nazionale integrato per l'energia e il clima).

La progettazione di un impianto agrivoltaico

A livello italiano sono stati pubblicati due report che descrivono delle linee guida per la realizzazione di impianti agrivoltaici: il primo [21], redatto grazie alla partnership tra l'Università degli Studi della Tuscia, Confagricoltura e il CREA (Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi economica agraria), si concentra prevalentemente sulla definizione delle migliori pratiche per l'integrazione dell'agrivoltaico, mentre il secondo [85], pubblicato dal MITE e curato dalla taskforce multidisciplinare di ENEA (Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile) per l'agrivoltaico, in collaborazione con il CREA, il GSE (Gestore dei servizi energetici) e l'RSE (Ricerca sul sistema energetico), fornisce delle indicazioni più precise su veri e propri requisiti per gli impianti agrivoltaici. In particolare, i requisiti previsti da questa linea guida sono quelli necessari per la classificazione di un impianto come agrivoltaico, secondo la normativa italiana [82].

L'iniziativa per la progettazione di un impianto agrivoltaico può nascere da due soggetti: da un operatore agricolo, che decide di fare un investimento o di cercare una partnership con un'azienda nel settore delle rinnovabili perché vede i benefici ed il valore aggiunto che l'agrivoltaico può portare alla propria attività, oppure dal produttore energetico, che cerca un terreno per la realizzazione di un impianto e propone una collaborazione ad un operatore agricolo per la creazione di un impianto agrivoltaico, invece che di un semplice impianto a terra. Nel primo caso, è possibile ragionare sul design grazie all'esperienza dell'agricoltore, che conosce la propria attività e il proprio terreno, mentre nel secondo caso è

possibile che il produttore energetico proponga all'agricoltore di avviare un'attività agrivoltaica in un nuovo terreno, per il quale non vi sono molte informazioni.

In entrambi i casi, il primo passo per la realizzazione di un impianto è l'analisi del sito, che comprende:

- Il monitoraggio del clima: è consigliata un'analisi climatica degli ultimi 20-30 anni, per procedere alla caratterizzazione meteorologica del sito, tracciando le temperature massime e minime, l'umidità relativa e l'incidenza delle precipitazioni, oltre che i possibili cambiamenti climatici in atto.
- La definizione del layout dell'area: prevede la definizione dell'estensione dell'impianto e l'individuazione di possibili limiti tecnici legati alla pendenza o all'altitudine.
- L'analisi del suolo e valutazione ambientale: nel caso in cui il terreno non ospiti un'attività agricola prima della costruzione dell'impianto, è opportuno verificare la qualità biologica del suolo, oltre che la disponibilità idrica e la presenza di falde acquifere sotterranee che possono essere contaminate dalle attività agricole previste. Inoltre, è necessario studiare la fauna locale e, nel caso, prevedere la presenza di corridoi ecologici per piccoli animali, come le lepri [21].
- La verifica della rete elettrica: specialmente se si considera la costruzione di un impianto di potenza importante è necessario verificare la presenza di cabine elettriche nei pressi della potenziale area di installazione e che la rete locale sia in grado di sostenere l'energia che viene prodotta, a meno che non si preveda la realizzazione di un impianto off-grid, per il solo autoconsumo.
- La valutazione legale: per avere la sicurezza che l'impianto rispetti le norme nazionali e regionali in materia di agrivoltaico.

Poi, si procede con la verifica per la compatibilità dell'attività agricola, che sono:

- L'agricoltura: a seconda del fabbisogno luminoso, viene fatta una distinzione tra [85]:
  - Colture non adatte o poco adatte: che vedono un calo più o meno importante della resa al diminuire della radiazione incidente, come frumento, farro, mais, alcuni alberi da frutto e barbabietola da zucchero.
  - Colture adatte: la cui resa non risente particolarmente di una moderata riduzione della radiazione, come barbabietola da zucchero, segale, orzo, avena, colza, piselli, asparago, carota, ravanello, porro, sedano e finocchio.
  - Colture mediamente e molto adatte: che possono trarre beneficio dall'ombra fornita dai moduli, come cipolle, fagioli, cetrioli, zucchine, patata, luppolo, spinaci, insalata, fave e agrumi.

  È poi necessario valutare l'altezza della coltura stessa, oltre che le dimensioni delle macchine agricole utilizzate, in modo da garantirne la regolare attività una volta che l'impianto sarà installato. Per contesto, le dimensioni medie di un trattore standard sono: 2,3 m di larghezza e 4 m di altezza [21].
- L'allevamento: non sono indicate particolari interferenze tra l'allevamento all'aperto e la produzione energetica.
- L'apicoltura: come alcuni insetti acquatici polarotattici, le api (*Apis mellifera L.*) sfruttano la polarizzazione della luce naturale per le loro attività quotidiane. La presenza di moduli fotovoltaici può quindi influire sui movimenti delle api, a meno di alcuni accorgimenti in fase di progettazione, come la scelta di moduli molto efficienti con superficie microtexturizzata [21].

In seguito, si definisce l'impianto in modo da assicurare la produzione sinergica di energia e prodotti agricoli, e in particolare è richiesta [85]:

- La continuità dell'attività agricola: è fondamentale accertare che la destinazione d'uso del terreno rimanga quella produttiva agricola. Inoltre, l'azienda non può modificare il proprio indirizzo produttivo in favore di uno di valore economico minore, per favorire la produzione energetica, e deve mantenere le eventuali produzioni certificate DOP o IGP. È poi richiesta la redazione di un piano agronomico, che includa la valutazione statistica della produttività agricola negli anni di esercizio del sistema agrivoltaico, valore che verrà confrontato con il valore medio della produttività registrata negli anni precedenti sul medesimo terreno o su terreni della stessa area geografica, a parità di indirizzo produttivo; è anche possibile prevedere un'apposita area di controllo, per il confronto in tempo reale della produttività.
- Una producibilità elettrica minima: un impianto agrivoltaico, per essere considerato tale, non deve avere una produzione elettrica specifica, misurata in GWh/(ha anno), minore del 60% di quella di un impianto fotovoltaico standard.

La sinergia può essere raggiunta agendo su diversi elementi, tra cui:

- Il layout: dal punto di vista agricolo, viene richiesto che almeno il 70% della superficie totale su cui sussiste il sistema agrivoltaico sia destinata all'attività agricola, che deve essere portata avanti nel rispetto delle Buone Pratiche Agricole (BPA). Dal punto di vista dell'impianto, si impone di rispettare il limite massimo per il LAOR (Land Area Occupation Ratio), pari al 40%, in modo da garantire un valore minimo di "porosità". Oltre al LAOR, è importante studiare il pattern spaziale dei moduli, tenendo presente anche il tipo di moduli scelti, in modo da ottimizzare le prestazioni energetiche a seconda del tipo di attività agricola.

- Le strutture: vengono individuate delle altezze minime per la realizzazione di impianto agrivoltaici: 1,3 m nel caso dell'allevamento e 2,1 m nel caso di attività colturale. Secondo la [85], impianti con altezze minori di questi limiti non permettono la vera e propria integrazione tra attività agricola e produzione energetica e quindi non sono inclusi nella definizione di agrivoltaico, con l'esplicita eccezione dei moduli verticali, per i quali non è fornita un'altezza minima di installazione.
- L'installazione: viene posta l'attenzione sull'importanza della messa in sicurezza degli impianti elettrici, con l'utilizzo di cavi con protezione meccanica aggiuntiva o inseriti all'interno di cavidotti, interrati ad una profondità minima da 0,5 m a 1 m, a seconda dell'applicazione, o posti ad un'altezza minima di 6 m dal suolo. Inoltre, si richiede la segnalazione di ogni elemento facente parte dell'impianto, come i cavi e i pozzetti per le canalizzazioni, e la regolare verifica dell'integrità delle protezioni.

Infine, per garantire il mantenimento della sinergia anche in fase di esercizio, è necessario prevedere dei sistemi di monitoraggio: secondo il DL 77/2021, per accedere agli incentivi statali, è necessario monitorare sia la continuità dell'attività agricola, attraverso i mezzi e nelle modalità sopracitate, e il risparmio idrico, che è funzione del tipo di coltura, di irrigazione e della presenza di soluzioni innovative, integrate all'impianto, per aumentare l'efficienza uso della risorsa idrica. Inoltre, il PNRR richiede anche il monitoraggio di parametri legati all'influenza del sistema sull'ambiente, come il recupero della fertilità del suolo, particolarmente importante nel caso di terreni non precedentemente coltivati, il monitoraggio del microclima al di sotto dei moduli, attraverso sensori di temperatura e di umidità, e la resilienza del sistema ai cambiamenti climatici, per la quale è richiesto, in fase di progettazione, un documento che individui i rischi climatici del luogo individuato per l'installazione e che proponga delle soluzioni

di adattamento, che saranno verificate in fase di esercizio per consentire l'accesso agli incentivi [85].

Simulazione e confronto tra configurazioni agrivoltaiche

L'obiettivo di questa sezione è di effettuare un confronto qualitativo tra diverse configurazioni agrivoltaiche, per trovare quelle più interessanti per il Veneto, sia dal punto di vista energetico che dal punto di vista agricolo. Le configurazioni sono state scelte sulla base degli impianti esistenti e sui requisiti delle linee guida italiane.

Poiché non ci si riferisce ad uno specifico impianto, le coordinate geografiche considerate per i calcoli sono quelle del Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università di Padova, in via Venezia 1 (45,41 N 11,89 E). Inoltre, tutti gli impianti simulati sussistono sullo stesso ipotetico terreno, di dimensioni 50 x 50 m, per un totale di 0,25 ha.

Sono state simulate sette configurazioni, descritte di seguito.

Configurazione 0: si tratta di un impianto fotovoltaico a terra standard, simulato per il confronto con le configurazioni agrivoltaiche. L'impianto è formato da 588 moduli monofacciali, con potenza nominale pari a 360 W e rendimento del 20,4%, organizzati come in figura. Le file di moduli sono orientate verso sud, con inclinazione fissa pari a 35°, come prevedono le linee guida. La distanza tra le file è la minima distanza prevista dalla norma CEI 82-25, in questo caso pari a 6,8 m. L'altezza minima dei moduli è pari a 0,5 m.

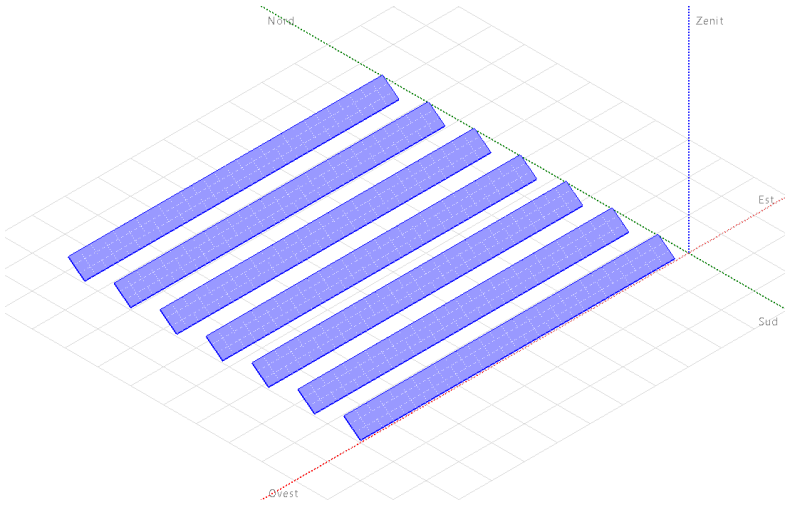

Figura 3.2 Layout configurazione 0

Configurazione A: è stata pensata per l'applicazione alla zootecnia, in particolare per l'allevamento ovino: l'altezza minima dei moduli, in accordo con le linea guida del MITE, è maggiore di 1,3 m. L'impianto è formato da 450 moduli bifacciali, con potenza nominale pari a 400 W e rendimento del 20,4%, organizzati come in figura. La scelta dei moduli bifacciali è legata alla maggiore altezza degli array, che favorisce la produzione energetica nella parte posteriore dei moduli [14]. Le file di moduli sono orientate a sud, con inclinazione fissa pari a 38° per massimizzare la producibilità del singolo pannello. La distanza tra le file è pari a 5,5 m, per favorire l'attività agricola.

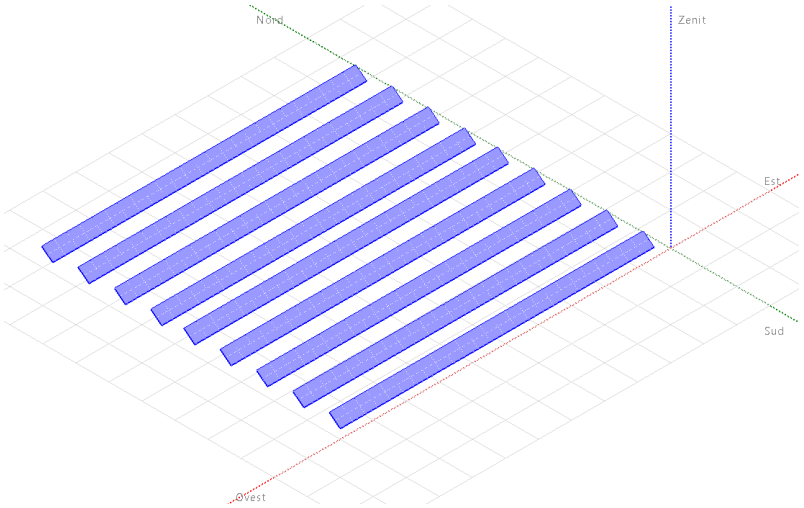

Figura 3.3 Layout configurazione A

Configurazione B: è una configurazione piuttosto semplice, pensata per un impianto agrivoltaico applicato alle coltivazioni, ovvero con altezza minima maggiore di 2,1 m. L'impianto è formato da 425 moduli bifacciali, identici quelli della configurazione precedente, e organizzati come in figura. Le file di moduli sono orientate come nella configurazione precedente. La distanza tra le file è pari a 3 m, per favorire l'attività agricola.

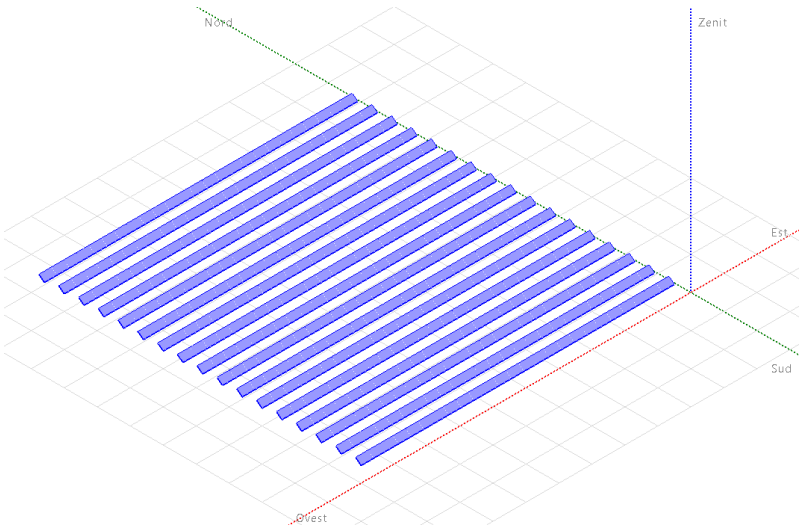

Figura 3.4 Layout configurazione B

Configurazione C: prevede un layout innovativo, con un pattern a scacchiera. L'altezza minima è maggiore di 2,1 m. L'impianto è formato da 385 moduli bifacciali, identici a quelli della configurazione precedente, organizzati come in figura; in particolare, ogni array è formato da una doppia fila di moduli alternati in posizione *landscape*. Le file di moduli sono orientate come nella configurazione precedente. La distanza tra le file è pari a 3 m.

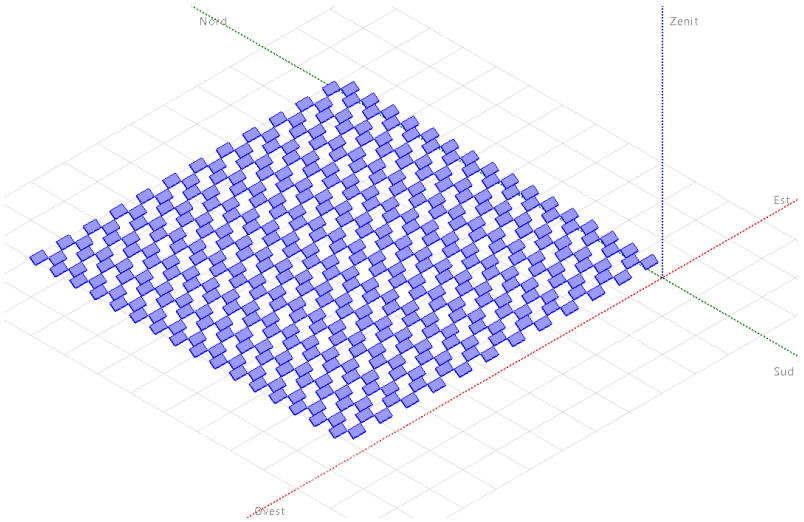

Figura 3.5 Layout configurazione C

Configurazione D: nasce dalla volontà di introdurre l'orientazione sud dei moduli per la produzione energetica su array con asse N-S, per migliorare i pattern di ombreggiamento. L'altezza minima dei moduli è maggiore di 2,1 m. L'impianto è formato da 187 moduli bifacciali, identici a quelli della configurazione precedente, organizzati come in figura. I moduli sono fissi, rivolti a sud, con un'inclinazione di 38°. La distanza sull'asse N-S è pari a 4,7 m, mentre la distanza sull'asse E-O, misurata tra spigoli di pannelli vicini, è di 2 m.

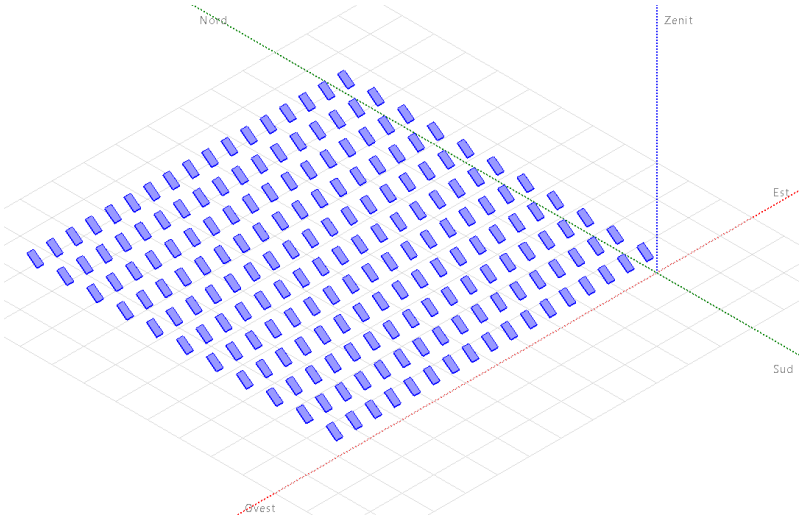

Figura 3.6 Layout configurazione D

Configurazione E: rappresenta un'evoluzione della configurazione precedente: i moduli sono posti orizzontalmente, su file lungo l'asse N-S. L'altezza minima dei moduli è maggiore di 2,1 m. L'impianto è formato da 325 moduli bifacciali, identici a quelli della configurazione precedente, organizzati come in figura. La distanza tra le file è pari a 4 m.

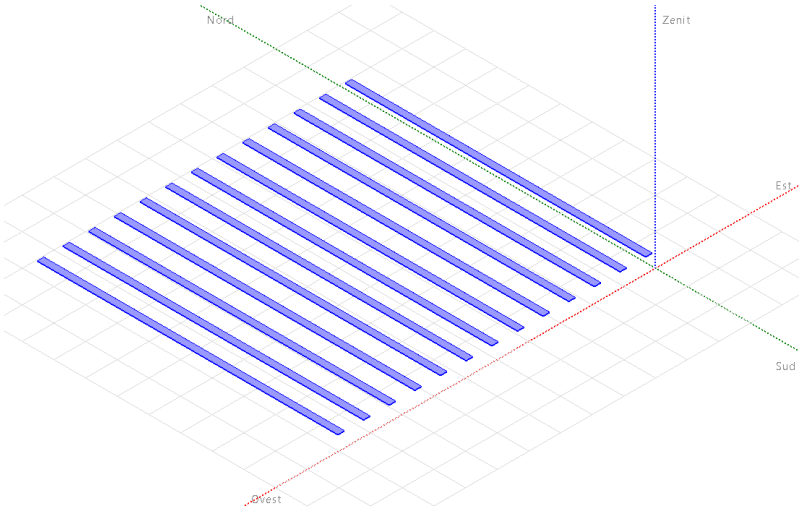

Figura 3.7 Layout configurazione E

Configurazione F: prevede un impianto dotato di inseguitori solari a singolo asse N-S, per massimizzare la produzione elettrica. L'altezza minima dei moduli è variabile. L'impianto è formato da 450 moduli bifacciali, identici a quelli della configurazione precedente, organizzati come in figura; la figura mostra gli array in posizione di riposo, ovvero in posizione orizzontale. Gli inseguitori solari permettono una variazione dell'angolo di inclinazione da +90° a -90°. La distanza tra le file è pari a 5,5 m.

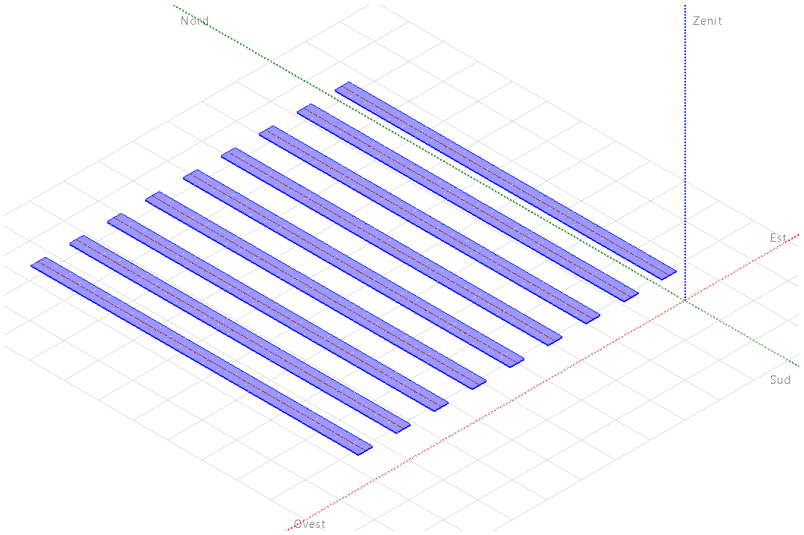

Figura 3.8 Layout configurazione F

Lo studio delle ombre

Il modello

L'effetto più importante che i moduli sopraelevati hanno sulle coltivazioni è la riduzione della radiazione incidente al suolo. Lo studio delle ombre è quindi di fondamentale importanza nella progettazione di un impianto e per l'ottimizzazione della produzione sinergica di energia e prodotti agricoli. Allo scopo di valutare l'impatto sui pattern di ombreggiamento delle diverse configurazioni agrivoltaiche nel caso specifico del Veneto, è stato sviluppato uno script MATLAB. Per massimizzare la precisione tenendo conto della potenza di

calcolo a disposizione, l'area considerata per le simulazioni, pari a 0,25 ha, è stata suddivisa in elementi quadrati di dimensioni 20 x 20 cm, denominati pixel, analizzati singolarmente.

Lo script MATLAB è stato costruito in tre parti, per definire innanzitutto la posizione del sole, poi la geometria dell'impianto, diversa per ogni configurazione, e infine la proiezione delle ombre al suolo, per valutare l'omogeneità dell'irraggiamento e la sua riduzione relativa.

Per trovare la posizione del sole in qualunque ora dell'anno, vengono calcolate le coordinate equatoriali, ovvero la declinazione solare declinazione solare δ:

$$\delta = 23{,}45 * \sin\left(360° * \frac{284 + \mathrm{n}}{365}\right)$$

Dove:

- n: ennesimo giorno dell'anno.

E l'angolo orario ω:

$$\omega = 15 * (\mathrm{TSV} - 12)$$

Dove:

- TSV: tempo solare vero, espresso in minuti, calcolato come:

$$\mathrm{TSV} = \mathrm{TL} - \Delta\mathrm{T_z} - \Delta\mathrm{T_s} - \frac{\psi}{15} + \mathrm{ET}$$

Dove:

- TL: tempo reale;
- $\Delta\mathrm{T_z}$: differenza di fuso orario secondo il GMT;
- $\Delta\mathrm{T_s}$: differenza temporale dovuta all'ora legale italiana;
- ψ: longitudine del luogo;
- ET: equazione del tempo, calcolata come:

$$\mathrm{ET} = 229.2 * [0.000075 + 0.001868 * \cos(\mathrm{B}) - 0.032077 * \sin(\mathrm{B}) - 0.014615 * \cos(2\mathrm{B}) - 0.04089 * \sin(2 * \mathrm{B})]$$

Dove:

$$B = 360° * \frac{n-1}{365}$$

A partire da questi parametri, viene calcolata la posizione del sole in coordinate terrestri, ovvero l'altezza solare (α) e l'azimuth solare (γ_s), secondo le seguenti equazioni:

$$\alpha = \text{asin}(\sin(\varphi) * \sin(\delta) + \cos(\varphi) * \cos(\delta) * \cos(\omega))$$

$$\gamma_s = \text{acos}\left(\frac{\sin(\delta) * \sin(\varphi) - \cos(\delta) * \cos(\varphi) * \cos(\omega)}{\cos(\alpha)}\right)$$

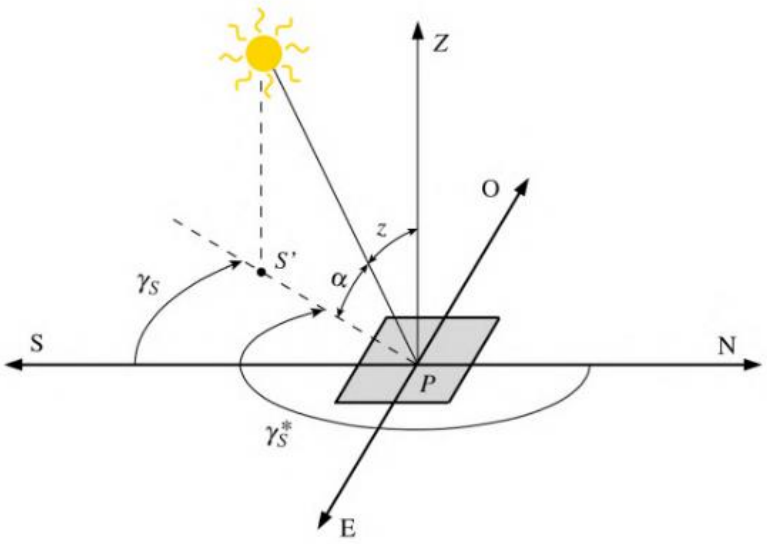

Figura 3.9 La posizione del sole secondo le coordinate terrestri [3]

Per quanto riguarda la geometria degli impianti, è stata fatta un'importante semplificazione, ovvero sono stati modellati solo i moduli e non le strutture, ipotizzando che queste ultime siano formate da elementi relativamente sottili che quindi non comportano importanti variazioni di radiazione incidente. I moduli sono modellati come singoli moduli o intere file di moduli, a seconda della configurazione, e sono inseriti nello script con le coordinate tridimensionali dei quattro vertici dei singoli moduli o delle singole file di moduli presenti nell'area considerata, seguendo la griglia creata dalle mesh; con questo metodo è possibile

modificare la distanza tra le file dei moduli, l'altezza, l'orientamento e l'inclinazione. Per sistemi fissi, l'angolo di inclinazione è fisso, mentre per sistemi dinamici, viene implementata un'equazione per l'inseguimento solare, per cui l'angolo di inclinazione viene calcolato ogni ora:

$$\beta = \operatorname{atan}\left(\frac{\sin(\gamma)}{\tan(\alpha)}\right)$$

Nelle ore di buio, intese come le ore in cui l'altezza solare è minore di 0, i moduli sono imposti in posizione orizzontale.

Poi, vengono calcolate le coordinate cartesiane delle ombre proiettate dai singoli vertici dei moduli su base oraria, in quanto dipendono dalla posizione del sole, secondo le seguenti equazioni:

$$x_{shad} = \frac{z_{mod}}{\tan(\alpha)} * \cos(\gamma) + x_{mod}$$

$$y_{shad} = \frac{z_{mod}}{\tan(\alpha)} * \sin(\gamma) + y_{mod}$$

Dove:

- z_{mod}: coordinata z di un vertice di un modulo o di una fila;
- x_{mod}: coordinata x di un vertice di un modulo o di una fila;
- y_{mod}: coordinata y di un vertice di un modulo o di una fila.

Per capire quali porzioni di suolo, o pixel, risultano in ombra, le coordinate dei vertici delle ombre sono elaborate con la *function* di MATLAB poly2mask.m, che sfrutta un algoritmo per connettere dei vertici per creare una figura piana, la cui posizione viene memorizzata in una matrice [86]. In sostanza, la matrice rappresenta l'area dell'impianto, gli elementi della matrice sono i pixel e la figura piana è l'ombra proiettata al suolo del modulo o della fila. La *function* permette di assegnare dei valori agli elementi della matrice a seconda della loro posizione rispetto alla figura piana: se si trovano al suo interno, ovvero risultano ombreggiati, gli viene assegnato il valore 1 (*true*), mentre se si trovano all'esterno,

ovvero non sono ombreggiati, hanno valore 0. La matrice viene poi rielaborata in modo che gli elementi ombreggiati abbiano valore 0 e gli elementi esposti al sole abbiano valore 1. È importante sottolineare che la matrice viene calcolata su base oraria, in quanto la posizione delle ombre dipende dalla posizione del sole.

La matrice ottenuta per un singolo modulo o fila viene sommata alle matrici ottenute per gli altri moduli o file, formando una matrice completa, che rappresenta l'intera area. Moltiplicando questa matrice per il corrispondente valore orario di irradianza diretta orizzontale è possibile trovare il pattern di ombreggiamento per una singola ora. Ripetendo il calcolo per un certo intervallo di tempo, che può essere un certo mese o l'intero anno, la somma delle matrici orarie permette di calcolare l'irradiazione diretta orizzontale per ogni singolo pixel, ovvero per ogni porzione di suolo. Per trovare l'irradianza globale orizzontale, è sufficiente sommare su base oraria il valore di irradianza diffusa, opportunamente modificato a seconda della configurazione dell'impianto.

I valori di irradiazione dei singoli pixel sono poi normalizzati per il valore di irradiazione massimo, ovvero in totale assenza di ombreggiamento, per cui si trovare la percentuale di radiazione che raggiunge il suolo in ogni punto.

L'applicazione del modello

Il modello è stato utilizzato per simulare i pattern di ombreggiamento delle diverse configurazioni. Per la configurazione 0 e la configurazione A è stata simulata una sola altezza minima, mentre per le altre configurazioni sono state simulate due altezze minime: una più bassa, ma comunque maggiore di 1,3 m o di 2,1 m, in modo tale da rientrare nella definizione di agrivoltaico secondo le linee guida, ed una più alta, maggiore di 4 m, per assicurare il passaggio delle macchine agricole. Nel caso della configurazione F, l'altezza minima si riferisce

alla minima distanza dal suolo dei moduli quando questi si trovano alla massima inclinazione raggiungibile (+/- 90°).

Le caratteristiche più rilevanti delle configurazioni e i principali risultati numerici delle simulazioni sono sintetizzati nella Tab. 3.1.

	0	A	B		C		D		E		F	
Altezza minima [m]	*0,5*	*1,4*	*2,3*	*4,5*	*2,2*	*4,4*	*2,2*	*4,4*	*2,3*	*4,5*	*1,3*	*3,5*
LAOR [-]	*49%*	*39%*	*35%*		*33%*		*15%*		*27%*		*39%*	
Irraggiamento globale minimo [kWh/(m² anno)]	*374*	*524*	*753*	*833*	*828*	*863*	*1097*	*1118*	*1060*	*1105*	*839*	*957*
Irraggiamento globale minimo normalizzato [-]	*25%*	*35%*	*51%*	*56%*	*56%*	*58%*	*74%*	*75%*	*71%*	*74%*	*57%*	*64%*

Tabella 3.1 Sintesi dei risultati del calcolo delle ombre

Il LAOR è stato calcolato dividendo l'area dei moduli per l'area sulla quale i moduli insistono. Nel caso delle configurazioni agrivoltaiche, i valori di LAOR sono sempre minori del 40%, come prevedono le linee guida italiane. È evidente che una maggiore densità dei moduli comporta minori livelli di irraggiamento al suolo. Dal punto di vista geometrico, sia la disposizione dei moduli che la loro altezza influiscono sui pattern di ombreggiamento e sull'irraggiamento minimo, anche se in misura diversa per diverse configurazioni.

Le figure seguenti mostrano i pattern di ombreggiamento per le diverse configurazioni e altezze simulate.

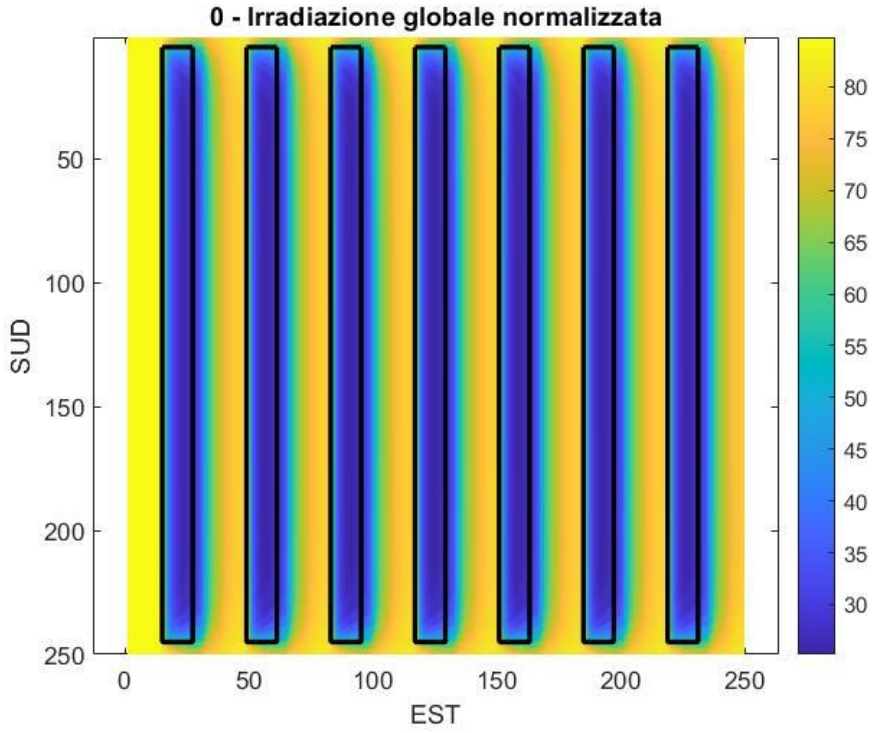

Figura 3.10 Pattern di ombreggiamento configurazione 0 (0,5 m)

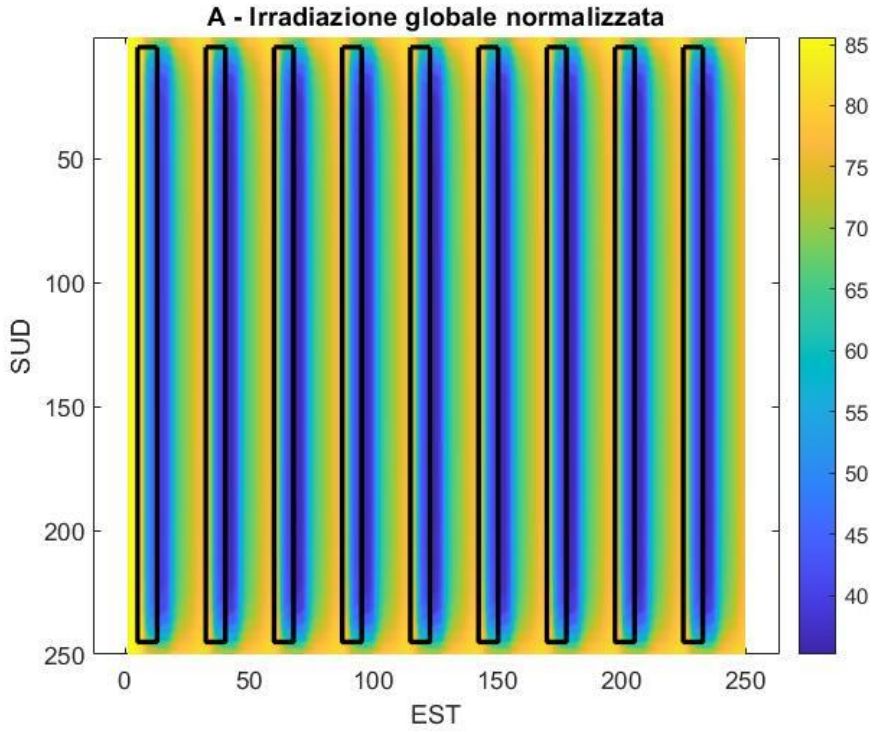

Figura 3.11 Pattern di ombreggiamento configurazione A (1,4 m)

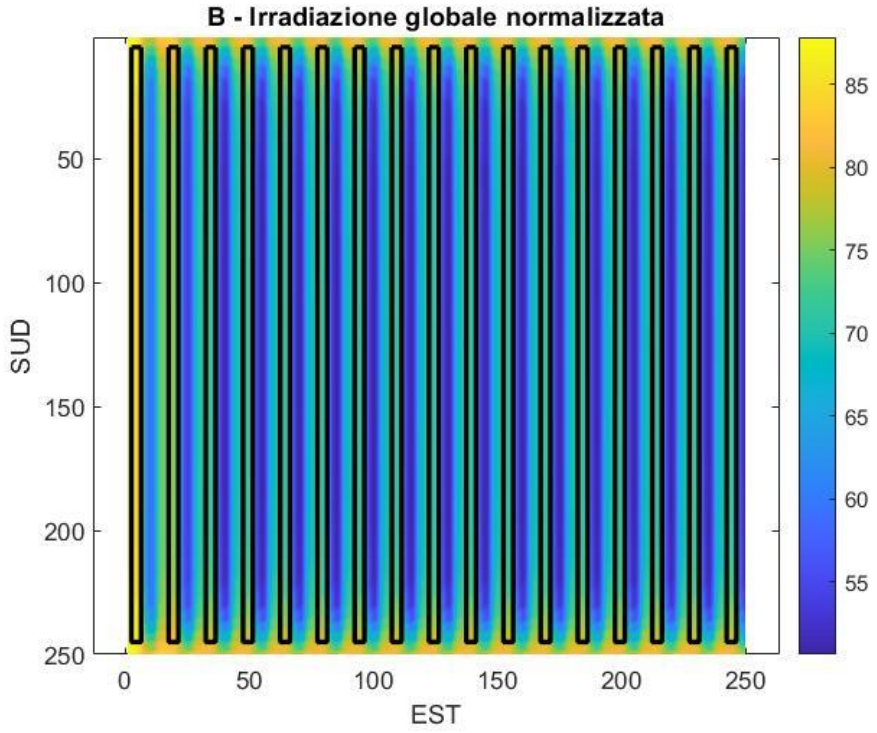

Figura 3.12 Pattern di ombreggiamento configurazione B (2,3 m)

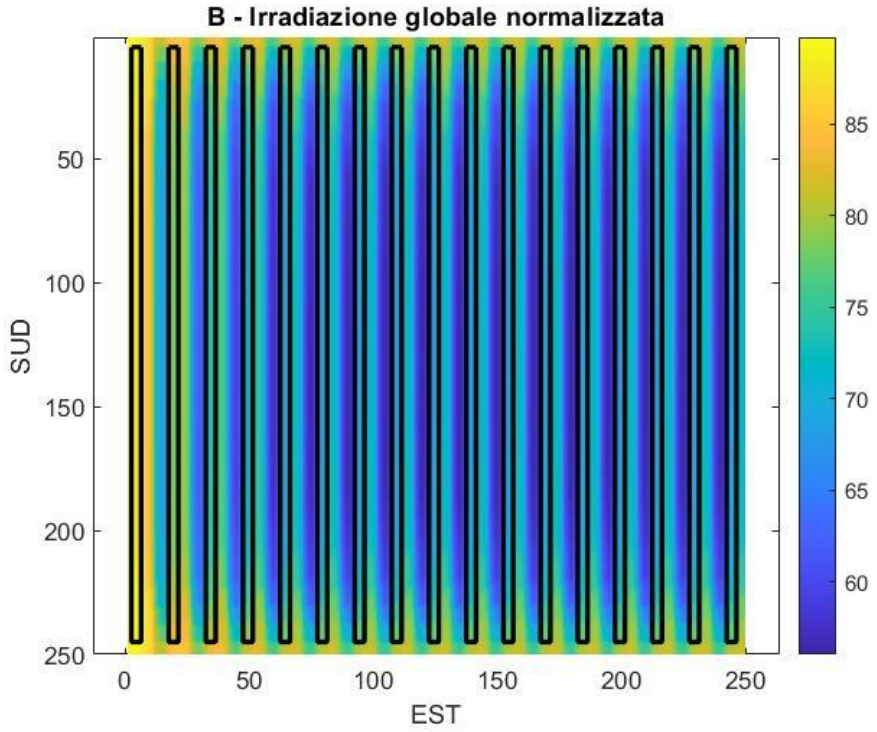

Figura 3.13 Pattern di ombreggiamento configurazione B (4,5 m)

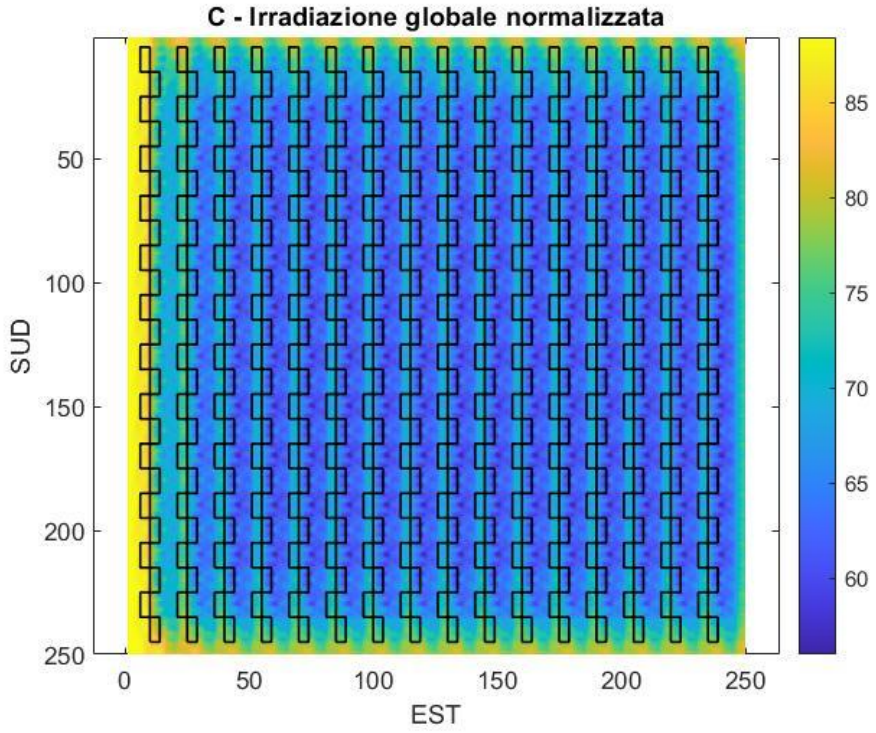

Figura 3.14 Pattern di ombreggiamento configurazione C (2,2 m)

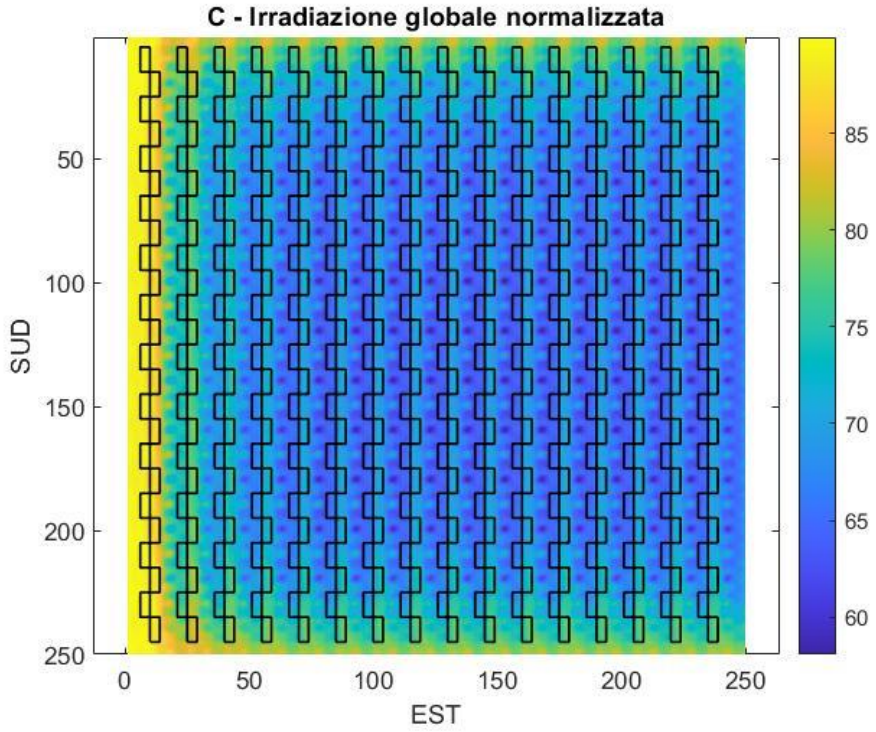

Figura 3.15 Pattern di ombreggiamento configurazione C (4,4 m)

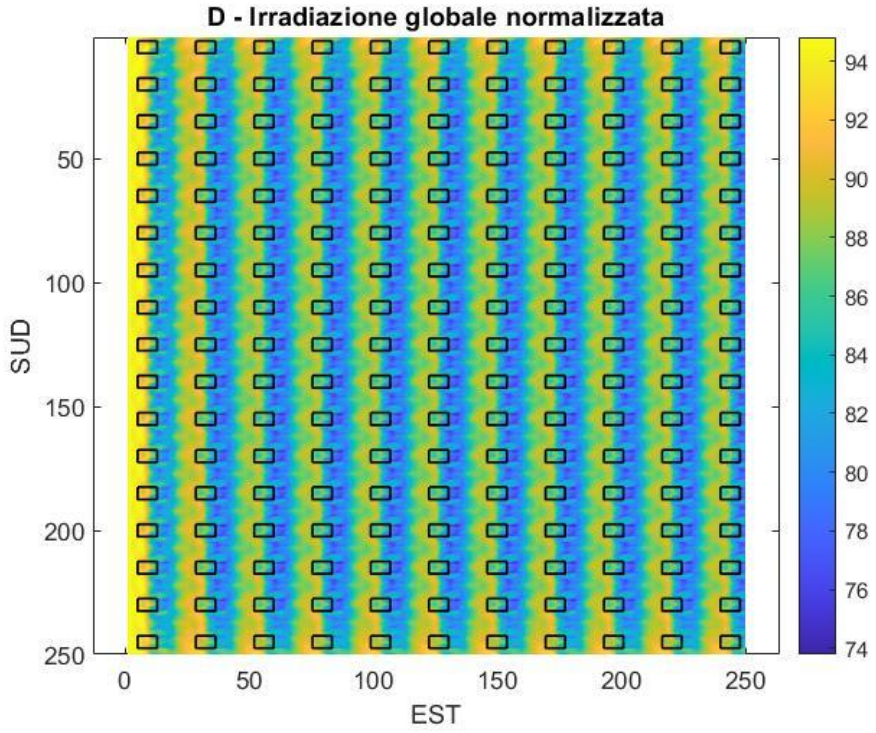

Figura 3.16 Pattern di ombreggiamento configurazione D (2,2 m)

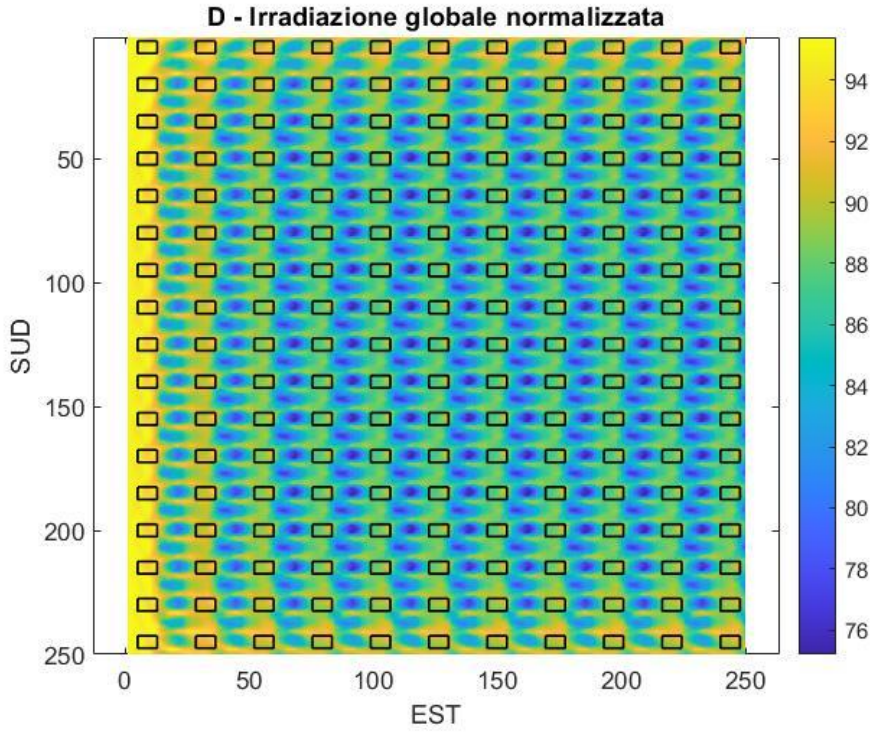

Figura 3.17 Pattern di ombreggiamento configurazione D (4,4 m)

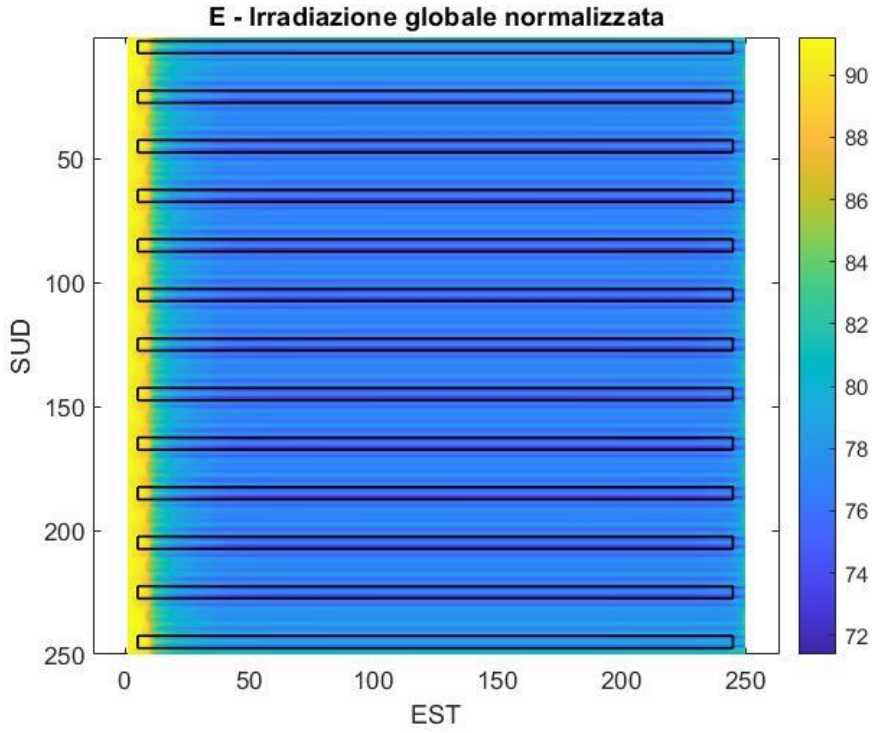

Figura 3.18 Pattern di ombreggiamento configurazione E (2,3 m)

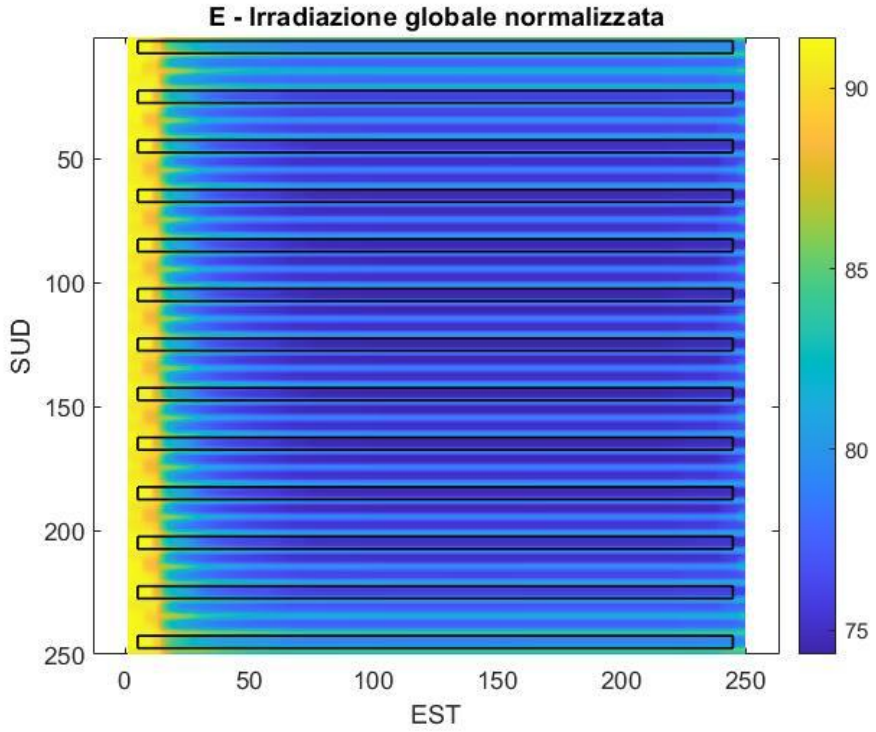

Figura 3.19 Pattern di ombreggiamento configurazione E (4,5 m)

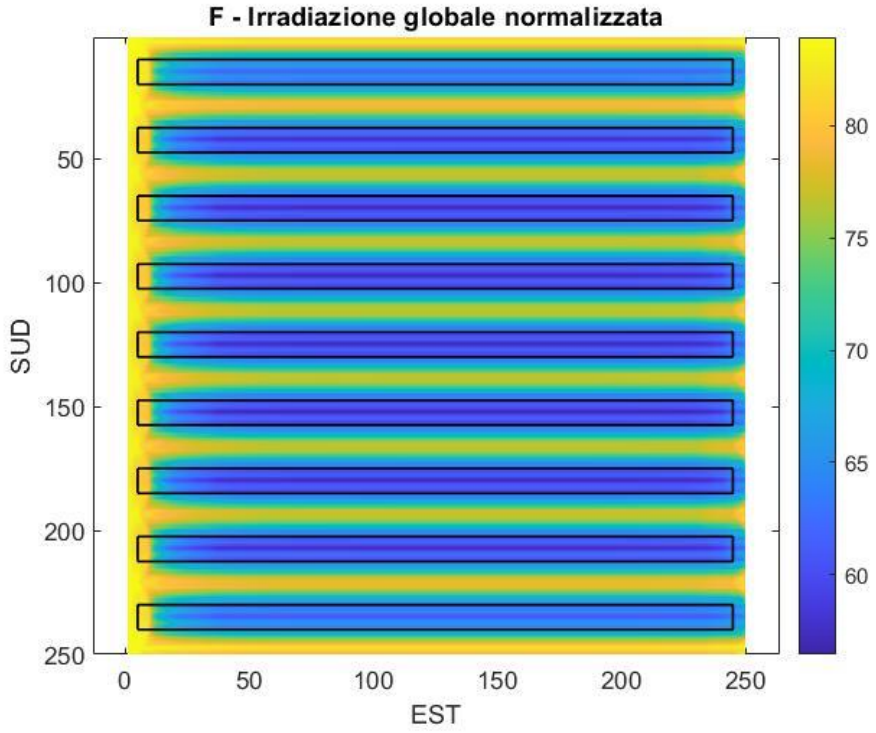

Figura 3.20 Pattern di ombreggiamento configurazione F (1,3 m)

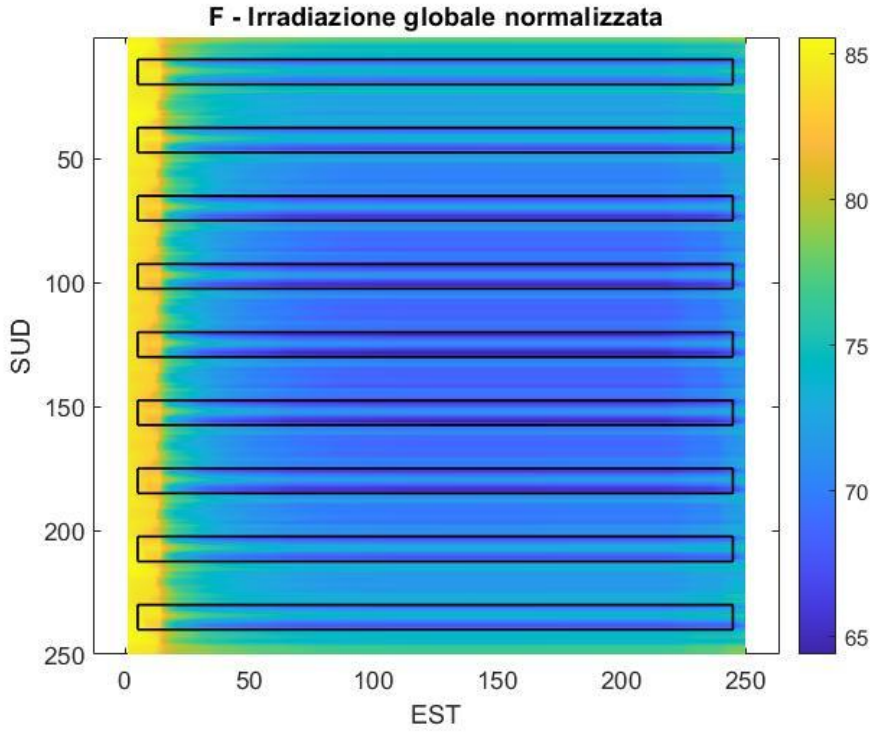

Figura 3.21 Pattern di ombreggiamento configurazione F (3,5 m)

L'impianto a terra (configurazione 0) presenta un pattern di ombreggiamento fortemente disomogeneo, a causa dell'altezza ridotta dei moduli. Inoltre, benché le fasce di terreno tra i moduli siano sufficientemente soleggiate, quelle che si trovano direttamente al di sotto sono schermate dalla radiazione solare diretta per l'intero corso dell'anno, il che comporta la degradazione del suolo, confermando così le problematiche ambientali proprie degli impianti a terra.

Le configurazioni A e B presentano pattern di irraggiamento coerenti, con fasce di suolo più ombreggiate alternate ad altre meno ombreggiate; tali fasce sono maggiormente definite per la configurazione A, a causa della maggiore larghezza delle file di moduli e della minore altezza. Inoltre, si può notare che le fasce più ombreggiate non coincidono con la posizione dei moduli, ma sono spostate verso nord. Per la configurazione B, il pattern di ombreggiamento si mantiene pressoché invariato nelle due altezze, a meno degli effetti di bordo.

La configurazione C, a scacchiera, presenta un pattern di ombreggiamento nettamente più omogeneo rispetto alle configurazioni precedenti, tale che è difficile individuare una direzione prevalente. Inoltre, benché i livelli di irraggiamento minimi siano confrontabili in termini assoluti, il numero di pixel con irraggiamento minimo sono nettamente minori rispetto ad una configurazione con delle tradizionali file di moduli. La ridotta densità di moduli, caratteristica della configurazione D, si riflette in maniera più evidente sui livelli di irraggiamento minimi, mentre i pattern di ombreggiamento sono influenzati prevalentemente dall'altezza: nel caso dell'altezza maggiore, infatti, il pattern è tendenzialmente lineare, mentre per un'altezza minore, le ombre risultano prevalentemente puntuali.

La simulazione della configurazione E permette di osservare come cambia il pattern di ombreggiamento in presenza di file di moduli fissi con asse N-S: in

particolare, si nota una riduzione dell'omogeneità della radiazione per altezze maggiori, a causa della sovrapposizione delle ombre di file diverse; anche simulando lo stesso impianto con distanze di fila maggiori, la configurazione ad altezza minore presenta un pattern di ombreggiamento più omogeneo.

Anche per la configurazione F, i pattern di ombreggiamento risultano diversi alle due altezze: in questo caso, però, è la configurazione più alta ad avere un pattern più omogeneo, mentre quella più bassa presenta un pattern a fasce. A differenza delle configurazioni A e B, però, nell'impianto con tracking le fasce risultano più omogenee e le zone maggiormente ombreggiate sono quelle esattamente sotto i moduli.

L'analisi energetica

Le simulazioni sono state effettuate tramite il software PVsyst, al fine di ottenere dei risultati il più vicini possibile alla realtà, specialmente in relazione al layout. È stata eseguita una sola simulazione per configurazione, in quanto è stato riscontrato che l'aumento dell'altezza non influisce in maniera significativa sulla produzione energetica. Gli impianti simulati hanno una potenza relativamente bassa, in quanto l'area considerata è limitata, ma possono essere facilmente scalati per raggiungere potenze più elevate.

Le caratteristiche più rilevanti delle configurazioni e i risultati numerici delle simulazioni sono sintetizzati nella Tab. 3.2.

	0	A	B	C	D	E	F
Azimuth [°]	*0°*	*0°*	*0°*	*0°*	*0°*	-	-
Inclinazione [°]	*35°*	*38°*	*38°*	*38°*	*38°*	*0°*	*Tracking*
Potenza nominale dei moduli [W]	*360*	*400*	*400*	*400*	*400*	*400*	*400*
Potenza nominale dell'impianto [kW]	*212*	*180*	*170*	*154*	*75*	*130*	*180*
Produzione elettrica lorda [MWh/anno]	*317*	*289*	*277*	*244*	*120*	*181*	*323*
Produzione elettrica specifica [kWh/kWp]	*1519*	*1606*	*1627*	*1589*	*1611*	*1392*	*1792*
Densità di potenza [MW/ha]	*0,93*	*0,76*	*0,69*	*0,63*	*0,30*	*0,52*	*0,76*
Produzione elettrica normalizzata [-]	*100%*	*91%*	*87%*	*77%*	*38%*	*57%*	*102%*

Tabella 3.2 Sintesi dei risultati delle simulazioni energetiche

Dal confronto emerge come nessuna delle configurazioni agrivoltaiche raggiunga la densità di potenza dell'impianto a terra, benché la potenza di picco unitaria dei moduli sia maggiore. D'altra parte, dal punto di vista della produzione elettrica specifica, tutti gli impianti, ad eccezione della configurazione E, performano meglio rispetto alla configurazione a terra, grazie all'utilizzo di moduli bifacciali: la configurazione F, grazie l'inseguimento solare, permette di raggiungere una producibilità assoluta maggiore del 2% rispetto alla configurazione a terra, nonostante la minore potenza installata. Le configurazioni che presentano una potenza di picco maggiore sono quelle in un certo senso meno innovative dal punto di vista del layout, quali la A, la B e la F, che sfrutta il tracking solare. Tra le configurazioni a scacchiera, la configurazione C presenta una potenza di picco maggiore, ma una producibilità specifica minore, dovuta al mutuo ombreggiamento dei moduli, mentre la configurazione D ha una potenza nettamente inferiore, ma una producibilità specifica maggiore, grazie alla maggiore distanza tra i moduli. La configurazione E è decisamente sfavorevole sia per quanto riguarda la densità di potenza, che per la producibilità specifica, a

causa dell'inclinazione orizzontale. Inoltre, secondo i limiti stabiliti dalle linee guida italiane, le configurazioni D ed E non rientrano nella definizione di agrivoltaico, in quanto presentano una producibilità specifica minore del 60% rispetto a quella dell'impianto a terra.

Discussione dei risultati

Nelle sezioni precedenti, sono stati esposti i risultati delle diverse configurazioni dal punto di vista dell'ombreggiamento e della produzione energetica. La bontà di una configurazione agrivoltaica risiede nella sua dualità, vale a dire nella sua capacità di favorire allo stesso tempo l'attività agricola e la produzione energetica: per questa ragione, risulta necessario inquadrare le singole configurazioni, confrontandone le qualità energetiche e le potenzialità agricole. A questo scopo, le potenzialità agricole sono state considerate in relazione all'intensità e ai pattern di ombreggiamento.

Con una densità di potenza di 0,76 MW/ha, la configurazione A è una delle più promettenti dal punto di vista energetico, sia in termini di potenza installata che di producibilità. Inoltre, come previsto, risulta particolarmente interessante per la combinazione con l'allevamento: il pattern di ombreggiamento eterogeneo, infatti, non è un problema per il bestiame, che può scegliere se sostare all'ombra o al sole. Il livello di ombreggiamento minimo è però molto alto, maggiore del 60%, il che può essere un problema per la crescita della vegetazione nelle fasce più ombreggiate.

La configurazione B performa meglio sia dal punto di vista energetico che da quello agricolo: presenta infatti un'alta potenza installata, ma il pattern di ombreggiamento risulta disomogeneo, tipico delle configurazioni con asse E-O.

Considerando l'altezza minima, la percentuale di ombreggiamento oscilla tra la massima, pari al 50%, ed una percentuale media, pari a circa il 30%. Per ridurre l'ombreggiamento è possibile aumentare l'altezza minima oppure la distanza tra le file di moduli: quest'ultima opzione, però, ha due svantaggi, ovvero la riduzione della densità di potenza e l'aumento della disomogeneità del pattern di ombreggiamento. Volendo sfruttare tale pattern, è possibile combinare questo tipo di configurazione con coltivazioni in filari, come le coltivazioni orticole e arboree, e coltivazioni miste.

Nella configurazione C, il pattern a scacchiera ha il doppio effetto di mantenere una densità di potenza sufficientemente elevata e di rendere il pattern di ombreggiamento più omogeneo. Come nel caso precedente, è possibile aumentare l'altezza o la distanza tra le file per migliorare l'apporto solare al suolo. Inoltre, è possibile introdurre dei pannelli trasparenti nei gap delle file, in modo da incrementare l'effetto protettivo dei moduli. Nel complesso, questa configurazione è molto promettente per le future applicazioni agrivoltaiche, a condizione che i livelli di irraggiamento medi siano coerenti con il tipo di coltivazione scelta.

Le configurazioni D ed E rappresentano un caso per cui un impianto è pensato prevalentemente per la produzione agricola: l'ombreggiamento minimo è infatti intorno al 25% per entrambe le configurazioni. Per quanto riguarda il confronto dei pattern di ombreggiamento, la configurazione D mantiene una certa eterogeneità, ed è quindi più adatta a coltivazioni su filari, mentre la configurazione E presenta un livello di omogeneità elevato. Tuttavia, entrambi i sistemi risultano fortemente carenti dal punto di vista energetico, o per la ridotta potenza installata a causa della elevata porosità (configurazione D), o per la ridotta producibilità a causa dell'inclinazione non ottimale dei moduli (configurazione E). Considerando che la configurazione E nasce come

un'estremizzazione della configurazione D, con la riduzione dell'angolo di incidenza per arrivare ad avere delle file di moduli orientate sull'asse N-S, una soluzione per migliorare le prestazioni energetiche può essere quella di trovare un angolo di inclinazione ottimale dei moduli, in modo da ottimizzare producibilità e potenza installata, mantenendo bassi livelli di ombreggiamento.

Il principale vantaggio della configurazione F è certamente la sua dinamicità, che produce effetti positivi sia dal punto di vista energetico che dal punto di vista agricolo. Infatti, i risultati mostrano che il movimento dei moduli permette non solo di aumentare la produzione elettrica, ma anche di mantenere un'alta densità di potenza senza sacrificare l'irraggiamento. La configurazione più bassa è adatta all'allevamento, mentre quella più alta può essere applicata a qualsiasi tipo di attività agricola, grazie all'elevata omogeneità del pattern di ombreggiamento e alla possibilità di ridurre l'inclinazione dei moduli, fino alla posizione orizzontale, nel caso in cui sia necessario l'utilizzo di macchine agricole; infatti, in posizione orizzontale, l'altezza minima è maggiore di 4 m. Inoltre, è importante sottolineare che le simulazioni sono state eseguite in condizioni di tracking standard, ovvero massimizzando la radiazione intercettata dai moduli, ma è anche possibile prevedere meccanismi di tracking taylorizzati, il che rendono la configurazione adattabile a qualsiasi tipo di coltura.

Conclusione

L'analisi dello stato dell'arte degli impianti a livello mondiale ha permesso di osservare la varietà di layout e di applicazioni dei sistemi agrivoltaici: ogni paese, infatti, ha esigenze diverse dovute al clima e alla tradizione agricola, e gli impianti si sono evoluti in modo da rispettare tali esigenze. In Giappone, per esempio, si predilige l'utilizzo di moduli stretti e lunghi, per aumentare l'omogeneità del pattern di ombreggiamento al suolo; in Francia, sono presenti diversi impianti applicati alle coltivazioni arboree e vitivinicole, per le quali i moduli fotovoltaici rappresentano una protezione dagli agenti atmosferici estremi; l'Australia, caratterizzata da un clima prevalentemente arido e semi-arido, presenta diversi esempi notevoli di impianti applicati all'allevamento, nei quali la presenza dei moduli e l'ombreggiamento generato permettono di ridurre i fabbisogno idrico del terreno e favoriscono il benessere degli animali.

In Italia, gli impianti agrivoltaici rappresentano una soluzione per aumentare la capacità di potenza rinnovabile del parco di generazione, guidando la decarbonizzazione del settore energetico senza sacrificare la destinazione d'uso dei terreni agricoli. Inoltre, i benefici dell'agrivoltaico possono portare giovamento ad un settore agricolo di grande pregio, ma sempre più minacciato dai cambiamenti climatici, come testimoniano i cali di produttività, specialmente nel settore ortofrutticolo. Il Governo Italiano ha mostrato la propria fiducia nella tecnologia con l'introduzione di importanti investimenti in favore degli impianti agrivoltaici all'interno del PNRR, una fiducia che è stata recepita dalla Regione Veneto che ha aggiornato la propria normativa regionale, per distinguere gli impianti a terra dagli impianti agrivoltaici e favorire la realizzazione di questi ultimi.

Questa tesi si è posta l'obiettivo di verificare le potenziali applicazioni dell'agrivoltaico in Veneto: per farlo, sono stati simulati diversi layout di impianto, sia dal punto di vista energetico, tramite un software di progettazione fotovoltaica, che dal punto di vista agricolo, per il quale la bontà di una configurazione è stata quantificata tramite il valore della minima irradiazione globale annuale al di sotto dei moduli e tramite l'analisi dei pattern di ombreggiamento, calcolati grazie ad un algoritmo costruito ad hoc. Le configurazioni sono state pensate e simulate nel rispetto della più recente linea guida italiana in materia di agrivoltaico, pubblicata dal Ministero della Transizione Ecologica, che pone dei valori limite di LAOR e di producibilità energetica specifica. Le configurazioni simulate presentano riduzioni dell'irraggiamento minimo incidente al suolo variabili a seconda LAOR e dell'altezza di installazione dei moduli, con un valore massimo pari al 65%, registrato per una configurazione fissa, con LAOR pari al 39% e altezza minima pari a 1,4 m (configurazione A). A parità di LAOR, la configurazione F, contraddistinta da un sistema ad inseguimento solare a singolo asse, performa nettamente meglio sia dal punto di vista energetico che dal punto di vista agricolo, con riduzioni della radiazione incidente minima tra il 35% e il 43%, a seconda dell'altezza. In effetti, la configurazione con tracking è risultata la migliore tra quelle simulate. Tuttavia, nel confronto non è stato tenuto conto di un parametro fondamentale, ovvero il costo dell'impianto. Nonostante le ottime performance, infatti, la configurazione F è ragionevolmente la configurazione più costosa, sia in termini di investimento iniziale che di costi operativi, dovuti alla presenza di parti mobili che richiedono maggiore manutenzione e sono maggiormente suscettibili ai guasti. Per ridurre il costo di installazione, è possibile allora optare per una configurazione fissa, con prestazioni intermedie, come la configurazione C che, con un particolare layout a scacchiera, favorisce l'omogeneità del pattern di irraggiamento, anche se a spese della produzione energetica.

Questo studio rappresenta solo un possibile punto di partenza: il passo successivo, di carattere prettamente agronomico, risiede nel confrontare i pattern di ombreggiamento e la quantità di irraggiamento annuale al suolo con le richieste delle coltivazioni. Poiché la produttività agricola è strettamente legata al clima, è necessario portare avanti degli studi sia teorici che sperimentali per verificare l'adattamento delle varie colture all'ombreggiamento, per il caso specifico del Veneto.

Bibliografia

[1] IPCC, «Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability,» 2022.

[2] IRENA, «Data & Statistics,» [Online]. Available: https://www.irena.org/Statistics.

[3] G. Comini e S. Savino, La Captazione dell'Energia Solare, Udine: CISM, 2013.

[4] J. W. Tester, E. M. Drake, M. J. Driscoll, M. J. Golay e W. A. Peters, Sustainable Energy: choosing among options, Seconda Edizione a cura di, The MIT Press, 2012.

[5] L. Taiz e E. Zeiger, Plant Physiology and Development (Third Edition), Sinauer Associates, 2002.

[6] A. Luque e S. Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering (Second Edition), John Wiley and Sons, Incorporated, 2011.

[7] «PVEducation,» [Online]. Available: https://www.pveducation.org/.

[8] A. McEvoy, T. Markvart e L. Castañer, Practical Handbook of Photovoltaics (Second Edition), Academic Press, 2012.

[9] Fraunhofer ISE, «Photovoltaics Report,» 2022.

[10] Terna S.p.a., «Pubblicazioni Statistiche,» [Online]. Available: https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/statistiche/pubblicazioni-statistiche.

[11] E. Lorenzo, «On the historical origins of bifacial PV modelling,» *Solar Energy*, vol. 218, pp. 587-595, 2021.

[12] VDMA, «International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV),» 2022.

[13] IEA PVPS, «Trends in Photovoltaic Applications,» 2022.

[14] LG, «Bifacial Design Guide».

[15] «Insolight,» [Online]. Available: https://insolight.ch/.

[16] «TubeSolar AG,» [Online]. Available: https://tubesolar.de/.

[17] A. Scognamiglio, «'Photovoltaic landscapes': Design and assessment. A critical review for a new transdisciplinary design vision,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 55, pp. 629-661, 2016.

[18] A. Goetzberg e A. Zastrow, «On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation,» *International Jurnal of Solar Energy,* vol. 1, pp. 55-69, 1982.

[19] SolarPower Europe, «Agrisolar: best practices guidelines,» 2021.

[20] «Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR),» 2021.

[21] A. Colantoni, M. Cecchini, D. Monarca, R. Ruggeri, F. Rossini, U. Bernabucci, R. Cortingnani, R. Primi, V. DiStefano, L. Bianchini e R. Alemanno, «Linee guida per l'applicazione dell'agro-fotovoltaico in Italia,» Università degli Studi della Tuscia, 2021.

[22] DIN SPEC 91434, «Agri-Photovoltaik-Anlagen - Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung,» 2021.

[23] AIAF, «Agroforestazione,» 2014. [Online]. Available: http://www.agroforestry.it.

[24] FEAMP, «Acquacoltura. Cos'è, come si fa, e quali sono le opportunità?,» 2020. [Online]. Available: https://pofeamp.politicheagricole.it/it/notizie/acquacoltura-cos%C3%A8-come-si-fa-e-quali-sono-le-opportunit%C3%A0/#item-1-1-header.

[25] A. Pringle, R. Handler e J. Pearce, «Aquavoltaics: Synergies for dual use of water area for solar photovoltaic electricity generation and aquaculture,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 80, pp. 572-584, 2017.

[26] L. J. Walston, S. K. Mishra, H. M. Hartmann, I. Hlohowskyj, J. McCall e J. Macknick, «Examining the Potential for Agricultural Benefits from Pollinator Habitat at Solar Facilities in the United States,» *Environ. Sci. Technol.,* vol. 52, pp. 7566-7576, 2018.

[27] A. Armstrong, L. Brown, G. Davies, J. D. Whyatt e S. G. Potts, «Honeybee pollination benefits could inform solar park business cases, planning decisions and environmental sustainability targets,» *Biological Conservation,* vol. 263, p. 109332, 2021.

[28] K. Halvorson, R. Baumung, G. Leroy, C. Chen e P. Boettcher, «Protection of honeybees and other pollinators: one global study,» *Apidologie,* 2021.

[29] Clean Energy Council, «Australian guide to agrisolar for large-scale solar,» 2021.

[30] A. S. C. Maia, E. d. A. Culhari, V. d. F. C. Fonsêca, H. F. M. Milan e K. G. Gebremedhin, «Photovoltaic panels as shading resources for livestock,» *Journal of Cleaner Production,* vol. 258, p. 120551, 2020.

[31] Fraunhofer ISE, «Agrivoltaics: opportunities for agriculture and energy transition. A Guideline for Germany,» 2020.

[32] B. Willockx, B. Herteleer, B. Ronsijn, B. Uitterhaegen e J. Cappelle, «A standardized classification and performance indicators of agrivoltaic systems,» in *37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2020.

[33] M. A. Al Mamun, P. Dargusch, D. Wadley, N. A. Zulkarnain e A. A. Aziz, «A review research on agrivoltaic systems,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 161, 2022.

[34] T. Sekiyama e A. Nagashima, «Solar Sharing for Both Food and Clean Energy Production: Performance of Agrivoltaic Systems for Corn, A Typical Shade-Intolerant Crop,» *Environments,* vol. 6, n. 65, 2019.

[35] Y. Elamri, B. Cheviron, J.-M. Lopez, C. Dejan e G. Belaud, «Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces,» *Agricultural Water Management,* vol. 208, pp. 440-453, 2018.

[36] Fraunhofer ISE, «Agrivoltaics,» [Online]. Available: https://www.ise.fraunhofer.de/en/key-topics/integrated-photovoltaics/agrivoltaics.html.

[37] B. Willockx e J. Cappelle, «Agrivoltaic systems: why not prioritize crops that grow in the dark? A case study with white asparagus,» in *AgriVoltaics2020*, Perpignan, Francia, 2020.

[38] M. Tajima e T. Iida, «Evolution of agrivoltaic farms in Japan,» in *AIP Conference Proceedings*, 2021.

[39] H2arvester, «Generating sustainable energy on agricultural land and producing hydrogen on the farm,» [Online]. Available: https://www.h2arvester.nl/.

[40] C. Dupratz, H. Marrou, T. G., D. L., A. Nogier e Y. Ferard, «Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: towards new agrivoltaic schemes,» *Renewable Energy,* n. 36, pp. 2725-2732, 2011.

[41] B. Valle, T. Simonneau, F. Sourd, P. Pechier, P. Hamard, T. Frisson, M. Ryckewaert e A. Christophe, «Increasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels with food crops,» *Applied Energy,* n. 206, pp. 1495-1507, 2017.

[42] M. Trommsdorff, J. Kang, C. Reise, S. Schindele, G. Bopp, A. Ehmann, A. Weselek, P. Högy e T. Obergfell, «Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* vol. 140, p. 110694, 2021.

[43] S. Amaducci, X. Yin e M. Colauzzi, «Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production,» *Applied Energy,* vol. 220, 2018.

[44] REM Tec, «Agrovoltaico,» [Online]. Available: https://remtec.energy/agrovoltaico.

[45] BayWa r.e., «Agro-fotovoltaico: i progetti BayWa r.e. nei Paesi Bassi,» 2020. [Online]. Available: https://solar-distribution.baywa-re.it/it/blog/2020/08/agro-fotovoltaico-i-progetti-baywa-r-e-nei-paesi-bassi.

[46] R. J. Randle-Boggis, E. Lara, J. Onyango, E. J. Temu e S. E. Hartley, «Agrivoltaics in East Africa: Opportunities and challenges,» in *AIP Conference Proceedings*, 2021.

[47] Enel Green Power, «Tutti i benefici dell'agrivoltaico,» [Online]. Available: https://www.enelgreenpower.com/it/storie/benefici-agrivoltaico.

[48] ADEME, I Care & Consult, Ceresco e Cétiac, «Caractériser les projets photovoltaïques sur terrains agricoles et l'agrivoltaïsme. Recueil de retours d'experiences et fiches techniques récapitulatives,» 2021.

[49] Akuo Energy, «Agrinergie®,» [Online]. Available: https://www.akuoenergy.com/en/agrinergie.

[50] C. Toledo e A. Scognamiglio, «Agrivotlaic systems design and assessment: a critical review, adn a descriptive model towards a sustainable landscape vision (three-dimensional agrivoltaic patterns),» *Sustainability,* vol. 13, p. 6871, 2021.

[51] D. Wang, Y. Sun, Y. Lin e Y. Gao, «Analysis of Light Environment under Solar Panels and Crop Layout,» in *IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2017.

[52] H. A. AL-agele, K. Proctor, G. Murthy e C. Higgins, «A Case Study of Tomato (Solanum lycopersicon var. Legend) Production andWater Productivity in Agrivoltaic Systems,» *Sustainability,* vol. 13, p. 2850, 2021.

[53] M. H. Riaz, H. Imran, R. Younas, M. A. Alam e N. Z. Butt, «Module Technology for Agrivoltaics: Vertical Bifacial Versus Tilted Monofacial Farms,» *IEEE Journal of Photovoltaics,* vol. 11, n. 2, pp. 469-477, 2021.

[54] S. Schindele, M. Trommsdorff, A. Schlaak, T. Obergfell, G. Bopp, C. Reise, C. Braun, A. Weselek, A. Bauerle, P. Högy, A. Goetzberger e E. Weber, «Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications,» *Applied Energy,* vol. 265, p. 114737, 2020.

[55] G. A. Barron-Gafford, M. A. Pavao-Zuckerman, R. L. Minor, L. F. Sutter, I. Barnett-Moreno, D. T. Blackett, M. Thompson, K. Dimond, A. K. Gerlak, G. P. Nabhan e J. E. Macknick, «Agrivoltaics provide mutual benefits across the food-energy-water nexus in drylands,» *Nature Sustainability,* vol. 2, pp. 848-855, 2019.

[56] H. Dinesh e J. M. Pearce, «The potential of agrivoltaic systems,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* n. 54, pp. 299-308, 2016.

[57] B. B. Van Aken, A. Binani, E. Barros, A. R. Burgers, F. van der Zee, A. Schotman e K. Cesar, «Ground irradiance modelling of key importance for designing nature inclusive solar parks and agrivoltaics systems,» in *European PV Solar Energy Conference and Exhibition*, 2021.

[58] A. Weselek, A. Ehmann, S. Zikeli, I. Lewandowski, S. Schindele e P. Högy, «Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review,» *Agronomy for Sustainable Development,* vol. 39, 2019.

[59] D. Ketzer, P. Schlyter, N. Weinberger e C. Rösch, «Driving and restraining forces for the implementation of the agrophotovoltaics system technology - A system dynamics analysis,» *Journal of Environmental Management,* vol. 270, 2020.

[60] H. Marrou, L. Dufur e J. Wery, «How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil–crop system?,» *European Journal of Agronomy,* vol. 50, pp. 38-51, 2013.

[61] Sun'Agri, «La station d'expérimentations de La Pugère,» [Online]. Available: https://sunagri.fr/projet/la-station-dexperimentations-de-la-pugere/.

[62] Kenergia, «Rain Water Recovery,» [Online]. Available: http://www.kenergia.it/rain-water-recovery/.

[63] Legambiente, «Agrivoltaico: le sfide per un'Italia agricola e solare,» 2020.

[64] J. Scharf, M. Grieb e M. Fritz, «Agri-Photovoltaik. Stand und offene Fragen,» Report from TFZ 73, 2021.

[65] K. Horowitz, V. Ramasamy, J. Macknick e R. Margolis, «Capital Costs for Dual-Use Photovoltaic Installations: 2020 Benchmark for Ground-Mounted PV Systems with Pollinator-Friendly Vegetation, Grazing, and Crops,» NREL, 2020.

[66] Falck Renewables, «Falck Renewables announces its first crowdfunding campaign in Sicily,» 2021. [Online]. Available: https://www.falckrenewables.com/en/media/documents-detail/falck-renewables-announces-its-first-crowdfunding-campaign-sicily.

[67] A. Povellato e B. Bimbati, «Le superfici e le produzioni agricole,» in *Conferenza regionale dell'agricoltura e dello sviluppo rurale del Veneto*, 2020.

[68] CREA-PB, «L'agricoltura veneta verso il 2030,» in *Conferenza regionale dell'agricoltura e dello sviluppo rurale del Veneto*, 2019.

[69] Regione del Veneto, «Statistiche Flash: numeri e grafici per capire il Veneto,» 2021.

[70] Veneto Agricoltura, «Rapporto 2020 sulla congiuntura del settore agricolo veneto,» 2021.

[71] Regione del Veneto, «Emergenza Crisi Idrica,» 2022. [Online]. Available: https://www.regione.veneto.it/web/gestioni-commissariali-e-post-emergenze/crisiidrica2022.

[72] ARPAV, «Il Po e la risalita del cuneo salino. La campagna di misure,» 2017. [Online]. Available: https://www.arpa.veneto.it/arpavinforma/comunicati-stampa/archivio/comunicati-2017/il-po-e-la-risalita-del-cuneo-salino.-la-campagna-di-misure.

[73] Autorità di Bacino Distrettuale del Fiume Po, «Emergenza siccità distretto del Po,» 2022. [Online]. Available: https://www.adbpo.it/emergenza-siccita-distretto-del-po-portate-ancora-molto-basse-prelievo-non-ridotto-cuneo-salino-a-quota-record-306-km-e-assenza-di-piogge-con-temperature-altissime/.

[74] Regione del Veneto, «Programma di sviluppo rurale Veneto 2014-2020 - Priorità 5,» [Online]. Available: https://psrveneto.it/priorita/priorita-5/.

[75] Confagricoltura Veneto, «Rincari, aziende agricole allo stremo: "Resisteremo pochi mesi",» 2022. [Online]. Available: https://confagricolturaveneto.it/rincari-aziende-agricole-allo-stremo-resisteremo-pochi-mesi/.

[76] F. Cappellaro, C. Palumbo e S. Trincheri, «La Comunità energetica - Vademecum 2021,» ENEA, 2021.

[77] M. Annunziato, P. Guerrieri e K. Eroe, «Webinar: L'agrivoltaico e le comunità energetiche rinnovabili: una possibile alleanza?,» 2022. [Online]. Available: https://www.agrivoltaicosostenibile.com/webinar/.

[78] Decreto-Legge 24 gennaio 2012, n. 1, *Disposizioni urgenti per la concorrenza, lo sviluppo delle infrastrutture e la competitività..*

[79] Legge 24 marzo 2012, n. 27, *Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 24 gennaio 2012, n. 1, recante disposizioni urgenti per la concorrenza, lo sviluppo delle infrastrutture e la competitività..*

[80] Decreto-Legge 31 maggio 2021, n. 77, *Governance del Piano nazionale di ripresa e resilienza e prime misure di rafforzamento delle strutture amministrative e di accelerazione e snellimento delle procedure..*

[81] Legge 29 luglio 2021, n. 108, *Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 31 maggio 2021 n. 77, recante governance del Piano nazionale di ripresa e*

resilienza e prime misure di rafforzamento delle strutture amministrative e di accelerazione e snellimento delle procedure.

[82] Decreto Legislativo 8 novembre 2021, n. 199, *Attuazione della direttiva (UE) 2018/2001 del Parlamento europeo e del Consiglio, dell'11 dicembre 2018, sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili..*

[83] Ministero della Transizione Ecologica, «Consultazione pubblica Misura PNRR: Piano di Ripresa e Resilienza, Missione 2 (Rivoluzione verde e Transizione ecologica), Componente 2 (Energia rinnovabile, idrogeno, rete e mobilità sostenibile), Investimento 1.1 (Sviluppo Agrovoltaico),» 2022.

[84] Legge regionale n. 17 del 29 luglio 2022, *Norme per la disciplina per la realizzazione di impianti fotovoltaici con moduli ubicati a terra..*

[85] Ministero della Transizione Ecologica, «Linee guida in materia di impianti agrivoltaici,» 2022.

[86] A. Perna, «Modeling and optimizing irradiance distributions in agrivoltaic systems,» Master Degree Thesis, Purdue University, 2019.

Ringraziamenti

Ringrazio la mia famiglia, lontana ma sempre vicina.

Ringrazio tutti i professori e gli esperti che mi hanno aiutato a portare a termine questo lavoro di tesi. In particolare, ringrazio il mio relatore, il Professor Lorenzoni, per la sua disponibilità e i suoi preziosi consigli, e per avermi incoraggiato a perseguire un argomento che mi sta a cuore.

Ringrazio Francesca, che ha sempre creduto in me ed è stata la mia roccia in tutti questi anni.

Ringrazio i miei colleghi universitari, ed in particolare le mie Norde, per avermi accompagnato durante questi anni universitari e per esserci sempre.

Ringrazio le mie compagne di collegio, per i pranzi e le serate passate in compagnia.

Ringrazio i miei colleghi di lavoro, per avermi accolto come se fossi una di loro, perché in fondo lo sono.

A tutti coloro che ci sono stati, grazie.

Martina