



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di LAUREA MAGISTRALE in INGEGNERIA EDILE

**VALUTAZIONE NUMERICA DELLA RESA DI UN IMPIANTO
AGRO-VOLTAICO MODELLATO SECONDO LE LINEE GUIDA
DEFINITE DAL PNRR**

**Numerical evaluation of the yield of an agro-voltaic system modeled according
to the guidelines defined by the PNRR**

Relatori:

Prof. Costanzo Di Perna

Prof. Gianluca Coccia

Tesi di Laurea di:

Giovanni Luca Chieti

A.A. 2022/2023

INDICE

INTRODUZIONE

pag. 1

CAPITOLO 1 - STATO DELL'ARTE

1.1. Fabbisogno Energetico	“ 2
1.2. Fonti Energetiche Rinnovabili	“ 5
1.2.1 Tipologie Di Energie	“ 5
1.2.2. Fonti Energetiche	“ 6
1.3. Energia Solare	“ 8
1.4. Modalità Di Conversione Dell'energia Solare	“ 9
1.4.1. Solare Fotovoltaico	“ 9
1.4.2. Solare Termico	“ 12
1.4.3. Solare A Concentrazione (CSP)	“ 15

CAPITOLO 2 - AGROVOLTAICO

2.1 PNRR - Piano Nazionale Ripresa E Resilienza	“ 18
2.2 Configurazioni Impianto Agrovoltaiico	“ 22
2.3 Colture	“ 26
2.4 Parametri Influenzati Da Un Sistema Agrovoltaiico	“ 29

CAPITOLO 3 - METODO

3.1 Calcoli	“ 32
3.1.1 Tempo	“ 32
3.1.2 Angoli	“ 33
3.2 Radiazione Solare	“ 37
3.3 Ombra	“ 39
3.4 Calcolo Del PAR	“ 39
3.5 Resa	“ 41

CAPITOLO 4 - APPROCCIO ALLA MODELLAZIONE

4.1 Dati Input	“ 44
4.2 Dati Geografici	“ 44
4.2.1 Longitudine E Latitudine	“ 45
4.2.2 Albedo – ρ	“ 47
4.3 Dati Impianto Fotovoltaico	“ 47
4.3.1 Inclinazione (β) E Angolo Azimutale Del Modulo (Z_s)	“ 48
4.3.2 Caratteristiche Tecniche Dei Moduli Fotovoltaici	“ 49
4.4 Caratteristiche Impianto Agrovoltaiico	“ 50
4.5 Dati Climatici	“ 50
4.6 PAR Limite	“ 64

CAPITOLO 5 - RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

5.1 Potenza Nominale Dell'impianto E Produzione Annua Dell'impianto	“ 65
5.2 Radiazione Fotosinteticamente Attiva – PAR	“ 66
5.3 Resa Impianto Agrovoltaiico	“ 72
5.3.1 Resa Impianto Fotovoltaico - Y_{PV}	“ 72
5.3.2 Resa Colture - Y_{PAR}	“ 73
5.3.3 Resa Totale Dell'impianto Agrovoltaiico – LPF	“ 79

CAPITOLO 6 - CONCLUSIONI

“ 83

BIBLIOGRAFIA

“ 87

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1 – Consumo mondiale per fonte 2019	pag. 2
Fig. 2 – Consumo mondiale per fonte 1971-2019	“ 3
Fig. 3 –Emissioni mondiali di CO ₂ per combustibile 1971-2019	“ 3
Fig. 4 – Esempi di energia	“ 5
Fig. 5 – Esempi di energia rinnovabili	“ 7
Fig. 6 - Celle fotovoltaiche monocristalline	“ 10
Fig. 7 - Celle fotovoltaiche policristalline	“ 11
Fig. 8 - Celle fotovoltaiche amorfo o a film sottile	“ 11
Fig. 9 - Pannelli sottovuoto	“ 13
Fig. 10 - Pannelli solari vetrati	“ 13
Fig. 11 - Pannelli solari scoperti	“ 14
Fig. 12 - Esempio di CSP a torre centrale	“ 16
Fig. 13 – Concept impianto agrovoltaico	“ 17
Fig. 14 – Fondi PNRR “Componente 2”	“ 19
Fig. 15 – Layout impianto agrovoltaico	“ 22
Fig. 16 – Layout impianto agrovoltaico	“ 22
Fig. 17 – Layout impianto agrovoltaico	“ 22
Fig. 18 – Impianto fotovoltaico standard	“ 23
Fig. 19 – Impianto fotovoltaico a inseguimento	“ 23
Fig. 20 – Pannelli fotovoltaici standard	“ 24
Fig. 21 – Pannelli fotovoltaici bifacciali	“ 24
Fig. 22 – Diversi pattern spaziali	“ 25
Fig. 23 – Coltivazione tra le stringhe	“ 26
Fig. 24 – Modalità di fotosintesi	“ 27

Fig. 25 – Spettro elettromagnetico	“ 30
Fig. 26 – Correlazione tra percentuale di fotosintesi e luce	“ 31
Fig. 27 – Angolo di declinazione	“ 33
Fig. 28 – Angolo di declinazione, orario e latitudine	“ 34
Fig. 29 – Angolo azimutale, zenitale e di altitudine solare	“ 35
Fig. 30 – Angoli di incidenza	“ 36
Fig. 31 – Radiazione solare diretta su superficie orizzontale e inclinata	“ 37
Fig. 32 – ombreggiamento pannelli fotovoltaici	“ 39
Fig. 33 – curve di PAR	“ 41
Fig. 34 – Retta PAR _{th} che non interseca la curva di PAR	“ 41
Fig. 35 - Retta PAR _{th} che interseca la curva di PAR	“ 42
Fig. 36 – Curva radiazione globale	“ 42
Fig. 37 – Meridiani e Longitudine	“ 45
Fig. 38 – Paralleli e Latitudine	“ 46
Fig. 39 – Angolo di inclinazione- beta	“ 48
Fig. 40 – Angolo azimutale Z _s	“ 48
Fig. 41 – architettura standard	“ 49
Fig. 42 – Architettura PERC	“ 49
Fig. 43 – PAR gennaio	“ 66
Fig. 44 – PAR febbraio	“ 66
Fig. 45 – PAR marzo	“ 67
Fig. 46 – PAR aprile	“ 67
Fig. 47 – PAR maggio	“ 68
Fig. 48 – PAR giugno	“ 68
Fig. 49 – PAR luglio	“ 69

Fig. 50 – PAR agosto	“ 69
Fig. 51 - PAR settembre	“ 70
Fig. 52 – PAR ottobre	“ 70
Fig. 53 – PAR novembre	“ 71
Fig. 54 – PAR dicembre	“ 71
Fig. 55 – Radiazione globale e PAR febbraio, considerando la lattuga	“ 76
Fig. 56 – Radiazione globale e PAR febbraio, considerando il cavolo	“ 77
Fig. 57 – LPF di ogni mese con una coltura di lattughe, in blu LAOR 35%, in rosso LAOR 24% e in arancio LAOR 14%	“ 81
Fig. 58 – LPF di ogni mese con una coltura di cavoli, in blu LAOR 35%, in rosso LAOR 24% e in arancio LAOR 14%	“ 82
Fig. 59 – LPF di ogni mese con una coltura di pomodori, in blu LAOR 35%, in rosso LAOR 24% e in arancio LAOR 14%	“ 82

INDICE DELLE TABELLE

Tab. 1 – Piante tolleranti e intolleranti all’ombra	pag. 28
Tab. 2 – Punti di saturazione di diverse colture	“ 31
Tab. 3 – Dati geografici	“ 44
Tab. 4 – Coefficiente di albedo da UNI 8477 [52]	“ 47
Tab. 5 – Dati relativi a fotovoltaico standard di riferimento	“ 47
Tab. 6 – Layout impianto agrovoltaico	“ 50
Tab. 7 – Orari di mezzogiorno solare, alba e tramonto.	“ 51
Tab. 8.1 – Radiazione solare globale e diretta gennaio	“ 52
Tab. 8.2 – Radiazione solare globale e diretta febbraio	“ 53
Tab. 8.3 – Radiazione solare globale e diretta marzo	“ 54
Tab. 8.4 – Radiazione solare globale e diretta aprile	“ 55
Tab. 8.5 – Radiazione solare globale e diretta maggio	“ 56
Tab. 8.6 – Radiazione solare globale e diretta giugno	“ 57
Tab. 8.7 – Radiazione solare globale e diretta luglio	“ 58
Tab. 8.8 – Radiazione solare globale e diretta agosto	“ 59
Tab. 8.9 – Radiazione solare globale e diretta settembre	“ 60
Tab. 8.10 – Radiazione solare globale e diretta ottobre	“ 61
Tab. 8.11 – Radiazione solare globale e diretta settembre	“ 62
Tab. 8.12 – Radiazione solare globale e diretta dicembre	“ 63
Tab. 9 – Punti di saturazione di diverse colture	“ 64
Tab. 10 – Potenza nominale e produzione annua di tre configurazioni di impianto agrovoltaico	“ 65
Tab. 11 – Rendimento impianto fotovoltaico in contesto agrovoltaico	“ 72
Tab. 12 – Resa di una coltura di lattuga	“ 73
Tab. 13 – Resa di una coltura di cavolo	“ 74

Tab. 14 – Resa di una coltura di pomodoro	“ 75
Tab. 15 – Y_{PAR} ora per ora lattuga	“ 76
Tab. 16 – Y_{PAR} ora per ora cavolo	“ 78
Tab. 17 – Resa LPF con la lattuga	“ 79
Tab. 18 – Resa LPF con il cavolo	“ 80
Tab. 19 – Resa LPF con il pomodoro	“ 80
Tab. 20 – Resa LPF annuale	“ 81
Tab. 21 – Valori minimi per accedere al finanziamento	“ 83
Tab. 22 – Valori massimi per accedere al finanziamento	“ 83
Tab. 23 – Configurazioni impianto agrovoltaiico	“ 84
Tab. 24 – Colture divise per mese	“ 85

NOMENCLATURA

Lettere latine

S_{agricola} – Superficie minima per l'attività agricola

S_{tot} – Superficie totale dell'impianto agrovoltaico

LAOR – Percentuale di superficie complessiva coperta dai moduli

FV_{agri} – Produzione di energia elettrica impianto agrovoltaico

FV_{standard} – Produzione di energia elettrica impianto agrovoltaico

ET – Equazione del tempo

AST – Correzione dell'ora

LST – Ora locale standard

ET – Equazione del tempo

SL – Longitudine standard

LL – Longitudine standard

DS – Ora legale

h – Angolo orario

LSN – Mezzogiorno solare

L – Latitudine locale

Z – Angolo azimutale

Z_S – Angolo azimutale della superficie del pannello

G_{Bt} – Radiazione solare diretta a una superficie inclinata

G_{Bn} – Radiazione solare diretta misurata

G_B – Radiazione solare diretta normale a una superficie orizzontale

G_D – Radiazione solare diffusa

G – Radiazione solare globale misurata

a – Altezza del pannello fotovoltaico

Sup_{omb} – Superficie in ombra

l_s – Superficie totale dei moduli fotovoltaici

b_s – Lunghezza dell'ombra

$Perc_{omb}$ – Percentuale della superficie in ombra

$Perc_{Rad}$ – Percentuale della superficie del terreno non in ombra

$Perc_{Diretta}$ – Quantità di radiazione solare diretta, normale al terreno

PAR – Radiazione fotosinteticamente attiva

Y_{PAR} - Rendimento coltura

Y_{PV} – Rendimento fotovoltaico

LPF – Resa totale impianto agrovoltaico

Lettere greche

δ – Angolo di declinazione

α – Angolo di altitudine solare

Φ – Angolo zenitale

β – Inclinazione della superficie del pannello fotovoltaico

θ – Angolo di incidenza tra la superficie considerata e i raggi del sole.

ρ – Albedo

INTRODUZIONE

L'argomento trattato nella seguente tesi è una valutazione numerica della resa degli impianti agrovoltaici, i quali possono essere una soluzione valida alla costante crescita di domanda di energia e di cibo, con la necessità di contenere le emissioni e di occupare meno suolo possibile; nello specifico, sono state confrontate diverse tipologie di impianto agrovoltaico, valutando la resa di ognuno. Questo sistema, che è possibile definire ibrido, è stato modellato seguendo le indicazioni del "Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza" (PNRR), in quanto sono stati stanziati dei finanziamenti.

Nel primo capitolo verrà introdotto il concetto di risparmio energetico, associato allo sviluppo sostenibile e posta attenzione alle fonti rinnovabili, in particolare l'energia solare, in tal senso verranno introdotte le tecnologie che consentono di sfruttarla al meglio; inoltre, si fa riferimento anche alle direttive europee così da avere un riferimento normativo.

Nel secondo capitolo viene introdotto l'argomento principe della tesi, l'agrovoltaico; nello specifico vengono illustrati i principi dietro a una corretta progettazione, gli elementi che costituiscono un impianto agrovoltaico. In questo capitolo viene introdotto anche il PNRR, in quanto sono stati stanziati dei fondi per incentivare la sua diffusione. In ultimo, sono stati descritti i comportamenti delle colture e i parametri che le influenzano.

Nel terzo capitolo vengono spiegati tutti i calcoli che stanno dietro alle simulazioni, calcoli che servono per trovare gli angoli di incidenza in funzione della posizione del sole durante l'arco del giorno e dell'anno, la produzione di energia e la resa.

Nel quarto capitolo è stato introdotto il software con cui sono state svolte le simulazioni, con i dati input utili al corretto funzionamento del modello.

Nel quinto capitolo verranno analizzati tutti i risultati delle simulazioni, dalle quali sarà possibile ricavare dati come la resa, la potenza dell'impianto o la produzione di energia.

Nel sesto capitolo verranno tratte le dovute conclusioni, attraverso un'analisi critica.

CAPITOLO 1

STATO DELL'ARTE

Il sole è la stella attorno alla quale orbitano tutti i pianeti del sistema solare, tra cui la Terra, che è il terzo pianeta in ordine di distanza a partire dal Sole. La luce solare è la principale fonte di energia che può essere sfruttata sulla Terra, attraverso processi naturali o sintetici. Sotto il profilo fisico, l'energia è la capacità di un sistema di compiere lavoro, né si crea né si distrugge ma si trasforma. L'origine principale dell'energia solare, sotto forma di energia radiante e luminosa, deriva dalla fusione nucleare di nuclei di idrogeno in nuclei di elio, in quanto la massa del sole è composta da circa il 74% di idrogeno e il 25% di elio, la restante parte è composta da tracce di elementi pesanti [1].

1.1. FABBISOGNO ENERGETICO

Il fabbisogno energetico è la quantità di energia, ricavata da fonti rinnovabili e da fonti non rinnovabili, necessario alle comunità per il sostentamento della vita economica. Per commisurare tale fabbisogno si fa riferimento ai consumi energetici degli anni passati per quantificare i processi dinamici che danno luogo ad un aumento dell'entropia, una grandezza che viene interpretata come una misura del caos in un sistema fisico o più in generale nell'universo. Nel 2019, il consumo di energia primaria è stato di circa 418 EJ, dove il 40,4 % dell'energia primaria deriva dal petrolio, il 9,5 % dal carbone e il 16,4 % dal gas naturale, ciò ha comportato una quantità di emissioni di CO² pari a 33622 Mt [2].

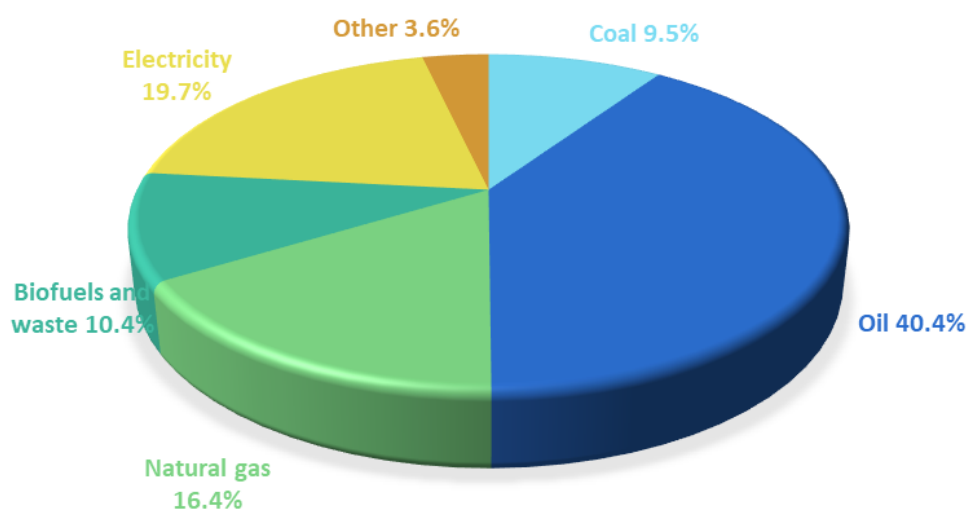


Fig. 1 – Consumo mondiale per fonte 2019[2]

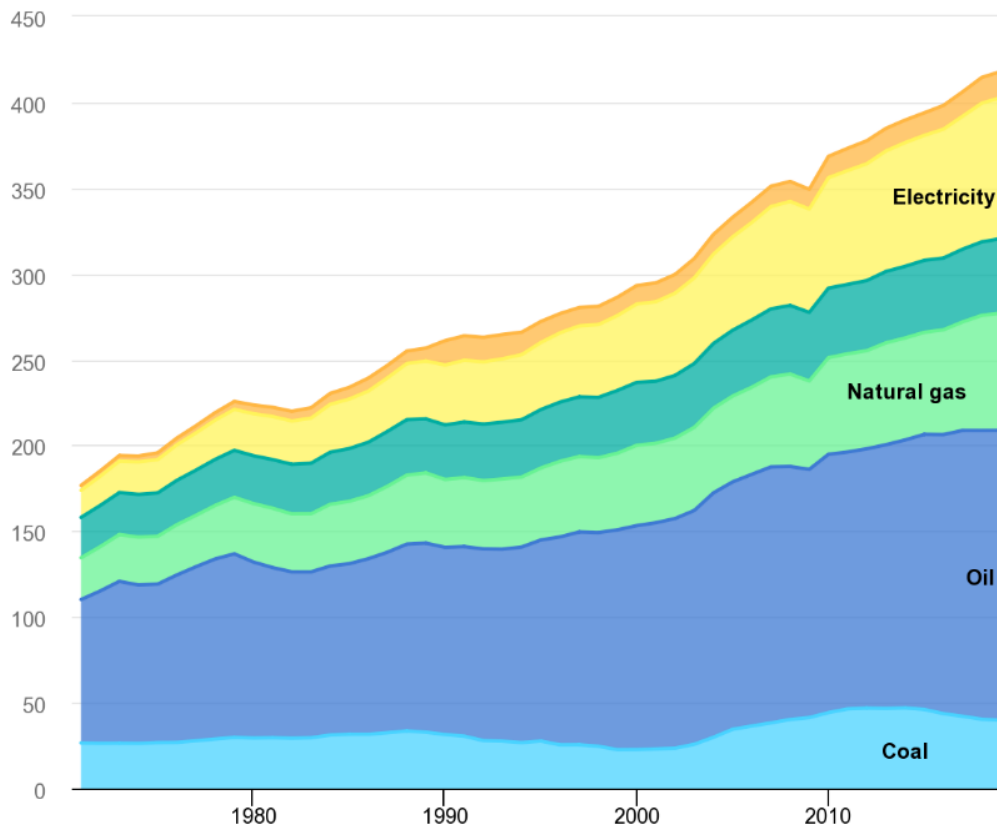


Fig. 2 – Consumo mondiale per fonte 1971-2019[2]

L'anidride carbonica rimane nell'atmosfera per secoli provocando effetti negativi come il riscaldamento globale e il fenomeno delle piogge acide, che hanno influenze negative sull'uomo e più in generale sul pianeta. A tal proposito è importante trovare fonti di energia che riescono a soddisfare il fabbisogno energetico dell'umanità che emettono meno CO₂ possibile, così da tutelare l'ambiente e la salute dell'uomo [2].

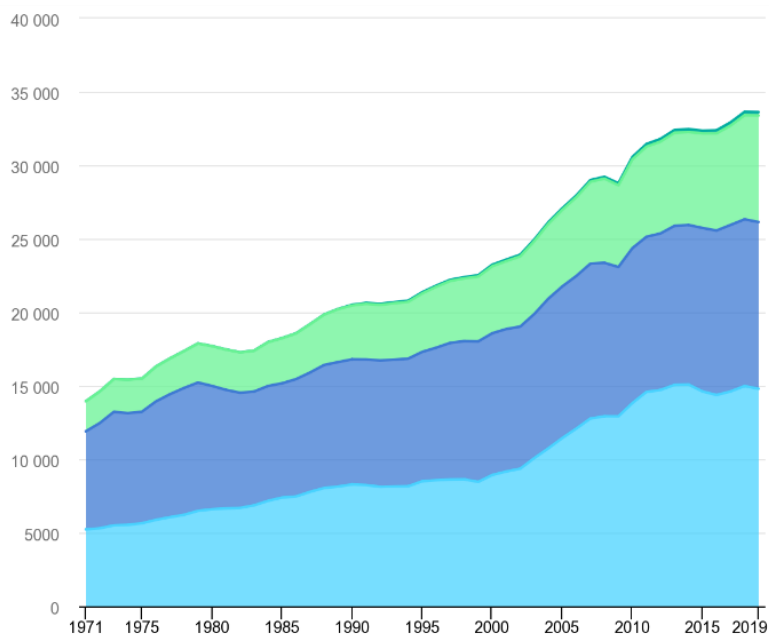


Fig. 3 –Emissioni mondiali di CO₂ per combustibile 1971-2019 [2]

Direttive dell'Unione Europea

“...La legislazione dell'UE sulla promozione delle energie rinnovabili si è evoluta in maniera significativa negli ultimi 15 anni. Nel 2018 i leader dell'Unione hanno fissato un obiettivo del 32 % di energie rinnovabili nel consumo finale di energia dell'UE entro il 2030. Nel marzo 2023, in linea con l'ambizione dell'UE di conseguire la neutralità climatica entro il 2050, i colegislatori hanno deciso di portare al 42,5 % la quota di energie rinnovabili per il 2030, con l'obiettivo di raggiungere il 45 %. Il quadro politico aggiornato in materia di energie rinnovabili per il 2030 e il periodo successivo al 2030 è in fase di discussione.” [3]

Ai fini di ridurre le emissioni e incentivare l'utilizzo di energie rinnovabili, l'Unione Europea emanato diverse direttive.

Dall'articolo 194 del trattato sul funzionamento dell'Unione europea, derivano quattro risultati conseguenti:

- A. Direttiva sulle energie rinnovabili
- B. Green Deal europeo
- C. Azioni future
- D. Problemi specifici relativi alle risorse

I risultati conseguenti presenti nell'articolo 194 mirano alla riduzione della dipendenza da fonti non rinnovabili, sia per ridurre quanto più possibile l'impatto ambientale, sia per raggiungere una dipendenza energetica da parte degli stati membri dell'unione europea, soprattutto a seguito dell'invasione Russa in Ucraina. A partire dalla proposta della commissione europea del dicembre 2019 del “Green Deal”, programma per rendere l'Europa il primo continente climaticamente neutro entro il 2050, l'unione europea ha emanato un “pacchetto legislativo in materia di energia”, in modifica al piano “REPowerEU”, per eliminare gradualmente la dipendenza dai combustibili fossili russi, innalzando la quota parte di energia derivante da fonti rinnovabili al 45% entro il 2030 e allineando gli obiettivi secondari alle nuove ambizioni del piano “REPowerEU”, tra cui:

- un obbligo graduale di installare pannelli solari sui nuovi edifici;
- un obiettivo di 10 milioni di tonnellate di idrogeno rinnovabile prodotte internamente 10 milioni di tonnellate di idrogeno rinnovabile importate entro il 2030;
- il raddoppio dell'attuale tasso di diffusione delle pompe di calore negli edifici individuali;
- un obiettivo per i combustibili rinnovabili di origine non biologica (75 % per l'industria e 5 % per i trasporti);

- un incremento della produzione di biometano fino a 35 miliardi di metri cubi entro il 2030.

1.2. FONTI ENERGETICHE RINNOVABILI

1.2.1 Tipologie di energie

Prima di introdurre le fonti energetiche rinnovabili è importante definire il concetto di energia e potenza.

L'energia è definita come la capacità di un sistema di compiere lavoro. In un sistema chiuso, è una quantità che si conserva e rimane costante, tuttavia, può essere convertita da una forma di energia all'altra.

La potenza è definita come la velocità di esecuzione di un determinato lavoro, più in generale, la potenza rappresenta l'energia totale prodotta per unità di tempo.

Esistono diversi tipi di energia:

- Energia meccanica;
- Energia termica;
- Energia elettrica;
- Energia chimica;
- Energia luminosa;
- Energia nucleare.



Fig. 4 – Esempi di energia [4][5][6]

L'energia meccanica si presenta sotto forma di energia potenziale ed energia cinetica, dove l'energia potenziale è funzione della posizione del corpo in un campo di forze conservativo, mentre l'energia cinetica può essere di tipo traslazionale e rotazionale.

L'energia termica è la parte dell'energia interna di un oggetto che può essere trasferita sotto forma di calore e rappresenta la somma dell'energia cinetica e dell'energia di legame di atomi e molecole a livello microscopico. Una caratteristica interessante dell'energia termica è la semplicità con la quale può essere stoccata, sottoforma di calore latente o sensibile, al contrario risulta complicato il trasporto.

L'elettricità è una forma di energia derivante dal movimento di cariche elettriche, le quali sono atomi che perdono o acquistano elettroni. L'energia elettrica ha la caratteristica di essere trasportata agevolmente, ma presenta criticità sull'accumulo, in quanto per lo stoccaggio è necessario l'utilizzo di batterie, le quali risultano costose, ingombranti e pesanti.

1.2.2. Fonti energetiche

Le fonti energetiche si distinguono in due tipi:

- Fonti di energia primarie;
- Fonti di energia secondarie.

Le fonti di energia primarie sono le fonti presenti direttamente in natura, come:

- il petrolio;
- il carbone;
- il gas naturale;
- la legna da ardere o biomasse;
- i combustibili nucleari;
- il moto dell'acqua (energia idroelettrica);
- il moto del vento (energia eolica);
- le sorgenti di calore terrestre (energia geotermica);
- la radiazione solare.

Le fonti di energia secondarie sono fonti non presenti direttamente in natura. Sono fonti di energia derivate dalle fonti primarie come, ad esempio, l'energia elettrica o l'idrogeno. Le fonti secondarie sono un prodotto di trasformazione delle primarie e non possono essere considerate una risorsa naturale.

Per energie rinnovabili si fa riferimento a quelle fonti energetiche non soggette ad esaurimento e il cui utilizzo non reca pregiudizio alle risorse naturali, in quanto la fonte di energia si rigenera alla stessa velocità con cui viene utilizzata. [7]

Nell'articolo 2 del Decreto Legislativo 29 dicembre 2003, n. 387 sono state descritte le fonti energetiche non fossili, che possono essere definite come rinnovabili:

- eolica;
- solare;
- geotermica;
- del moto ondoso;
- maremotrice;
- idraulica;
- biomasse;
- gas di discarica;
- gas residuati dai processi di depurazione;
- biogas.

In particolare, per biomasse si intende: la parte biodegradabile dei prodotti, rifiuti e residui provenienti dall'agricoltura (comprendente sostanze vegetali e animali) e dalla silvicoltura e dalle industrie connesse, nonché la parte biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani.



Fig. 5 – Esempi di energia rinnovabili [8],[9],[10],[11]

1.3. ENERGIA SOLARE

Il sole è una delle principali fonti di energia gratuita inesauribile per il pianeta Terra, esso è una sfera di materia gassosa intensamente calda con un diametro di $1.392.700 \text{ km}$. L'energia solare, sottoforma di radiazioni elettromagnetiche, impiega circa 8 min e 20 s per raggiungere il nostro pianeta, in quanto la radiazione solare viaggia alla velocità della luce nel vuoto (circa $300.000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$) e il sole dista circa $150 \text{ milioni di km}$ dalla Terra. La produzione totale di energia solare è di $3,8 \times 10^{20} \text{ MW}$, pari a $63 \text{ MW} \cdot \text{m}^{-2}$ di superficie solare, poiché il sole, avendo una temperatura effettiva del corpo nero di circa 5760 K , può essere assimilato a un reattore a fusione continua in cui l'idrogeno viene convertito in elio. La frazione di radiazione solare che arriva sulla Terra, pari a $1,7 \times 10^{14} \text{ kW}$, consente di soddisfare il fabbisogno energetico mondiale di 1 anno (circa 900 EJ).[1]

Quando si parla di energia solare è importante tenere conto dell'irraggiamento solare e della radiazione solare [12]:

- *L'irraggiamento solare* è la quantità di energia solare che colpisce una superficie unitaria in un intervallo di tempo determinato, solitamente nell'arco di un giorno. Si misura in $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{giorno}$ e dipende dalle condizioni meteorologiche e dalla latitudine
- *La radiazione solare* è il valore istantaneo della radiazione solare che colpisce una determinata superficie. Si misura in $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$.

Le radiazioni elettromagnetiche arrivano sulla superficie terrestre sotto forma di radiazioni ultraviolette (10 %), visibili (50 %), infrarosse (40 %).

Quando la radiazione raggiunge l'atmosfera si possono verificare tre fenomeni:

- *Riflessione*: le radiazioni arrivano sulle nubi e vengono riflesse senza perdere energia.
- *Diffusione*: le radiazioni solari viaggiano in linea retta ma le molecole d'acqua e di aerosol le deviano in tutte le direzioni. Per questo risultano illuminate anche zone che non ricevono direttamente la luce solare.
- *Assorbimento*: le radiazioni sono assorbite dalle molecole di alcuni gas e dalle nubi e in parte sono rimesse con lunghezza d'onda maggiore.

Il ritorno dell'energia nello spazio avviene perciò attraverso due modalità.

- *Riflessione*: le radiazioni sono respinte;
- *Irraggiamento*: le radiazioni sono assorbite e poi rimesse.

Del totale dell'energia solare, circa il 30 % è riflesso dalle nubi e dalle polveri atmosferiche, il 19 % è assorbito direttamente dall'atmosfera e il 51 % raggiunge la superficie: direttamente (26 %), diffusa dalle nubi (14 %) e diffusa dall'atmosfera (11 %); poiché il 4 % è riflesso dal suolo, è disponibile solo il 47 %, dell'energia solare [12].

1.4. MODALITÀ DI CONVERSIONE DELL'ENERGIA SOLARE

L'energia solare è la tipologia di energia da fonte rinnovabile sta registrando un tasso di crescita superiore rispetto alle altre, stando a quanto riportato nel report IRENA 2019 c'è stato un incremento del 24% annuo, ciò consente un interesse nello sviluppo tecnologico dei sistemi di conversione e accumulo, in modo da abbattere i costi e incrementare l'efficienza degli impianti che sfruttano l'energia fornita dal sole. Lo sfruttamento di risorse rinnovabili, soprattutto l'energia solare, è diventata una realtà molto diffusa, grazie a un lavoro di sensibilizzazione della popolazione su tematiche legate all'ambiente e al risparmio energetico, attraverso strumenti di comunicazione e incentivi economici previsti dai governi [13].

Ci sono tre tipologie di impianto principali che consentono di sfruttare l'energia solare:

- Solare fotovoltaico;
- Solare termico;
- Solare a concentrazione (CSP).

1.4.1. Solare fotovoltaico

L'origine della tecnologia fotovoltaica risale al 1839, quando il fisico Alexandre Edmond Becquerel notò che gli elettrodi, immersi in una soluzione conduttrice, generavano un piccolo flusso di corrente, se esposti alla luce solare. L'invenzione del primo pannello fotovoltaico risale al 1880, quando l'americano Charles Fritts, a seguito degli studi effettuati tre anni prima dagli scienziati Smith, Adams ed Evans, combinò diverse celle fotovoltaiche, composte con uno strato di selenio rivestito da una sottile pellicola d'oro.

La svolta sul fotovoltaico si ebbe negli anni '50 quando, basandosi sulla tesi di Albert Einstein sull'effetto fotoelettrico, gli scienziati Pearson, Chapin e Fuller idearono la prima cella solare composta da silicio. Nel 1958 i pannelli fotovoltaici furono installati, per la prima volta, su un satellite mandato in orbita, così da poterlo alimentare fino al 1964, anno in cui il satellite è stato disattivato. Negli Stati Uniti questa tecnologia si è diffusa rapidamente, da quando è stata commercializzata a partire dal 1963, a seguito della crisi energetica degli anni '70. In Italia il primo impianto fotovoltaico con una potenza di 1 kW è stato installato nel 1979. La tecnologia legata alla produzione di energia

elettrica con pannelli solari fotovoltaici, in Italia si è diffusa rapidamente grazie ad incentivi e a fondi stanziati [14].

La tecnologia fotovoltaica sfrutta l'effetto fotovoltaico, che attraverso le proprietà di alcuni materiali semiconduttori, come il silicio che è universalmente utilizzato ed è anche l'elemento più diffuso sulla crosta terrestre dopo l'ossigeno, sono capaci di convertire l'energia della radiazione solare che li colpisce in energia elettrica.

In base al tipo di silicio utilizzato, si possono classificare le diverse tipologie di celle fotovoltaiche:

- Monocristallino;
 - Costo elevato;
 - Duraturo nel tempo;
 - Sfrutta la radiazione diffusa;
 - Alta efficienza.



Fig. 6 - Celle fotovoltaiche monocristalline [15]

- Policristallino;
 - Basso costo;
 - Non sfrutta la radiazione diffusa;
 - Efficienza ridotta.



Fig. 7 - Celle fotovoltaiche policristalline [16]

- Amorfo o a film sottile (non ha una struttura cristallina)
 - Basso costo;
 - Adatto a superfici curve;
 - Bassa efficienza.



Fig. 8 - Celle fotovoltaiche amorfo o a film sottile [17]

1.4.2. Solare termico

L'energia solare viene utilizzata per scaldare un fluido che scorre all'interno di tubazioni. È possibile pensare che questo sistema di sfruttamento dell'energia solare può risalire all'epoca degli antichi romani, che sfruttavano l'energia solare per scaldare delle vasche piene d'acqua per motivi di benessere.

L'elemento fondamentale per lo sfruttamento e la conversione dell'energia solare è il collettore solare, il quale viene utilizzato principalmente per due scopi:

- La produzione di acqua calda sanitaria;
- Il riscaldamento ambientale.

Il solare termico è un tipo di sistema che può essere adoperato sia in singolo o sia di supporto ad altre tipologie di impianto, ad esempio, può essere utilizzato per preriscaldare il fluido termovettore in modo da ridurre il carico dell'impianto, così da ridurre i consumi.

Un impianto solare è formato generalmente dai seguenti elementi:

- Collettore solare;
- Serbatoio di accumulo dell'acqua calda;
- Un circuito idraulico;
- Un sistema di regolazione elettronico.

Il sistema può essere dotato di tre tipologie di pannello solare:

- Pannelli sottovuoto;
 - Perdite di calore basse;
 - Si supera di circa 100 °C la temperatura ambiente;
 - Alta efficienza;
 - Alto costo.



Fig. 9 - Pannelli sottovuoto [18]

- Pannelli solari vetrati;
 - Più utilizzati;
 - Si supera di circa 70 °C la temperatura ambiente;
 - Più economici dei pannelli sottovuoto.



Fig. 10 - Pannelli solari vetrati [19]

- Pannelli solari scoperti.
 - Privi di vetro;
 - Hanno bisogno di temperature ambientali superiori ai 20 °C;
 - Basso costo.



Fig. 11 - Pannelli solari scoperti [20]

Un elemento fondamentale per l'efficienza dell'impianto solare è il serbatoio di accumulo, il quale ha il compito di mantenere calda l'acqua al suo interno, anche per diversi giorni, attraverso una coibentazione adeguata. Un corretto dimensionamento del serbatoio andrà ad incidere sul rendimento dell'impianto, in quanto il serbatoio deve essere dimensionato in funzione del numero di pannelli installati e al consumo di acqua giornaliero. [21]

1.4.3. Solare a concentrazione (CSP)

Gli impianti solari a concentrazione, solitamente indicati come CSP (Concentrated Solar Power), ha la sua peculiarità nella possibilità di erogare energia elettrica in modo indipendente dalla risorsa [22].

Un impianto solare a concentrazione per la produzione di energia elettrica è composto da diversi elementi:

- Collettore: formato da specchi parabolici e piani, servono per concentrare e direzionare i raggi solari in un unico punto, in modo da raggiungere temperature elevate, che possono arrivare fino a 600 °C;
- Ricevitore: contiene un liquido termovettore, composto da sali o oli;
- Turbina: il fluido termovettore riscaldato trasferirà il calore attraverso uno scambiatore di calore per la produzione di vapore. Il vapore verrà utilizzato per azionare una turbina utile alla produzione di energia elettrica.
- Generatore di corrente: trasforma l'energia meccanica in energia elettrica.

Gli impianti a concentrazione possono essere differenziati in base alla tipologia di collettore e la posizione del fuoco:

- Collettore lineare a concentrazione: i pannelli sono parabolici e sono disposti uno di seguito all'altro. La caratteristica di questo schema è che al centro del punto focale è presente un tubo in cui scorre il fluido termovettore;
- Collettore lineare a riflettori Fresnel: i pannelli in questo sono piani e formano dei filari i quali convogliano i raggi solari verso il punto focale, il quale si trova più in alto rispetto ai pannelli.
- Collettore a riflettori parabolici circolari: questi collettori sono indipendenti, ognuno di essi infatti ha un ricevitore posto al centro del proprio punto focale, che risulterà essere al centro della parabola.
- Torre di energia solare: questo sistema è dotato di specchi indipendenti, che convogliano i raggi solari verso una torre, in cui è presente un ricevitore all'interno del quale è presente un serbatoio con il fluido vettore.



Fig. 12 - Esempio di CSP a torre centrale [23]

CAPITOLO 2

AGROVOLTAICO

L'utilizzo di pannelli fotovoltaici per la produzione di energia elettrica è necessario per ridurre l'impatto ambientale, perciò si adottano anche soluzioni su larga scala che necessitano di grandi spazi, che vanno in contrasto con la necessità dell'uomo di coltivare per soddisfare il fabbisogno di cibo in crescita, dovuto all'aumento della popolazione. I sistemi agrovoltaici possono offrire una soluzione a questo problematica, in quanto vanno ad integrare, negli stessi spazi, produzione di energia elettrica e produzione agricola. [24]

La terra con la sua flora è importante sia per lo sviluppo dell'economia di un paese attraverso l'agricoltura sia per gli equilibri degli ecosistemi attraverso la cattura di CO₂, la biodiversità, ecc... [25].

Gli impianti fotovoltaici hanno bisogno delle stesse condizioni delle colture per rendere al meglio, necessitano di spazi che sono esposte alla luce diurna per molte ore, hanno bisogno di terre prevalentemente pianeggianti, tutte caratteristiche necessarie anche alle aziende agricole per rendere al meglio. [26]

L'agrovoltaico implica un compromesso tra produzione agricola e produzione di energia elettrica da pannelli solari fotovoltaici, il quale fornisce dei vantaggi anche per l'utilizzo dell'acqua, in quanto si va a ridurre l'utilizzo dell'acqua per l'irrigazione dei campi, così da avere anche un risparmio sui costi di gestione. [27]



Fig. 13 – Concept impianto agrovoltaico [28]

2.1 PNRR - PIANO NAZIONALE RIPRESA E RESILIENZA

In Italia sono stati stanziati dei fondi nel “Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza” per l’agrovoltaico. [29]

Il PNRR è composto da sei missioni:

1. Digitalizzazione, innovazione, competitività, cultura e turismo
2. **Rivoluzione verde e transizione ecologica**
3. Infrastrutture per una mobilità sostenibile
4. Istruzione e ricerca
5. Inclusione e coesione
6. Salute

Dove la “Missione 2 – Rivoluzione verde e transizione ecologica” è suddivisa in ulteriori quattro componenti:

- C1. Agricoltura sostenibile ed Economia circolare
- C2. **Energia rinnovabile, idrogeno, rete e mobilità sostenibile**
- C3. Efficienza energetica e riqualificazione degli edifici
- C4. Tutela del territorio e della risorsa idrica

Il totale dei fondi stanziati per il completamento della “Missione 2” è di 59,46 miliardi di euro, suddiviso nelle quattro componenti. Nella componente “C1” sono stati stanziati 5,27 miliardi di euro, nella “C2” 23,78 miliardi di euro, nella “C3” 15,36 miliardi di euro nella “C4” 15,05 miliardi di euro. [29]

La componente che interessa l’agrovoltaico è la “C2” dove si fa riferimento al settore agricolo che è responsabile del 10% delle emissioni di gas serra in Europa. Per l’agrovoltaico sono stati stanziati 1,10 miliardi di euro. L’investimento si pone il fine di rendere più competitivo il settore agricolo, riducendo i costi di approvvigionamento energetico e migliorando al contempo le prestazioni climatiche-ambientali. [29]

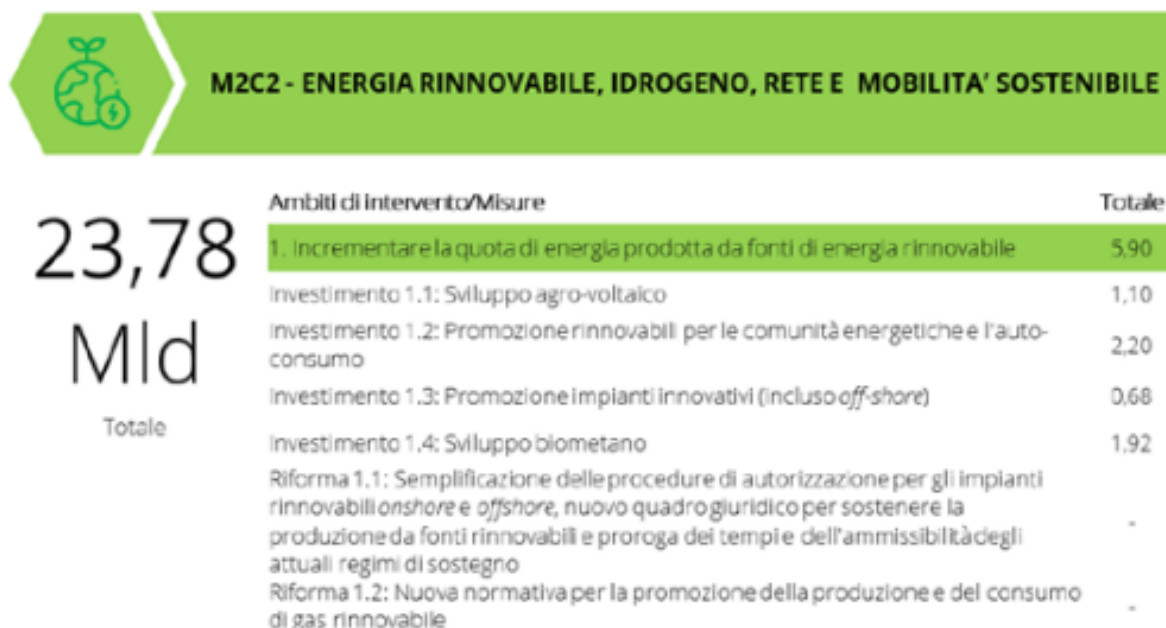


Fig. 14 – Fondi PNRR “Componente 2” [29]

“La misura di investimento nello specifico prevede:

- I. *L'implementazione di sistemi ibridi agricoltura-produzione di energia che non compromettano l'utilizzo dei terreni dedicati all'agricoltura, ma contribuiscano alla sostenibilità ambientale ed economica delle aziende coinvolte, anche potenzialmente valorizzando i bacini idrici tramite soluzioni galleggianti;*
- II. *il monitoraggio delle realizzazioni e della loro efficacia, con la raccolta dei dati sia sugli impianti fotovoltaici sia su produzione e attività agricola sottostante, al fine di valutare il microclima, il risparmio idrico, il recupero della fertilità del suolo, la resilienza ai cambiamenti climatici e la produttività agricola per i diversi tipi di colture.” [29]*

L'obiettivo dell'incentivo è di rendere più competitivo il settore agricolo, riducendo i costi di approvvigionamento energetico e migliorando l'impatto ambientale, portando la capacità produttiva degli impianti agrovoltaici a 1,04 GW, con una produzione annua stimata di circa 1.300 GWh, con una riduzione di CO2 stimata di circa 0,8 milioni di tonnellate. [29]

I requisiti degli impianti agrovoltaici per accedere all'incentivo sono stati definiti da CREA, ENEA, GSE e RSE, nell'ambito di un tavolo di coordinamento promosso dal Dipartimento Energia del MITE. [29]

Requisiti impiantistici:

- a. La potenza nominale dell'impianto deve essere superiore a 300 kW;
- b. Consentire l'integrazione fra attività agricola e produzione elettrica e valorizzare il potenziale produttivo di entrambi i sottosistemi:

1. Superficie minima per l'attività agricola

Si dovrebbe garantire sugli appezzamenti oggetto di intervento (superficie totale del sistema agrovoltaico, S_{tot}) che almeno il 70% della superficie sia destinata all'attività agricola.

$$S_{agricola} \geq 0,7 \cdot S_{tot}$$

2. Percentuale di superficie complessiva coperta dai moduli (LAOR).

Al fine di non limitare l'adizione di soluzioni particolarmente innovative ed efficienti, si ritiene opportuno adottare un limite di superficie LAOR, calcolato come: superficie complessiva dei moduli rapportata alla superficie totale occupata dal sistema Agrovoltaico.

$$LAOR \leq 40\%$$

- c. L'impianto agrovoltaico adotta soluzioni integrate innovative con moduli elevati da terra, volte a ottimizzare le prestazioni del sistema agrovoltaico sia in termini energetici che agricoli, ma non deve interferire negativamente con le attività agricole o zootecniche, perciò vengono definiti dei valori minimi di altezza dei moduli rispetto al suolo:
 - 1,3 metri nel caso di attività zootecnica per gli impianti che prevedono l'installazione dei moduli in posizione verticale fissa;
 - 2,1 metri nel caso di attività agricola colturale.
- d. Ai fini della fruizione di incentivi statali, il sistema agrovoltaico è dotato di un sistema di monitoraggio che consenta 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;

- e. Il sistema agrovoltaico è dotato di un sistema di monitoraggio che, oltre a rispettare il requisito precedente, consenta di verificare il recupero della fertilità del suolo, il microclima, la resilienza ai cambiamenti climatici.

Requisiti di esercizio:

- a. Il sistema agrovoltaico è esercito, nel corso della vita tecnica, in maniera da garantire la produzione sinergica di energia elettrica e prodotti agricoli e non compromettere la continuità dell'attività agricola e pastorale:

1. Continuità dell'attività agricola

- a. Esistenza e la resa della coltivazione;
- b. Mantenimento dell'indirizzo produttivo.

2. Producibilità elettrica minima

La produzione elettrica specifica di un impianto agrovoltaico non deve essere inferiore al 60% di un impianto fotovoltaico standard di riferimento:

$$FV_{agri} \geq 0.6 FV_{standard}$$

2.2 CONFIGURAZIONI IMPIANTO AGROVOLTAICO

Esistono diverse configurazioni dei moduli fotovoltaici:

1. Doppio uso del suolo, con una integrazione massima tra l'impianto agrovoltaico e la coltura, i moduli fotovoltaici svolgono una funzione sinergica alla coltura. [29]

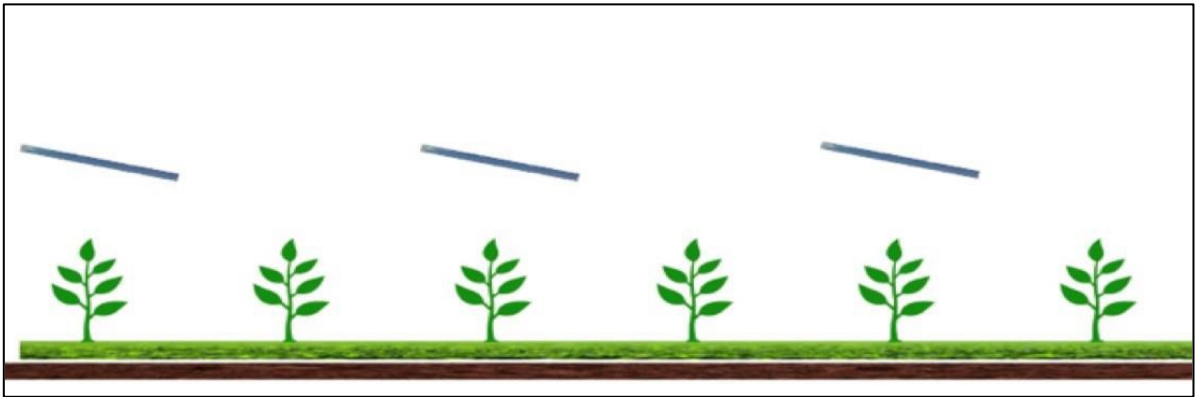


Fig. 15 – Layout impianto agrovoltaico [30]

2. L'altezza dei moduli da terra non consente lo svolgimento delle attività agricole al di sotto di essi. Grado di integrazione tra l'impianto fotovoltaico e la coltura basso. [29]

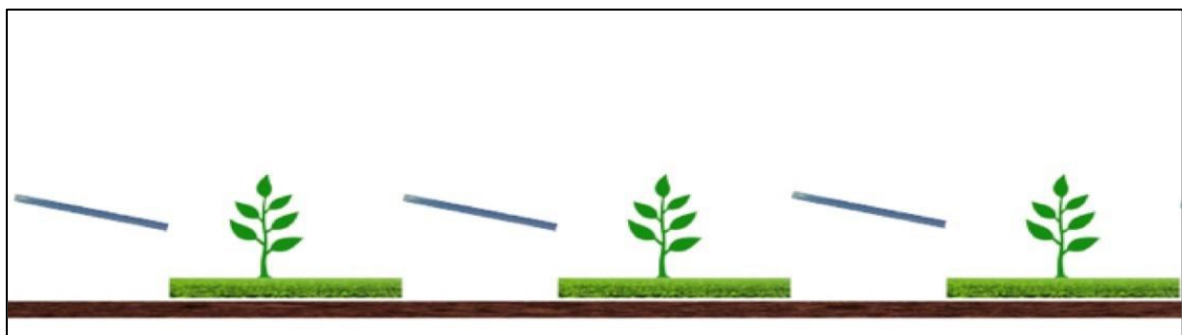


Fig. 16 – Layout impianto agrovoltaico [30]

3. L'altezza dei moduli da terra non incide sulle possibilità di coltivazione. Protezione della coltura compiuta dai moduli fotovoltaici che operano come barriere frangivento. [29]

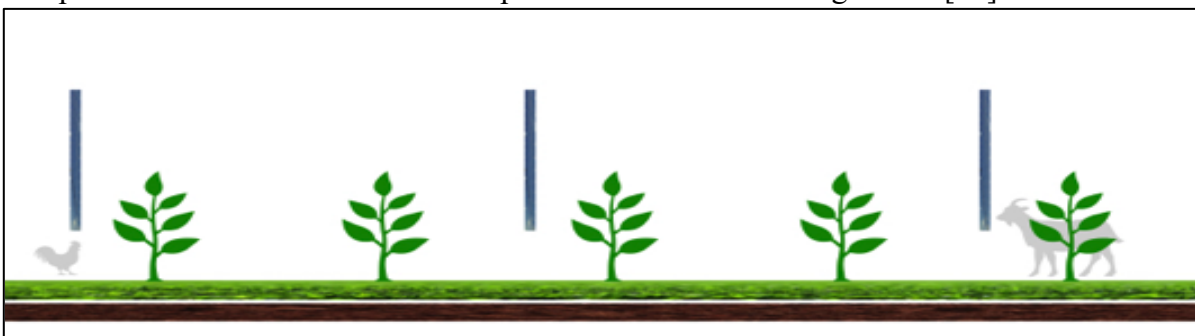


Fig. 17 – Layout impianto agrovoltaico [30]

I moduli fotovoltaici possono essere di due configurazioni:

1. Configurazione statica: dove i pannelli fotovoltaici sono posizionati in maniera fissa; [31]



Fig. 18 – Impianto fotovoltaico standard [32]

2. Configurazione dinamica: i pannelli fotovoltaici sono a inseguimento. [31]

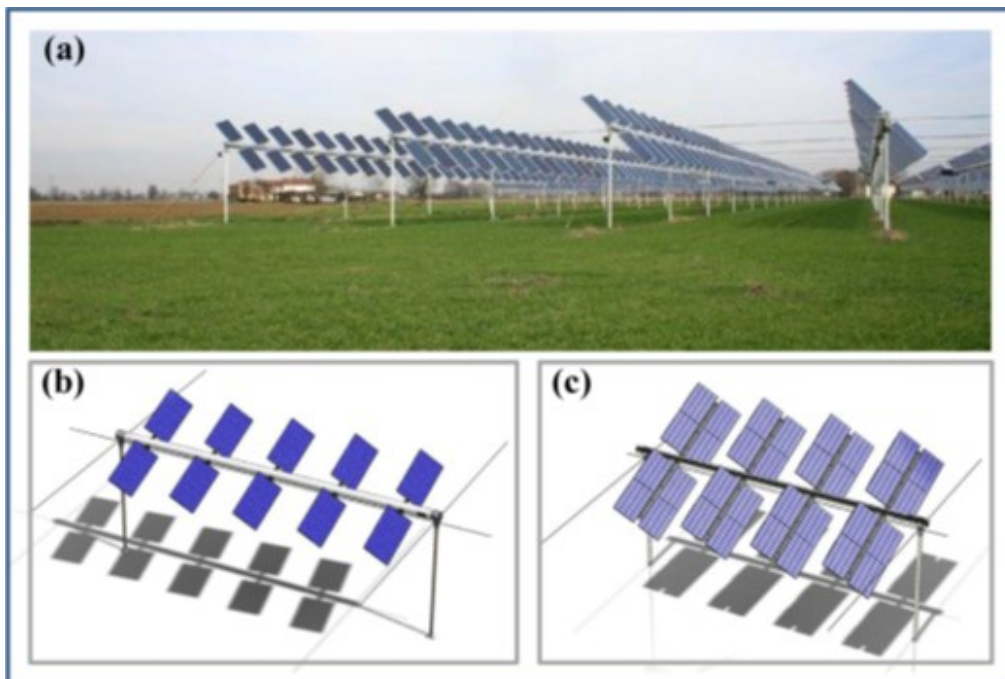


Fig. 19 – Impianto fotovoltaico a inseguimento [33]

Inoltre, i pannelli fotovoltaici utilizzati per gli impianti possono essere di due tipologie:

1. Pannelli solari fotovoltaici standard, che catturano la radiazione solare solamente dalla parte superiore del pannello; [31]



Fig. 20 – Pannelli fotovoltaici standard [34]

2. Pannelli solari fotovoltaici bifacciali, che catturano la radiazione solare sia dalla parte superiore del pannello che da quella inferiore. [31]



Fig. 21 – Pannelli fotovoltaici bifacciali [35]

I moduli fotovoltaici possono essere posizionati al di sopra del terreno in varie configurazioni, che sono dettate [31]:

- Dal tipo di coltivazione;
- Dalla variazione dei parametri ambientali, come velocità del vento, radiazione solare, ecc...;
- Dalla tipologia di macchinari utilizzati per la coltivazione, che andrà a influenzare la distanza tra le stringhe e l'altezza degli stessi da terra;
- Dalla creazione delle zone d'ombra.

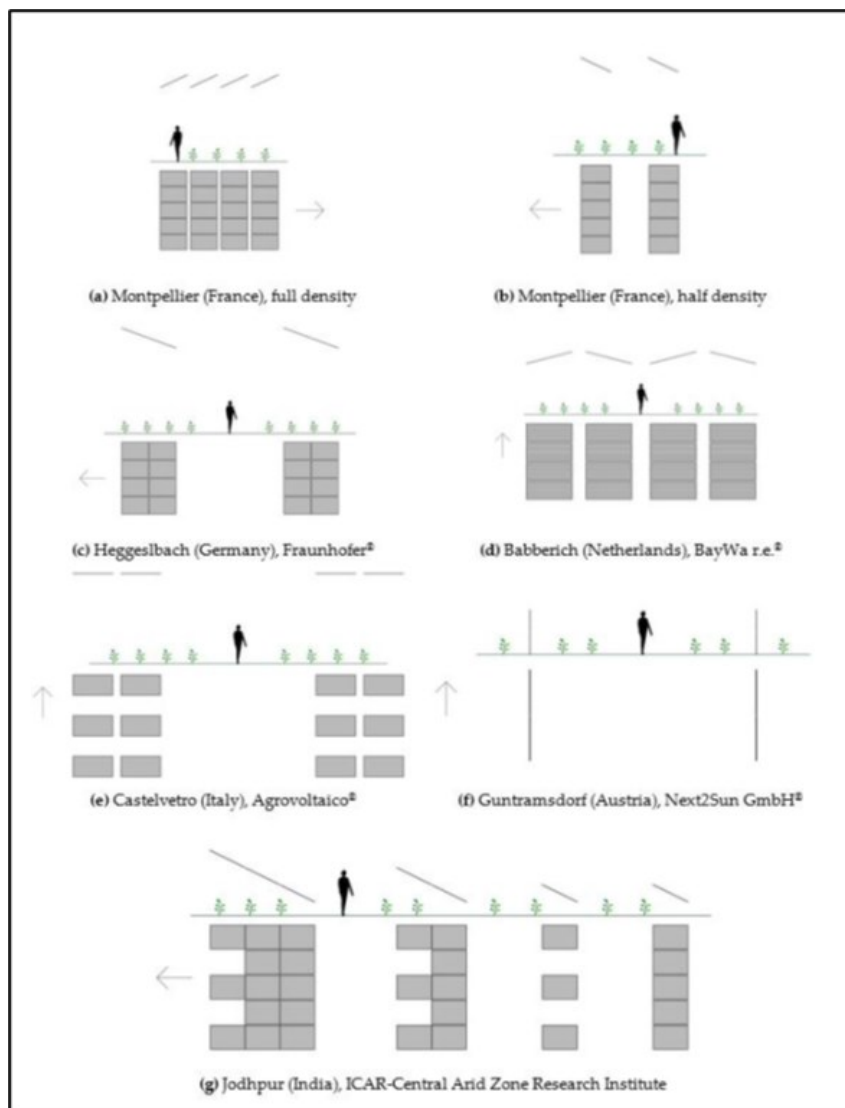


Fig. 22 – Diversi pattern spaziali [31]

2.3 COLTURE

L'utilizzo di piantagioni relativamente basse è un vincolo necessario, in modo da non creare zone d'ombra sui pannelli fotovoltaici, così da non inficiare l'efficienza del sistema. La vera sfida innovativa è però rappresentata dalla possibilità di occupare anche parte della superficie sotto i pannelli, sempre con piantagioni a bassa altezza, a seconda delle esigenze di ombreggiamento delle colture stesse. [24]



Fig. 23 – Coltivazione tra le stringhe [36]

La coltivazione che si integrano meglio con il sistema agrovoltaico sono le piante con il metabolismo C_3 , specialmente in climi caldi. Le piante a metabolismo C_3 come il girasole, gran parte delle arboree, il fagiolo, il grano o il tabacco, effettuano la fotosintesi clorofilliana di giorno e consumano ossigeno di notte, alternando la fotorespirazione con il ciclo Calvin [37]. Prendendo come riferimento stati con un clima mediterraneo come Italia, Spagna e Grecia emerge che le piante appartenenti al gruppo C_3 abbiano mostrato una migliore crescita, in termini di area fogliare, clorofilla, produttività e grandezza di frutti, rispetto alle stesse implementate nelle aree senza pannelli, in quanto non sono sottoposte a stress idrici e a microclimi sfavorevoli.[38]

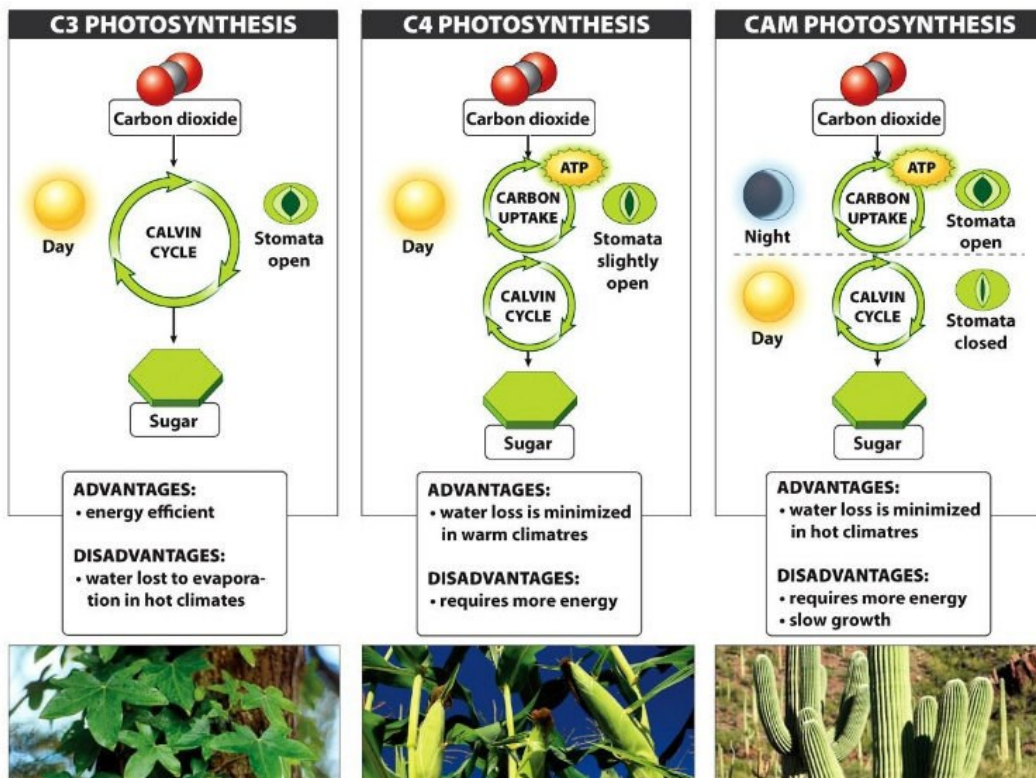


Fig. 24 – Modalità di fotosintesi [39]

Alcune piante hanno la capacità di adattarsi alle condizioni ambientali presenti in un sistema agrovoltico e riescono a compensare parzialmente o totalmente la riduzione della disponibilità di luce, aumentando la superficie fogliare. [40]

Le piante che si adattano meglio alle condizioni di scarsa luminosità sono:

- Erbe aromatiche (la menta, il prezzemolo, l'erba cipollina, il basilico, l'alloro e l'origano);
- Verdure a foglia verde (insalata, lattuga, rucola e crescione);
- Ortaggi da radice/tubero (rape, cipolle, carote e aglio).

Tab. 1 – Piante tolleranti e intolleranti all'ombra [41]

Principali colture commerciali intolleranti all'ombra	Colture tolleranti all'ombra		
	Luce moderata	Ombra completa	Luce bassa
<ul style="list-style-type: none"> • Cavolo • Mais • Cetriolo • Zucca • Riso • Pomodoro • Rapa • Anguria 	<ul style="list-style-type: none"> • Fagioli • Carote • Cavolfiore • Coriandolo • Peperoni verdi • Cipolle 	<ul style="list-style-type: none"> • Erba medica • Rucola • Verdure asiatiche • Broccoli • Manioca • Bietole • Cavolo cappuccio • Arachidi • Cavoli • Cavolo rapa • Lattuga • Senape • Prezzemolo • Scalogno • Acetosa • Spinaci • Patate dolci, • Taro • Igname 	<ul style="list-style-type: none"> • Fungo

2.4 PARAMETRI INFLUENZATI DA UN SISTEMA AGROVOLTAICO

I fattori ambientali che sono influenzati principalmente dalla presenza degli impianti agrovoltaiici sono:

- Temperatura dell'aria: la temperatura media giornaliera dell'aria di un impianto agrovoltaiico risulta essere significativamente più bassa rispetto a un impianto fotovoltaico standard, in quanto influenzata dalla presenza delle colture al di sotto dei moduli [42];
- Umidità: la variazione di umidità relativa negli impianti agrovoltaiici risulta essere ridotta, rispetto a un impianto fotovoltaico standard, indipendentemente dall'altezza dei moduli da terra [42];
- Velocità del vento: i moduli fotovoltaici influenzano la velocità del vento, al di sopra del pannello la velocità del vento risulta essere maggiore, mentre al di sotto del pannello risulta essere inferiore, rispetto alle condizioni ambientali standard [42];
- Direzione del vento: il vento viene riorientato perpendicolarmente alle stringe [42];
- Temperatura del terreno: risulta essere inferiore, rispetto a un impianto fotovoltaico standard [43];
- Temperatura del raccolto: risulta essere inferiore, nelle ore diurne, e superiore nelle ore notturne, rispetto alle colture in campo aperto [43];

LA RADIAZIONE FOTOSINTETICAMENTE ATTIVA (PAR)

Durante la fotosintesi, le piante utilizzano l'energia nella regione di spettro elettromagnetico del visibile compreso tra 400 e 700 nm. La radiazione compresa in questo campo, indicata come Radiazione Fotosinteticamente Attiva (PAR), può essere misurata in unità di potenza (Watts/m²) o Densità di Flusso Fotonico Fotosintetico (PPFD), misurata in Quanti (fotoni) per unità di tempo per unità di superficie. Quindi è possibile definire il PAR come la quantità di luce necessaria alla pianta per effettuare il processo di fotosintesi [44].

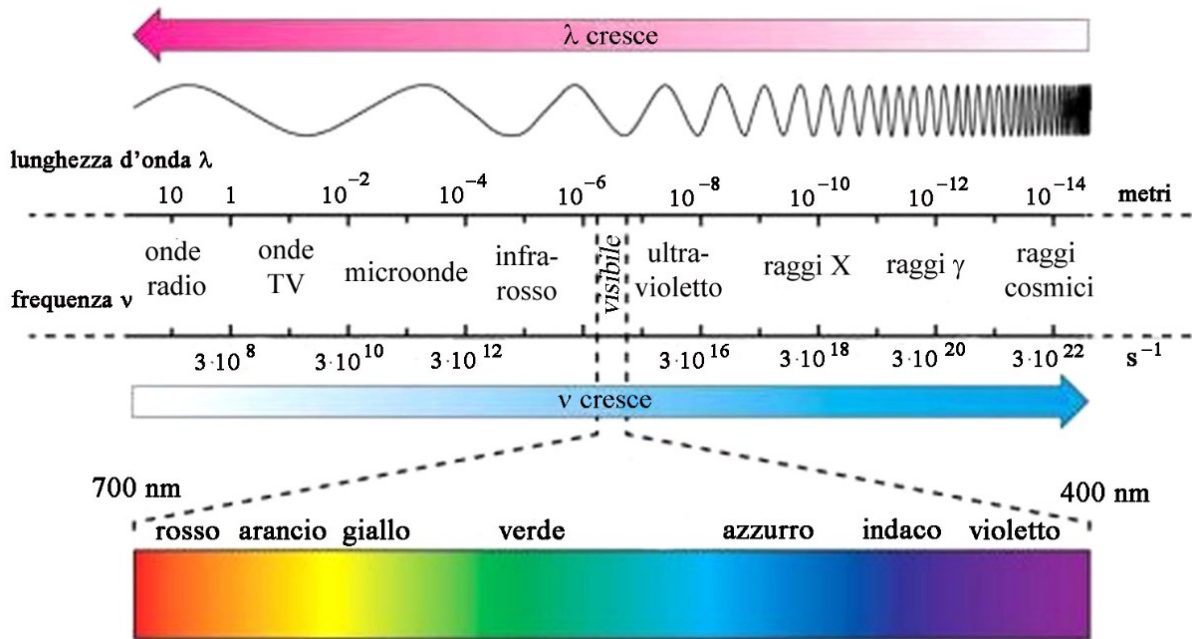


Fig. 25 – Spettro elettromagnetico [45]

La percentuale di fotosintesi aumenta all'aumentare della luce disponibile, fino ad arrivare a un punto limite, oltre il quale la pianta non aumenta più tale percentuale, nonostante aumenti la disponibilità di luce, questo viene definito come punto di saturazione (Light saturation point). Le piante, in base alla tipologia, hanno punti di saturazione differenti [44].

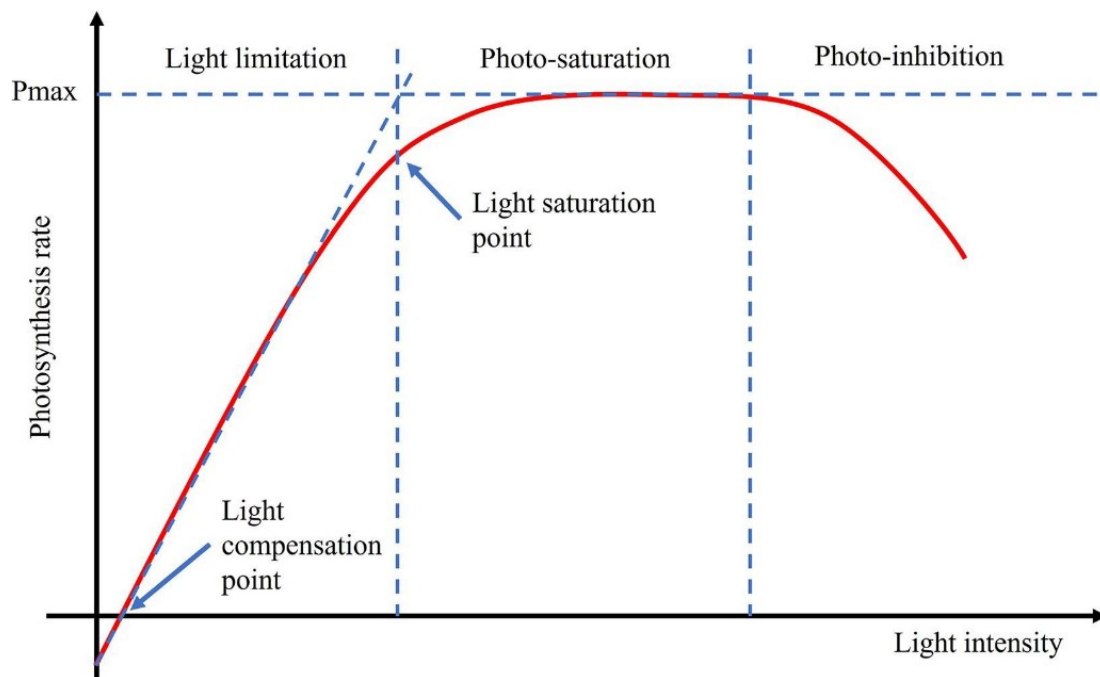


Fig. 26 – Correlazione tra percentuale di fotosintesi e luce [45]

Tab. 2 – Punti di saturazione di diverse colture [46]

Colture	Light Saturation Point [W/m ²]
Pigna	630-710
Anguria	630-710
Pomodoro	630
Taro	630
Cetriolo	435
Zucca	355
Mirtillo	355
Cavolo	355
Riso	310-355
Carote	310
Rapa	310
Patata Dolce	240
Lattuga	200
Peperone Verde	160-240
Cipolotto	200
Funghi	160

CAPITOLO 3

METODO

L'obiettivo principale della seguente trattazione è quella di stabilire se una coltura può crescere al di sotto dei moduli fotovoltaici, capire l'influenza che può avere un impianto fotovoltaico su un terreno agricolo e anche le criticità di tale sistema combinato, perciò si è calcolata la resa di un impianto agrovoltaico, combinando sia la resa della coltura che la resa dell'impianto fotovoltaico, tramite l'utilizzo di parametri tradizionali, come la potenza nominale e la produzione media dell'impianto fotovoltaico e la percentuale di radiazione solare utilizzabile dalle piante per effettuare la fotosintesi.

Per il calcolo della resa è stato utilizzato un software di simulazione, nello specifico MATLAB[®], che è un software offerto da MathWorks[®], con il quale è stato possibile effettuare sia i calcoli che le simulazioni.

3.1 CALCOLI

I calcoli effettuati per trovare la radiazione solare diretta, in funzione della posizione del sole rispetto alla posizione dell'impianto agrovoltaico, si basano sulle formule tratte dal libro "Solar Energy Engineering - Soteris A. Kalogirou".

3.1.1 TEMPO

EQUAZIONE DEL TEMPO – "ET"

La durata media di un giorno in un anno è di 24h, ciò significa che il tempo impiegato dalla Terra per compire una rivoluzione attorno al proprio asse è variabile, a causa dell'eccentricità dell'orbita terrestre e dell'inclinazione dell'asse terrestre, ne risulta che la velocità orbitale sia più veloce della velocità media nell'arco temporale che spazia da ottobre a marzo e più lenta da aprile a settembre. L'equazione del tempo – ET serve per determinare la variazione temporale in funzione del giorno dell'anno, a causa della velocità [1].

$$ET = 9.87 \sin(B) - 7.53 \cos(B) - 1.5 \sin(B) \text{ [min]} \quad (1)$$

$$B = (N - 81) \frac{360}{364} \quad (2)$$

Dove:

– N = numero di giorno dell'anno.

CORREZIONE DELL'ORA – “AST”

L'orario di un luogo viene definito prendendo come riferimento il meridiano di Greenwich, che ha longitudine di 0°. Poiché il sole impiega 4 minuti per attraversare 1° di longitudine, allora bisogna effettuare una correzione sul tempo in base alle coordinate del sito in esame [1].

$$AST = LST + ET \pm 4(SL - LL) - DS \quad (3)$$

Dove:

- LST = ora locale standard;
- ET = equazione del tempo;
- SL = longitudine standard;
- LL = longitudine standard;
- DS = ora legale

3.1.2 ANGOLI

La Terra durante l'anno ruota attorno al sole, ma anche attorno al proprio asse, il quale però nell'arco dell'anno cambia anche inclinazione, l'insieme di questi fattori fa sì che l'angolo tra i raggi del sole e un punto specifico sulla Terra è variabile nel tempo. [1]

DECLINAZIONE “ δ ”

La declinazione solare è l'angolo che si crea tra i raggi solari e la linea equatoriale, quando i raggi solari sono perpendicolari all'emisfero a nord dell'equatore, allora l'angolo di declinazione assumerà valori positivi con un massimo di 23.45° al solstizio d'estate, al contrario assumerà valori negativi, con un minimo di -23.45° al solstizio d'inverno, perciò all'equinozio di primavera e di autunno assumerà come valore 0° [1].

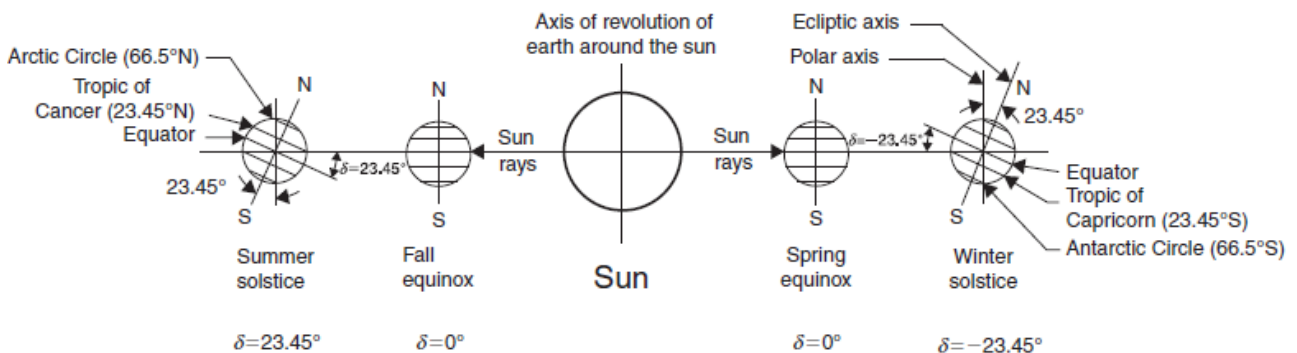


Fig. 27 – Angolo di declinazione [1]

L'angolo di declinazione δ può essere calcolato come [47]:

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + N) \right] \quad (4)$$

Dove:

- N = numero di giorno dell'anno.

ANGOLO ORARIO – “h”

L'angolo orario, riferito a un punto sulla superficie terrestre, è l'angolo di rotazione che serve alla Terra per portare il meridiano del punto sotto il sole, misurato sul piano equatoriale. Quando il punto sulla superficie terrestre si trova al mezzogiorno solare allora l'angolo orario sarà zero e nelle ore pomeridiane è definito come positivo [1].

$$h = \pm 0.25(LST - LSN) \quad (5)$$

Dove:

- LST = ora locale standard;
- LSN = mezzogiorno solare.

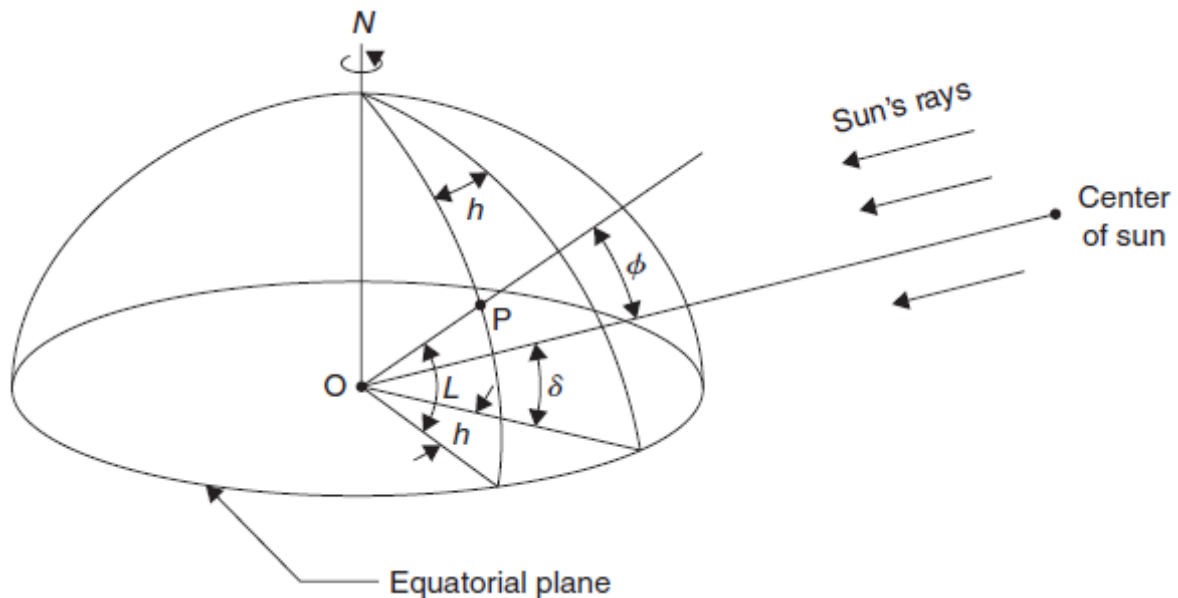


Fig. 28 – Angolo di declinazione, orario e latitudine [1]

ANGOLO DI ALTITUDINE SOLARE – “ α ”, ANGOLO ZENITALE “ Φ ”

L'angolo di altitudine solare (α) è l'angolo che si crea tra i raggi solari e il piano dell'orizzonte, mentre l'angolo zenitale (Φ) si crea tra i raggi solari e l'asse verticale passante per il centro della Terra. La somma dell'angolo zenitale e dell'angolo di altitudine solare è di 90° [1], perciò possono essere calcolati come:

$$\sin(\alpha) = \cos(\Phi) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \quad (6)$$

Dove:

- L = latitudine locale;
- δ = angolo di declinazione;
- h = angolo orario.

Da qui è possibile ricavarsi sia l'angolo di altitudine solare (α) e l'angolo zenitale (Φ).

ANGOLO AZIMUTALE – “z”

L'angolo azimutale solare (z) corrisponde all'angolo compreso dalla proiezione sul piano orizzontale della direzione della radiazione solare e la direzione sud per l'emisfero settentrionale o in direzione nord per l'emisfero meridionale; verso ovest è definito come positivo.

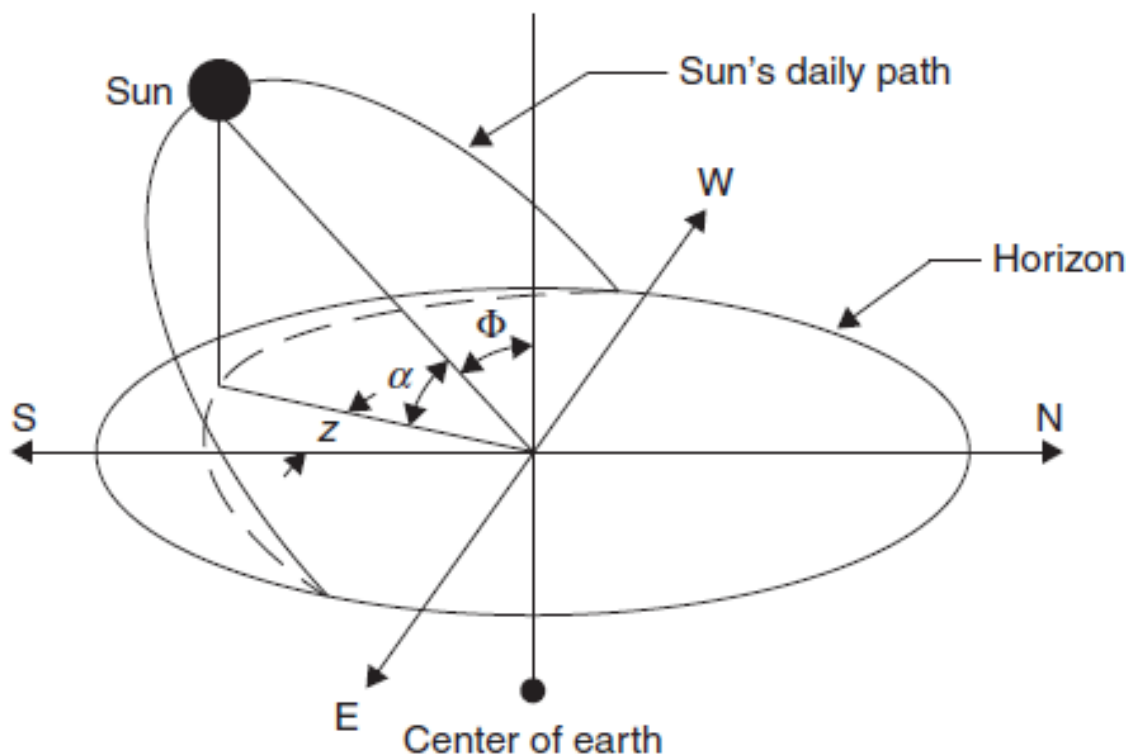


Fig. 29 – Angolo azimutale, zenitale e di altitudine solare [1]

ANGOLO DI INCIDENZA – “ θ ”

L'angolo di incidenza solare (θ) è l'angolo compreso tra i raggi del sole e la perpendicolare su una superficie, dove per una superficie orizzontale coincide con l'angolo zenitale [48], è calcolato come:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(L) \sin(\delta) \cos(\beta) - \cos(L) \sin(\delta) \sin(\beta) \cos(Z_S) \\ & + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \cos(\beta) \\ & + \sin(L) \cos(\delta) \cos(h) \sin(\beta) \cos(Z_S) \\ & + \cos(\delta) \sin(h) \sin(\beta) \sin(Z_S) \end{aligned}$$

(7)

Dove:

- L = latitudine locale;
- δ = angolo di declinazione;
- β = inclinazione della superficie del pannello fotovoltaico;
- Z_S = angolo azimutale della superficie del pannello, positiva verso ovest;
- h = angolo orario.

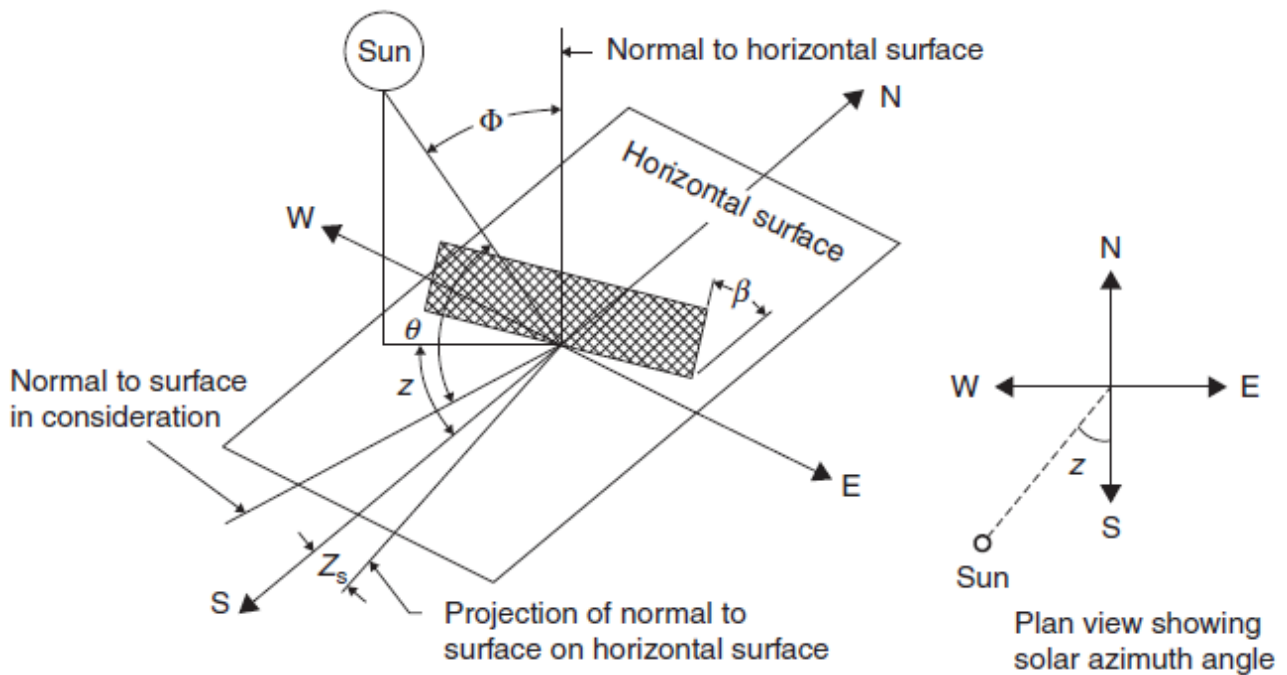


Fig. 30 – Angoli di incidenza [1]

3.2 RADIAZIONE SOLARE

Il fine dei calcoli è trovare la quantità di radiazione solare globale (diretta + diffusa) che arriva alla coltura per effettuare il processo di fotosintesi, per fare ciò si è partiti dal calcolo della radiazione solare diffusa, in quanto dai dati meteo, estrapolati dal database dell'ENEA, sono noti solo i valori della radiazione solare globale e diretta.

RADIAZIONE SOLARE DIRETTA NORMALE A UNA SUPERFICIE INCLINATA

Per il calcolo della radiazione solare diretta normale a una superficie inclinata si procede con [1]:

$$G_{Bt} = G_{Bn} \cos(\theta) [W/m^2] \quad (8)$$

Dove:

- G_{Bt} = radiazione solare diretta a una superficie inclinata;
- G_{Bn} = radiazione solare diretta misurata;
- θ = angolo di incidenza tra la superficie considerata e i raggi del sole.

RADIAZIONE SOLARE DIRETTA NORMALE A UNA SUPERFICIE ORIZZONTALE

Per il calcolo della radiazione solare diretta normale a una superficie orizzontale si procede con [1]:

$$G_B = G_{Bn} \cos(\Phi) [W/m^2] \quad (9)$$

Dove:

- G_B = radiazione solare diretta normale a una superficie orizzontale;
- G_{Bn} = radiazione solare diretta misurata;
- Φ = angolo zenitale.

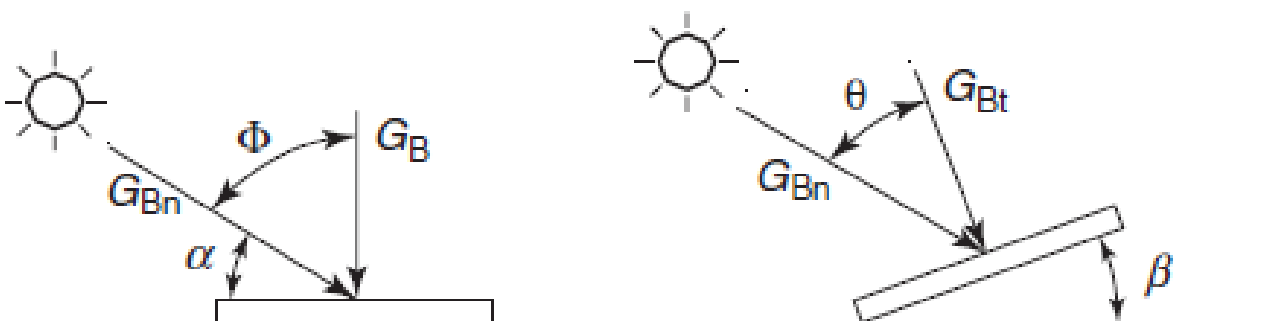


Fig. 31 – Radiazione solare diretta su superficie orizzontale e inclinata [1]

RADIAZIONE SOLARE DIFFUSA

La radiazione solare diffusa è stata calcolata nel seguente modo [1]:

$$G_D = G - G_B \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (10)$$

Dove:

- G_D = radiazione solare diffusa;
- G = radiazione solare globale misurata;
- G_B = radiazione solare diretta normale a una superficie orizzontale.

RADIAZIONE SOLARE TOTALE SU SUPERFICIE INCLINATA

La radiazione solare totale su una superficie inclinata è calcolata in funzione dei fattori vista e dell'albedo [1]:

$$G_T = G_{Bt} + G_D \left[\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right] + (G_B + G_D) \rho_G \left[\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] \quad (11)$$

Dove:

- G_{Bt} = radiazione solare diretta a una superficie inclinata;
- G_D = radiazione solare diffusa;
- G_B = radiazione solare diretta normale a una superficie orizzontale;
- ρ_G = albedo;
- β = inclinazione della superficie della superficie.

3.3 OMBRA

Un fattore importante da considerare è l'ombreggiamento che provocano i moduli fotovoltaici, per il calcolo si è proceduto nel seguente modo è [1]:

$$b_s = a \left[\frac{\sin(\beta) \cos(z)}{\tan(\alpha)} + \cos(\beta) \right] \quad (12)$$

Dove:

- a = è l'altezza del pannello fotovoltaico;
- β = inclinazione della superficie della superficie;
- z = angolo azimutale;
- α = angolo di altitudine solare.

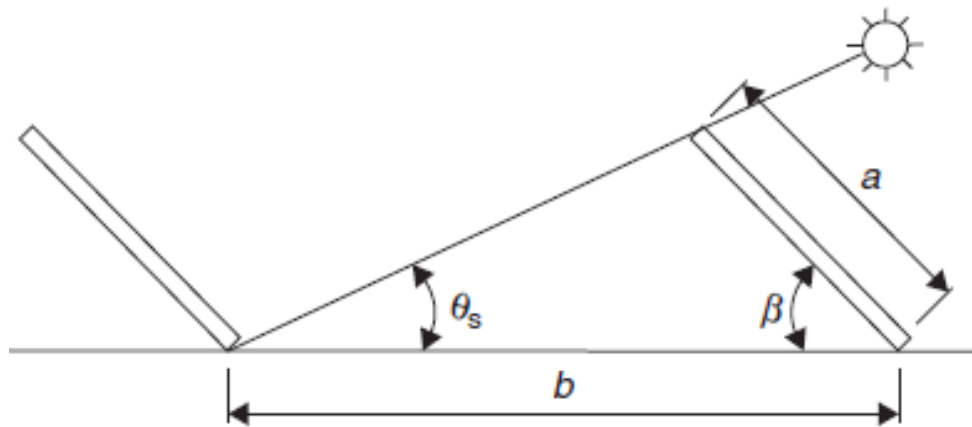


Fig. 32 – Ombreggiamento pannelli fotovoltaici [1]

3.4 CALCOLO DEL PAR

Le piante per effettuare il processo di fotosintesi hanno bisogno della radiazione solare, perciò sono state ricavate le percentuali di superficie del terreno in ombra e non in ombra e successivamente la quantità effettiva di radiazione solare diretta che arriva al terreno al di sotto dei moduli fotovoltaici.

SUPERFICIE IN OMBRA - Sup_{omb}

$$Sup_{omb} = l_s * b_s [m^2] \quad (13)$$

Dove:

- l_s = superficie totale dei moduli fotovoltaici;
- b_s = lunghezza dell'ombra.

PERCENTUALE DELLA SUPERFICIE IN OMBRA - $Perc_{omb}$

$$Perc_{omb} = \left(\frac{Sup_{omb}}{Sup_{tot}} \right) \times 100 \text{ [%]} \quad (14)$$

Dove:

- Sup_{omb} = superficie in ombra;
- Sup_{tot} = superficie totale del terreno.

PERCENTUALE DELLA SUPERFICIE DEL TERRENO NON IN OMBRA - $Perc_{Rad}$

$$Perc_{Rad} = 100 - Perc_{omb} \text{ [%]} \quad (15)$$

Dove:

- $Perc_{omb}$ = percentuale della superficie in ombra.

QUANTITÀ DI RADIAZIONE SOLARE DIRETTA, NORMALE AL TERRENO - $Perc_{Diretta}$

$$Perc_{diretta} = \frac{G_B \times Perc_{Rad}}{100} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (16)$$

Dove:

- $Perc_{Rad}$ = Percentuale della superficie del terreno non in ombra;
- G_B = radiazione solare diretta normale a una superficie orizzontale.

RADIAZIONE FOTOSINTETICAMENTE ATTIVA – PAR

Il PAR considerato qui è inteso come somma della radiazione diffusa più la quantità di radiazione solare diretta normale al terreno, considerando la presenza dei moduli fotovoltaici:

$$PAR = G_D + Perc_{diretta} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (17)$$

Dove:

- $Perc_{Diretta}$ = Quantità di radiazione solare diretta, normale al terreno;
- G_D = radiazione solare diffusa.

3.5 RESA

RENDIMENTO COLTURA - Y_{PAR}

Y_{PAR} è il rapporto tra il PAR utilizzabile dalla coltura nel processo di fotosintesi in un sistema agrovoltaico e il PAR utile al processo di fotosintesi della coltura in campo aperto. Il rendimento legato alla coltura Y_{PAR} è stato calcolato rapportando l'area sottesa alla curva di PAR, ottenute dalle diverse configurazioni (LAOR), e l'area sottesa alla curva della radiazione globale (G). nel caso in cui la linea del PAR-limite (PAR_{th}) intersechi le curve, le aree da considerare saranno quelle delimitate superiormente dalla retta limite.

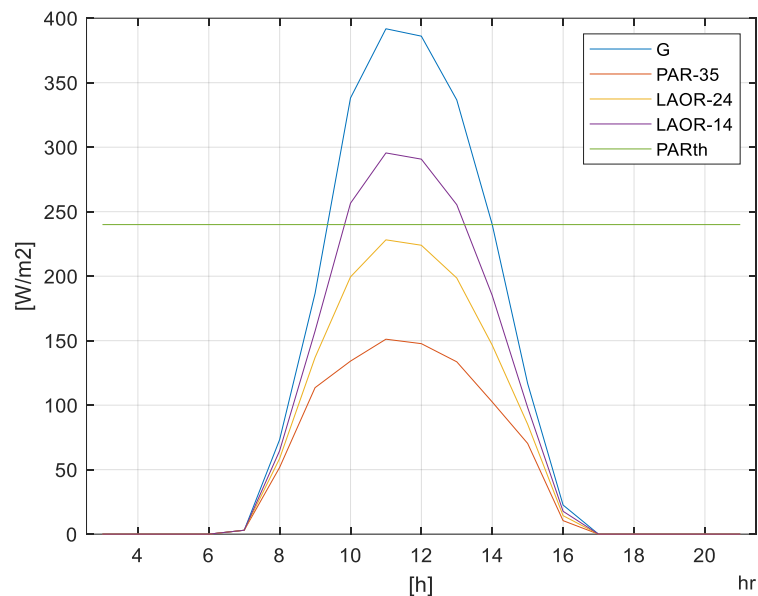


Fig. 33 – Curve di PAR

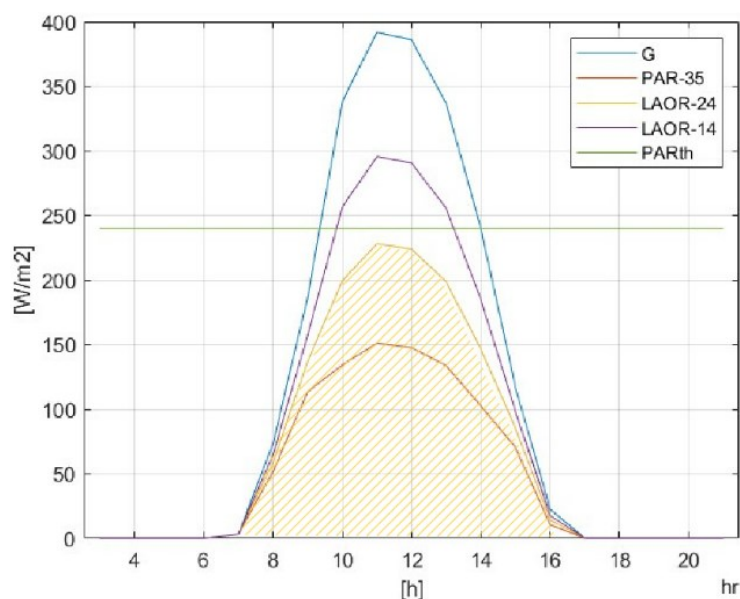


Fig. 34 – Retta PAR_{th} non interseca la curva di PAR

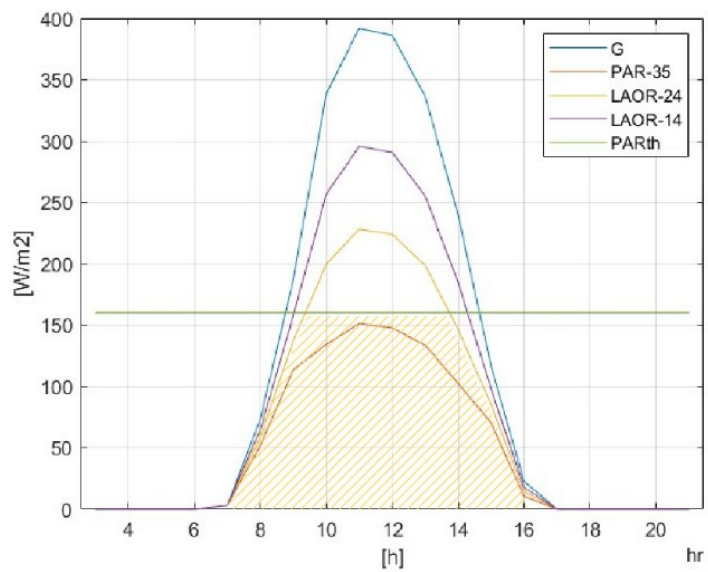


Fig. 35 – Retta PAR_{th} interseca la curva di PAR

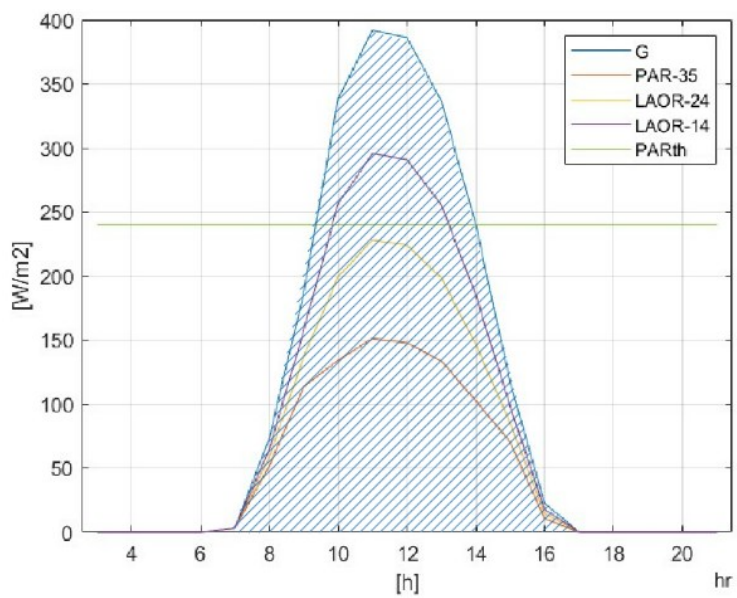


Fig. 36 – Curva radiazione globale

RENDIMENTO FOTOVOLTAICO - Y_{PV}

Y_{PV} è il rapporto delle prestazioni tra un impianto fotovoltaico applicato al contesto agricolo e un impianto fotovoltaico standard. Il rendimento legato all'impianto fotovoltaico Y_{PV} è stato calcolato rapportando il numero di pannelli nelle varie configurazioni di agrovoltaico (LAOR) con il numero massimo di pannelli fotovoltaici in configurazione standard, tenendo conto che in configurazione standard si ha un rendimento pari a 1.

RESA TOTALE DELL'IMPIANTO AGROVOLTAICO – LPF

Il rendimento dell'impianto agrivoltaico (**LPF**) è stato calcolato come somma di due rendimenti: uno relativo all'impianto fotovoltaico Y_{PV} e uno relativo alla coltura Y_{PAR} . Perciò il rendimento LPF potrà avere come valore massimo 2 in quanto Y_{PV} e Y_{PAR} possono raggiungere come massimo valore 1

$$LPF = Y_{PV} + Y_{PAR}$$

CAPITOLO 4

APPROCCIO ALLA MODELLAZIONE

Il modello è stato impostato in modo tale da renderlo utilizzabile cambiando semplicemente i dati iniziali, è possibile applicarlo a qualsiasi contesto geografico o con qualsiasi tipologia di impianto fotovoltaico. Di seguito viene riportato uno schema del modello.

4.1 DATI INPUT

Per il corretto funzionamento della simulazione è necessario inserire nel modello dei dati iniziali:

- Geografici;
- Impianto fotovoltaico;
- Impianto agrovoltaiico;
- Climatici;
- Colture.

4.2 DATI GEOGRAFICI

I dati geografici inseriti nel modello di simulazione fanno riferimento al comune di Ancona, nello specifico sono stati inseriti i seguenti dati:

Tab. 3 – Dati geografici

Longitudine standard	Longitudine locale	Latitudine locale	Albedo - ρ	Dimensione 1 del terreno	Dimensione 2 del terreno
[gradi]	[gradi]	[gradi]	[-]	[m]	[m]
15.00	13.30	43.27	0.25	105.00	68.00

4.2.1 LONGITUDINE E LATITUDINE

La superficie del pianeta Terra è suddivisa in meridiani e paralleli, per semplificare l'orientamento sul pianeta.

I meridiani si possono semplificare come archi immaginare che uniscono Polo Nord terrestre e Polo Sud terrestre. Come “meridiano zero” di riferimento viene preso in considerazione quello che attraversa l'osservatorio astronomico presente nel distretto di Greenwich nella città di Londra. La superficie terrestre è stata suddivisa in 360 meridiani, distanti 1° l'uno dall'altro, i quali sono 180 a ovest e 180 est del meridiano di Greenwich. La longitudine di un punto generico P è la distanza angolare del meridiano dove si trova P dal meridiano di Greenwich, partendo dal meridiano zero, la longitudine si misura in gradi e varia da 0 fino a 180 sia verso Est che verso Ovest [49].

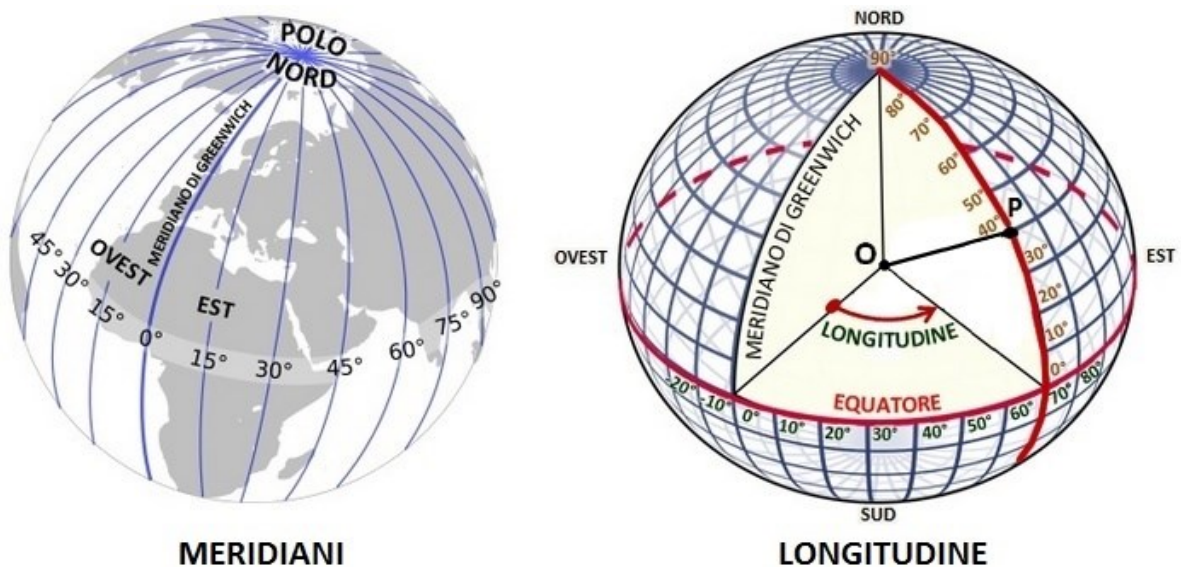


Fig. 37 – Meridiani e Longitudine [50]

I paralleli possono essere immaginati come tante circonferenze il cui centro è attraversato dall'asse di rotazione, per cui la superficie risulta perpendicolare a tale asse. Il piano equatoriale si assume come parallelo zero di riferimento, da cui si misurano i paralleli che si misurano in gradi e se ne contano 90 a Nord dell'equatore e 90 a Sud dell'equatore per un totale di 180 paralleli. La latitudine di un punto generico P è la distanza angolare del parallelo dove si trova il punto P dall'equatore. [49].

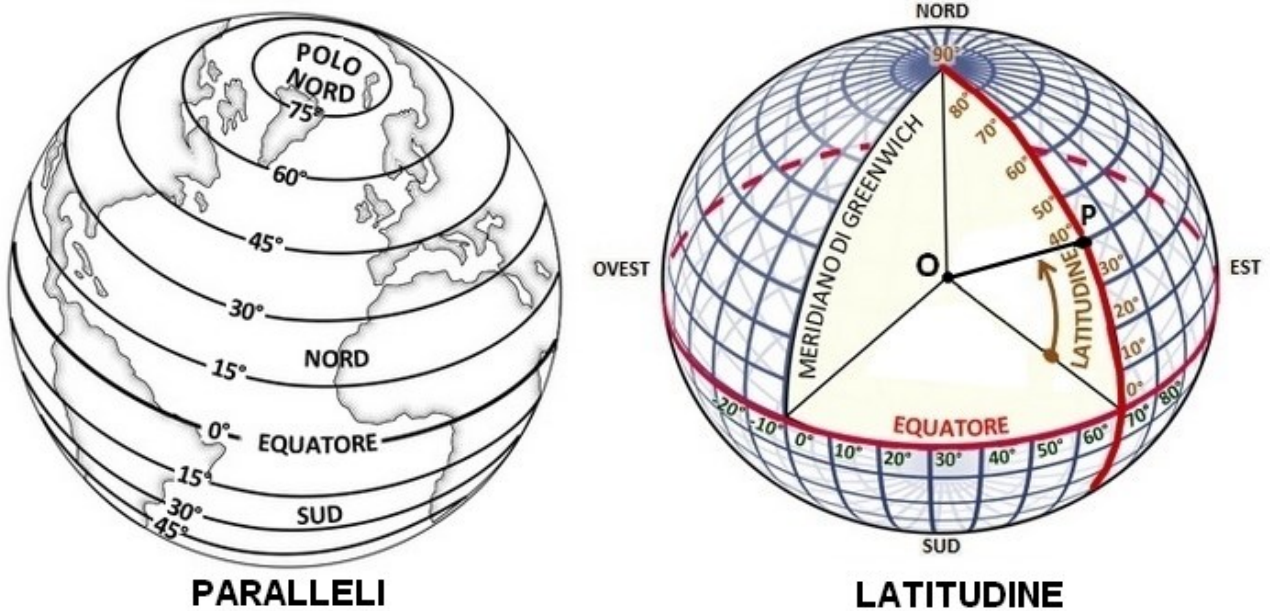


Fig. 38 – Paralleli e Latitudine [50]

4.2.2 ALBEDO – ρ

L'albedo planetario è la parte di energia solare che viene riflessa nello spazio dalle superfici della Terra [51]. L'albedo, perciò, è possibile definirlo come l'unità di misura della riflettività di un determinato materiale o oggetto, il quale varia tra 0 e 1 dove per valori vicino a 1 si avrà il massimo della riflettività, mentre per valori vicino a 0 il corpo tenderà ad assorbire la luce [52].

Tab. 4 – Coefficiente di albedo da UNI 8477 [52]

Tipo di superficie	Albedo
Neve o ghiaccio	0.75
Superfici acquose	0.07
Suolo (creta, marne)	0.14
Strade sterrate	0.04
Bosco di conifere d'inverno	0.07
Asfalto	0.10
Calcestruzzo	0.22
Foglie morte	0.30
Erba verde	0.26
Tetti e terrazze in bitume	0.13
Superfici scure di edifici	0.27
Superfici chiare di edifici	0.60
Pietrisco	0.20

4.3 DATI IMPIANTO FOTOVOLTAICO

I dati relativi all'impianto fotovoltaico fanno riferimento a un impianto fotovoltaico standard di riferimento, nello specifico sono stati inseriti i seguenti valori:

Tab. 5 – Dati relativi a fotovoltaico standard di riferimento

Inclinazione β	Altezza modulo	Larghezza modulo	Altezza da terra minima	Altezza da terra massima	Angolo azimutale del modulo Z_s	Numero di moduli	Watt di picco per modulo
[gradi]	[m]	[m]	[m]	[m]	[gradi]	[-]	[Wp]
45.00	1.64	0.992	3.00	4.16	0.00	2178	320.00

4.3.1 INCLINAZIONE (β) E ANGOLO AZIMUTALE DEL MODULO (Z_s)

L'inclinazione (β) fa riferimento all'angolo che si crea tra il piano orizzontale del terreno e il modulo fotovoltaico, mentre, l'angolo azimutale del modulo (Z_s) è l'angolo che si genera tra la normale della superficie del modulo fotovoltaico proiettata sul piano orizzontale e la linea in direzione Sud e varia da -90° , in direzione Est, a $+90^\circ$ in direzione Ovest [1].

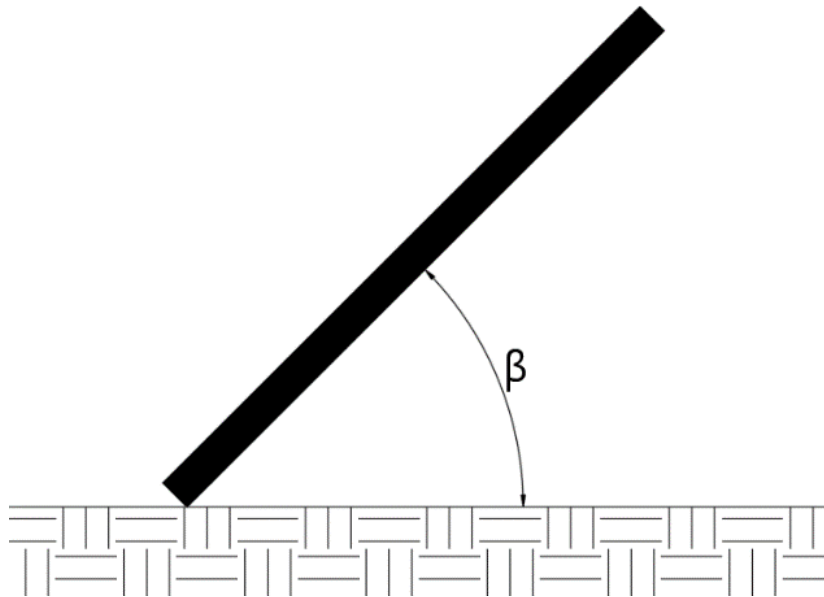


Fig. 39 – Angolo di inclinazione - β

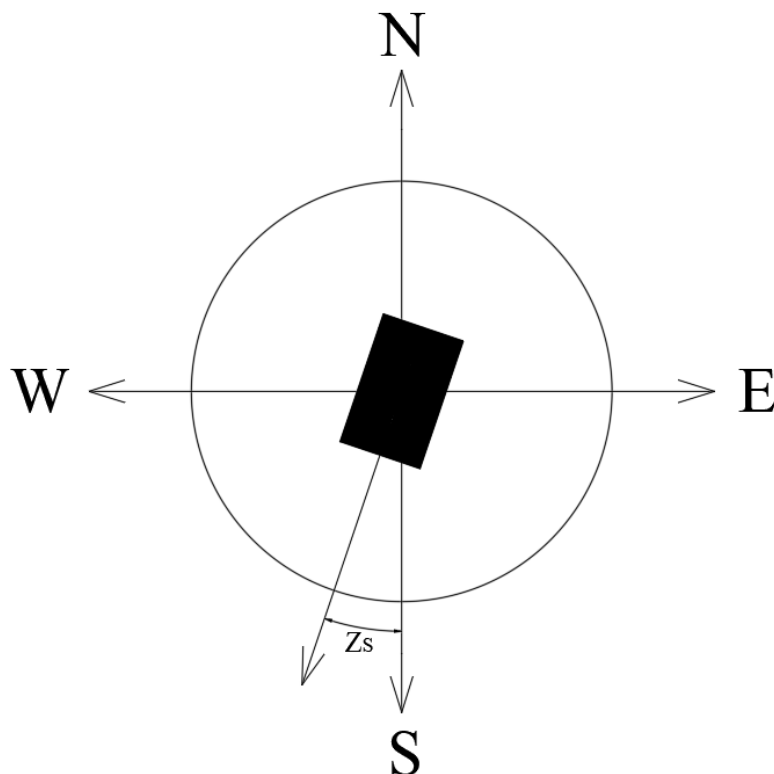


Fig. 40 – Angolo azimutale - Z_s

4.3.2 CARATTERISTICHE TECNICHE DEI MODULI FOTOVOLTAICI

Per le simulazioni sono stati utilizzati dei pannelli fotovoltaici di tecnologia “PERC”, in quanto l’obiettivo dell’architettura PERC, che sta per “Passivated Emitter and Rear Cell” (emettitore passivato e cella posteriore), è quello di ottenere il massimo dagli elettroni dalle celle solari, sfruttando anche la parte posteriore del modulo fotovoltaico per la cattura della radiazione solare. Questa tecnologia migliora l’efficienza di un pannello fotovoltaico con costi relativamente bassi. [53]

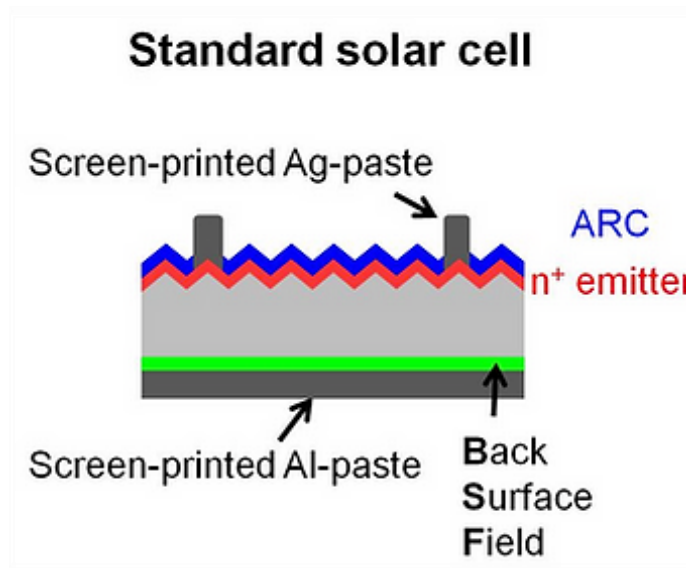


Fig. 41 – Architettura standard [53]

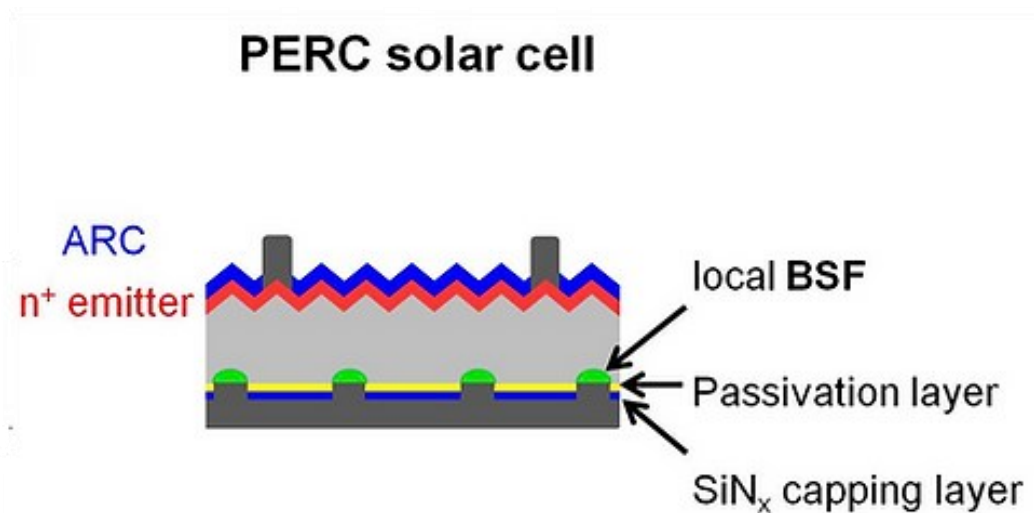


Fig. 42 – Architettura PERC [53]

Nella simulazione sono stati inserite le specifiche di un modulo fotovoltaico PERC della “TPL Solar”, nello specifico il modello “TPL320M-60”, il quale ha una potenza di picco di 320 Wp, con una larghezza di 0.992 m e una altezza di 1.64 m.

In configurazione standard si possono installare al massimo 2178 moduli fotovoltaici, considerando anche l’ombreggiamento che si genera il 21 dicembre.

4.4 CARATTERISTICHE IMPIANTO AGROVOLTAICO

Per l’impianto agrovoltaiico sono state considerate tre tipologie di configurazioni LAOR:

- 35 %;
- 24 %;
- 14 %.

Con un numero di moduli fotovoltaici rispettivamente di:

- 1550;
- 1054;
- 620.

Tab. 6 – Layout impianto agrovoltaiico

LAOR	Numero di pannelli	Numero di stringhe
35 %	1550	25
24 %	1054	17
14 %	620	10

4.5 DATI CLIMATICI

Per il corretto funzionamento della simulazione è necessario inserire i dati climatici:

- Mezzogiorno solare;
- Orario di alba e tramonto;
- Irradianza (media oraria) globale su piano orizzontale;
- Irradianza (media oraria) diretta normale (DNI).

I dati di irradianza globale e diretta normale fanno riferimento a un giorno tipico per ogni mese dell’anno e sono ricavati dall’ ENEA.

Tab. 7 – Orari di mezzogiorno solare, alba e tramonto.

Giorno				Mezzogiorno solare		Alba		Tramonto	
Numero giorno	Anno	Mese	Giorno	Ora	Minuti	Ora	Minuti	Ora	Minuti
11	2020	1	11	12.00	14.00	7.00	38.00	16.00	49.00
41	2020	2	10	12.00	20.00	7.00	12.00	17.00	29.00
79	2020	3	19	12.00	14.00	6.00	10.00	18.00	17.00
102	2020	4	11	13.00	7.00	6.00	30.00	19.00	45.00
134	2020	5	13	13.00	2.00	5.00	43.00	20.00	22.00
176	2020	6	24	13.00	8.00	5.00	25.00	20.00	51.00
197	2020	7	15	13.00	12.00	5.00	39.00	20.00	45.00
224	2020	8	11	13.00	11.00	6.00	6.00	20.00	15.00
257	2020	9	13	13.00	2.00	6.00	43.00	19.00	19.00
281	2020	10	7	12.00	54.00	7.00	11.00	18.00	36.00
316	2020	11	11	11.00	50.00	6.00	55.00	16.00	44.00
356	2020	12	21	12.00	4.00	7.00	36.00	16.00	32.00

Tab. 8.1 – Radiazione solare globale e diretta gennaio

Mese	Gennaio	
Orario	Radiazione Globale	Radiazione Diretta
[h]	[W/m ²]	[W/m ²]
3.00	0.00	0.00
4.00	0.00	0.00
5.00	0.00	0.00
6.00	0.00	0.00
7.00	3.03	17.28
8.00	73.25	143.33
9.00	186.64	330.75
10.00	338.14	736.25
11.00	391.81	765.06
12.00	386.08	720.42
13.00	336.61	624.69
14.00	240.11	463.08
15.00	116.78	186.19
16.00	22.56	65.39
17.00	0.00	0.00
18.00	0.00	0.00
19.00	0.00	0.00
20.00	0.00	0.00
21.00	0.00	0.00

Tab. 8.2 – Radiazione solare globale e diretta febbraio

Mese	Febbraio	
Orario	Radiazione Globale	Radiazione Diretta
[h]	[W/m ²]	[W/m ²]
3.00	0.00	0.00
4.00	0.00	0.00
5.00	0.00	0.00
6.00	0.00	0.00
7.00	24.53	66.58
8.00	143.36	279.92
9.00	316.11	678.67
10.00	440.44	786.83
11.00	507.19	818.67
12.00	509.83	789.42
13.00	469.61	755.86
14.00	378.42	674.11
15.00	241.83	466.94
16.00	93.86	164.69
17.00	6.42	26.08
18.00	0.00	0.00
19.00	0.00	0.00
20.00	0.00	0.00
21.00	0.00	0.00

Tab. 8.3 – Radiazione solare globale e diretta marzo

Mese	Marzo	
Orario	Radiazione Globale	Radiazione Diretta
[h]	[W/m ²]	[W/m ²]
3.00	0.00	0.00
4.00	0.00	0.00
5.00	0.00	0.00
6.00	30.36	95.75
7.00	181.50	416.17
8.00	378.92	711.83
9.00	539.42	812.14
10.00	661.08	867.28
11.00	730.03	892.03
12.00	721.28	870.56
13.00	665.03	830.67
14.00	562.97	771.39
15.00	437.58	729.03
16.00	248.86	470.19
17.00	86.42	203.06
18.00	1.92	14.28
19.00	0.00	0.00
20.00	0.00	0.00
21.00	0.00	0.00

Tab. 8.4 – Radiazione solare globale e diretta aprile

Mese	Aprile	
Orario	Radiazione Globale	Radiazione Diretta
[h]	[W/m ²]	[W/m ²]
3.00	0.00	0.00
4.00	0.00	0.00
5.00	7.14	20.64
6.00	101.33	152.39
7.00	295.42	555.81
8.00	488.50	736.61
9.00	640.17	813.50
10.00	758.64	861.58
11.00	821.94	882.81
12.00	828.36	884.69
13.00	765.89	851.67
14.00	621.14	735.33
15.00	479.50	645.72
16.00	305.03	452.53
17.00	134.50	191.36
18.00	20.11	45.19
19.00	0.00	0.00
20.00	0.00	0.00
21.00	0.00	0.00

Tab. 8.5 – Radiazione solare globale e diretta maggio

Mese	Maggio	
Orario	Radiazione Globale	Radiazione Diretta
[h]	[W/m ²]	[W/m ²]
3.00	0.00	0.00
4.00	1.36	8.78
5.00	76.61	176.03
6.00	217.75	363.83
7.00	406.64	613.19
8.00	582.19	734.92
9.00	730.69	804.86
10.00	839.14	845.11
11.00	888.50	858.53
12.00	876.39	846.47
13.00	830.69	836.83
14.00	712.97	777.44
15.00	556.92	657.11
16.00	349.44	356.89
17.00	179.25	191.44
18.00	85.25	190.78
19.00	2.69	13.56
20.00	0.00	0.00
21.00	0.00	0.00

Tab. 8.6 – Radiazione solare globale e diretta giugno

Mese	Giugno	
Orario	Radiazione Globale	Radiazione Diretta
[h]	[W/m ²]	[W/m ²]
3.00	0	0
4.00	11.14	35.94
5.00	112.72	241.72
6.00	238.97	337.14
7.00	432.25	605.44
8.00	608.03	722.69
9.00	741.69	778.61
10.00	845.61	815.86
11.00	904.72	835.03
12.00	906.83	834.39
13.00	864.67	821.94
14.00	766.78	784.81
15.00	636.92	731.47
16.00	481.97	648.53
17.00	305.61	493.11
18.00	148.28	295.94
19.00	28.25	77.53
20.00	0	0
21.00	0	0

Tab. 8.7 – Radiazione solare globale e diretta luglio

Mese	Luglio	
Orario	Radiazione Globale	Radiazione Diretta
[h]	[W/m²]	[W/m²]
3.00	0.00	0.00
4.00	3.31	11.53
5.00	82.19	156.42
6.00	233.97	401.47
7.00	413.78	598.19
8.00	581.14	702.14
9.00	718.72	763.14
10.00	822.97	801.19
11.00	884.56	821.83
12.00	884.33	817.86
13.00	841.31	802.22
14.00	748.36	766.75
15.00	626.19	718.14
16.00	463.28	613.00
17.00	293.78	467.94
18.00	131.25	226.50
19.00	21.22	49.72
20.00	0.00	0.00
21.00	0.00	0.00

Tab. 8.8 – Radiazione solare globale e diretta agosto

Mese	Agosto	
Orario	Radiazione Globale	Radiazione Diretta
[h]	[W/m ²]	[W/m ²]
3.00	0.00	0.00
4.00	0.00	0.00
5.00	30.64	40.64
6.00	163.36	262.44
7.00	355.81	568.00
8.00	528.89	690.42
9.00	675.81	762.06
10.00	784.53	804.28
11.00	834.67	817.03
12.00	824.67	797.67
13.00	772.67	768.50
14.00	621.22	573.53
15.00	504.33	519.83
16.00	361.89	421.36
17.00	207.31	249.06
18.00	68.03	78.36
19.00	1.64	4.25
20.00	0.00	0.00
21.00	0.00	0.00

Tab. 8.9 – Radiazione solare globale e diretta settembre

Mese	Settembre	
Orario	Radiazione Globale	Radiazione Diretta
[h]	[W/m ²]	[W/m ²]
3.00	0.00	0.00
4.00	0.00	0.00
5.00	1.50	2.39
6.00	63.44	40.75
7.00	244.19	416.28
8.00	427.08	654.50
9.00	588.28	760.39
10.00	647.06	734.83
11.00	728.03	806.17
12.00	712.92	774.36
13.00	690.36	802.22
14.00	566.11	717.56
15.00	400.28	551.67
16.00	235.72	350.17
17.00	69.06	43.39
18.00	2.50	3.42
19.00	0.00	0.00
20.00	0.00	0.00
21.00	0.00	0.00

Tab. 8.10 – Radiazione solare globale e diretta ottobre

Mese	Ottobre	
Orario	Radiazione Globale	Radiazione Diretta
[h]	[W/m ²]	[W/m ²]
3.00	0.00	0.00
4.00	0.00	0.00
5.00	0.00	0.00
6.00	24.14	16.61
7.00	164.64	295.42
8.00	364.78	669.22
9.00	505.42	762.89
10.00	602.47	810.33
11.00	625.53	791.97
12.00	582.53	689.69
13.00	522.47	653.50
14.00	432.58	637.03
15.00	290.44	504.36
16.00	94.44	43.97
17.00	12.14	9.72
18.00	0.00	0.00
19.00	0.00	0.00
20.00	0.00	0.00
21.00	0.00	0.00

Tab. 8.11 – Radiazione solare globale e diretta settembre

Mese	Novembre	
Orario	Radiazione Globale	Radiazione Diretta
[h]	[W/m ²]	[W/m ²]
3.00	0.00	0.00
4.00	0.00	0.00
5.00	0.00	0.00
6.00	0.00	0.39
7.00	46.14	69.19
8.00	179.22	350.75
9.00	326.11	647.97
10.00	431.22	760.42
11.00	457.08	745.44
12.00	424.33	654.89
13.00	359.58	576.81
14.00	261.17	475.28
15.00	112.69	119.08
16.00	20.31	37.39
17.00	0.00	0.00
18.00	0.00	0.00
19.00	0.00	0.00
20.00	0.00	0.00
21.00	0.00	0.00

Tab. 8.12 – Radiazione solare globale e diretta dicembre

Mese	Dicembre	
Orario	Radiazione Globale	Radiazione Diretta
[h]	[W/m ²]	[W/m ²]
3.00	0.00	0.00
4.00	0.00	0.00
5.00	0.00	0.00
6.00	0.00	0.00
7.00	2.72	3.03
8.00	53.53	22.69
9.00	177.72	334.94
10.00	319.03	707.97
11.00	360.44	714.58
12.00	351.61	675.00
13.00	288.25	533.94
14.00	168.78	234.28
15.00	62.33	24.81
16.00	5.61	4.86
17.00	0.00	0.00
18.00	0.00	0.00
19.00	0.00	0.00
20.00	0.00	0.00
21.00	0.00	0.00

4.6 PAR LIMITE

Il PAR limite o di saturazione, come spiegato nel capitolo 2, è la quantità massima di radiazione solare che la pianta utilizza per effettuare il processo di fotosintesi

Tab. 9 – Punti di saturazione di diverse colture [46]

Colture	Light Saturation Point [W/m²]
Pigna	630-710
Anguria	630-710
Pomodoro	630
Taro	630
Cetriolo	435
Zucca	355
Mirtillo	355
Cavolo	355
Riso	310-355
Carote	310
Rapa	310
Patata Dolce	240
Lattuga	200
Peperone Verde	160-240
Cipolotto	200
Funghi	160

CAPITOLO 5

RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

Le simulazioni effettuate consentono di ricavare per ogni configurazione di impianto agrovoltaico (LAOR), mese per mese o annualmente, i seguenti parametri:

- Potenza nominale dell'impianto;
- Produzione annua dell'impianto;
- PAR;
- Resa LPF dell'impianto agrovoltaico;
- Rendimento dell'impianto fotovoltaico;
- Rendimento della coltura.

5.1 POTENZA NOMINALE DELL'IMPIANTO E PRODUZIONE ANNUA DELL'IMPIANTO

La potenza nominale dell'impianto in configurazione standard risulta essere di 696.960 kWp con una produzione annua di circa 836.352 MWh.

Tab. 10 – Potenza nominale e produzione annua di tre configurazioni di impianto agrovoltaico

LAOR	Potenza nominale	Produzione annua
[%]	[kWp]	[MWh]
35	496.00	592.20
24	337.28	404.74
14	198.40	238.08

5.2 RADIAZIONE FOTOSINTENTICAMENTE ATTIVA – PAR

Di seguito vengono riportati, mese per mese, gli andamenti di radiazione fotosinteticamente attiva – PAR che può utilizzare la pianta per il processo di fotosintesi.

I grafici presentano sull'asse delle ascisse le ore della giornata, mentre sull'asse delle ordinate la radiazione solare. Le curve presenti nei grafici rappresentano la radiazione solare globale in campo aperto (G in blu), il PAR con un LAOR al 35% in arancio, al 24 % in giallo e al 14% in viola.

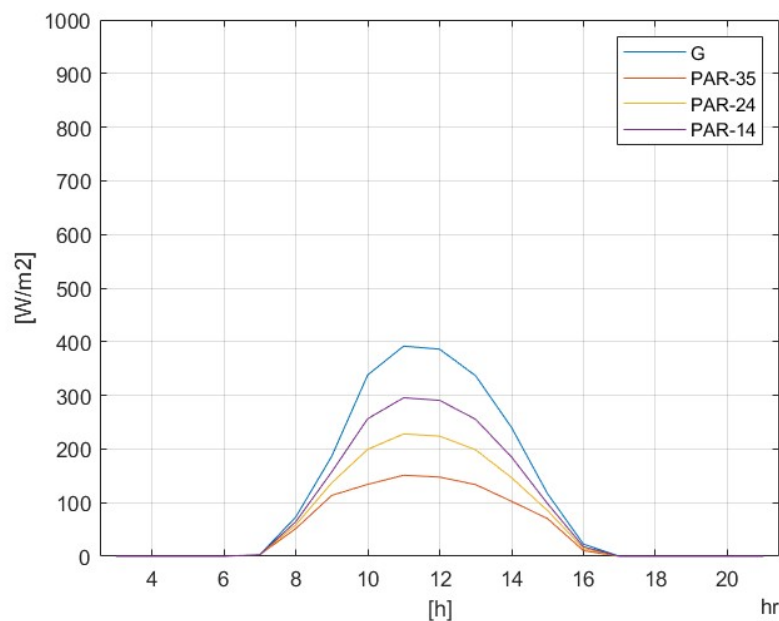


Fig. 43 – PAR gennaio

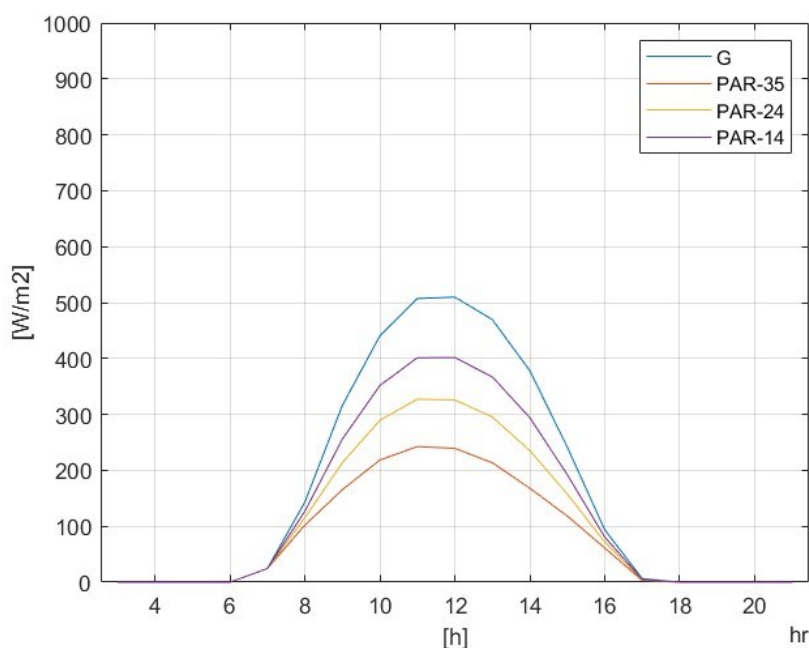


Fig. 44 – PAR febbraio

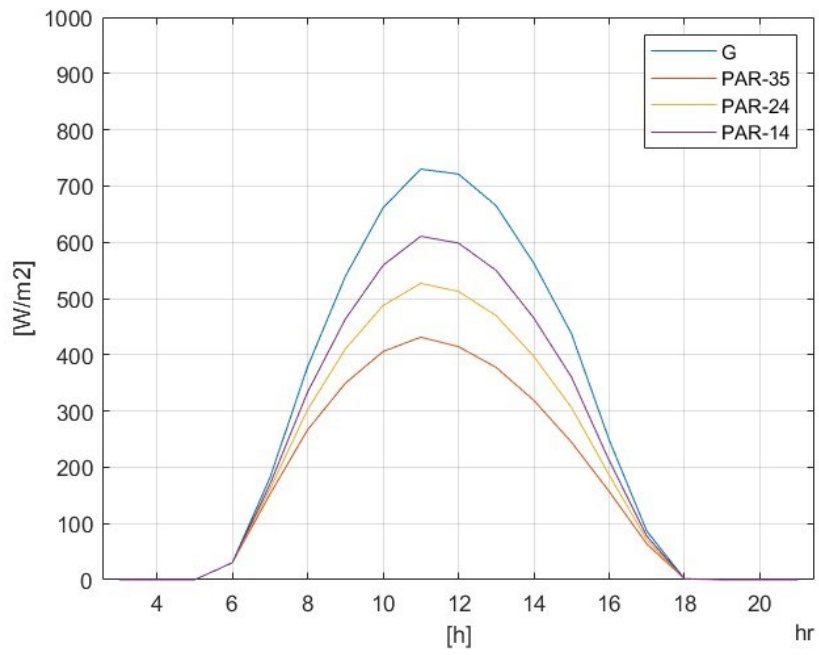


Fig. 45 – PAR marzo

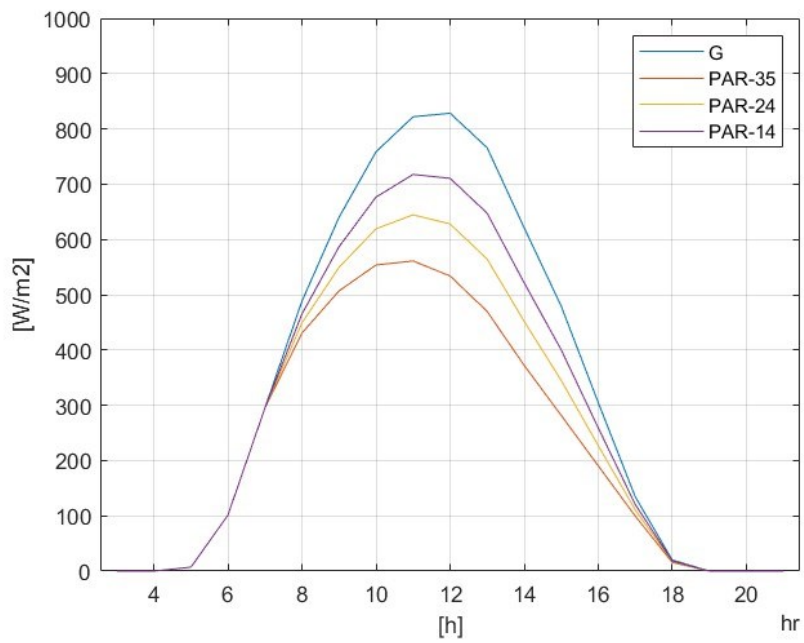


Fig. 46 – PAR aprile

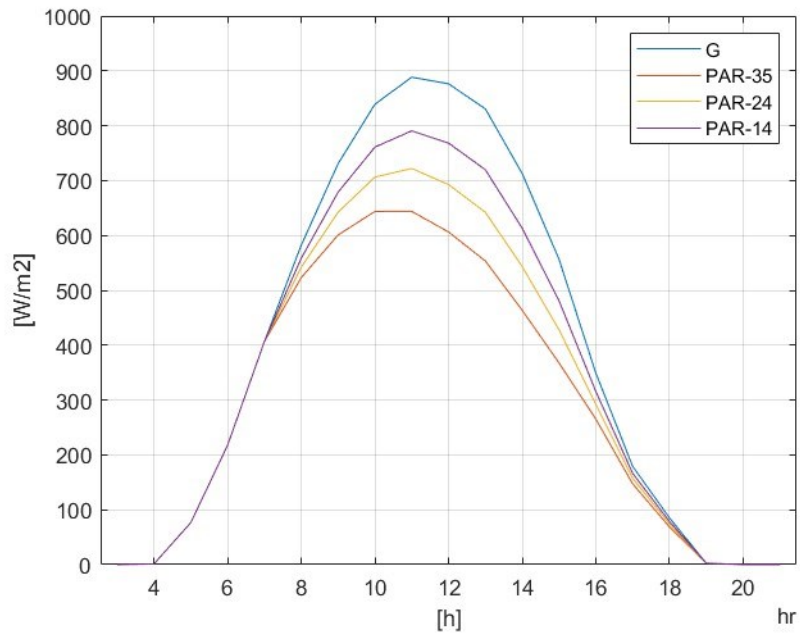


Fig. 47 – PAR maggio

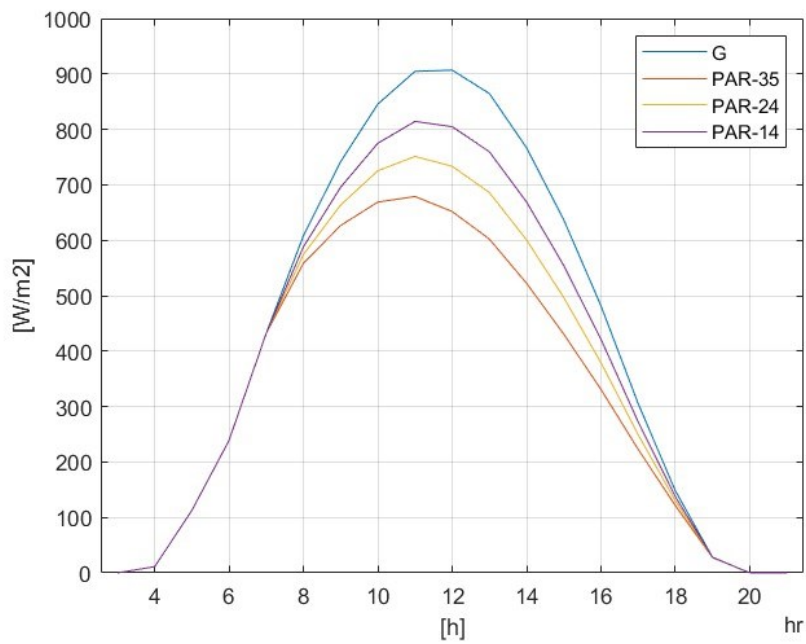


Fig. 48 – PAR giugno

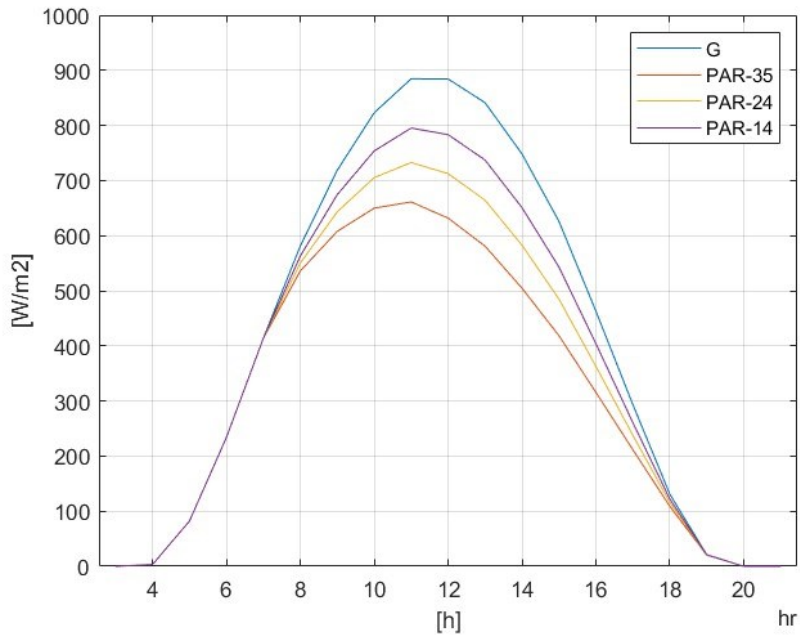


Fig. 49 – PAR luglio

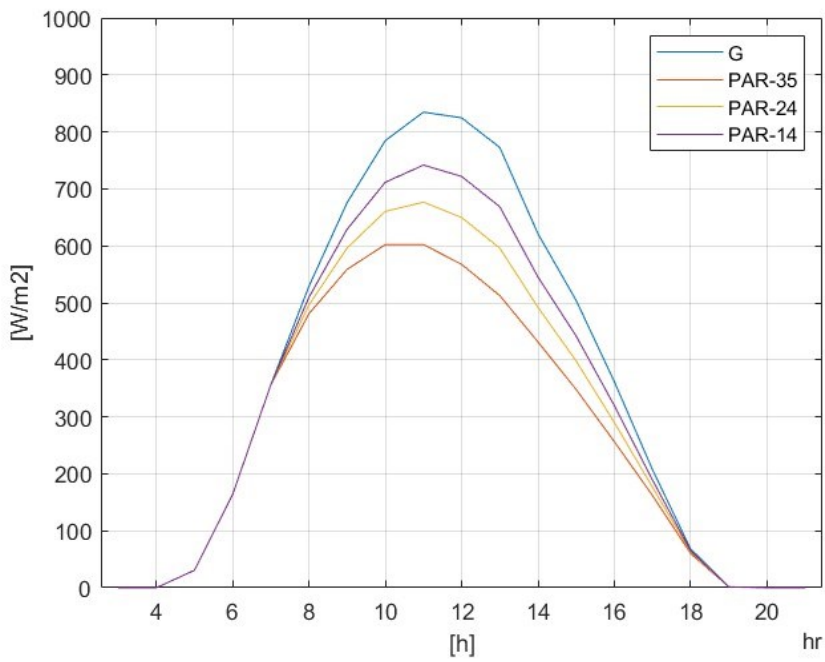


Fig. 50 – PAR agosto

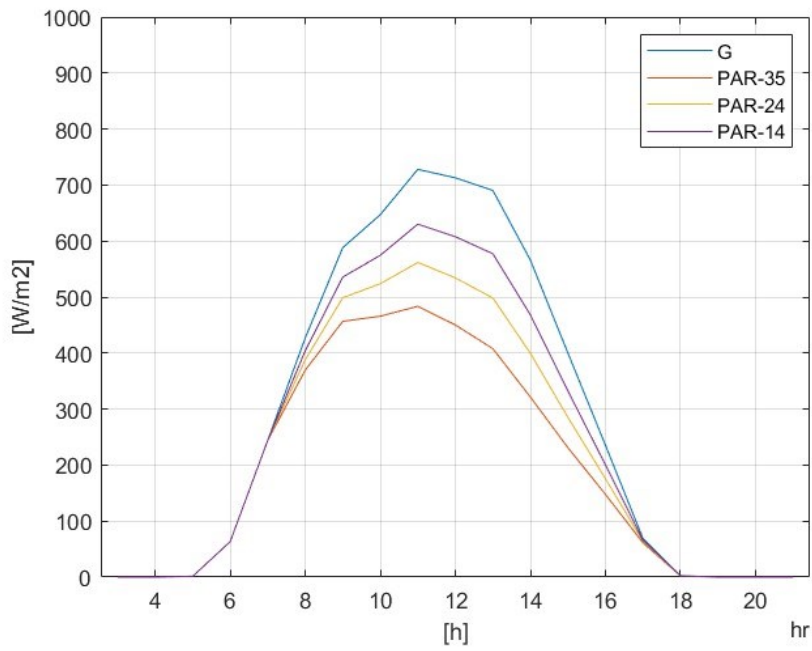


Fig. 51 – PAR settembre

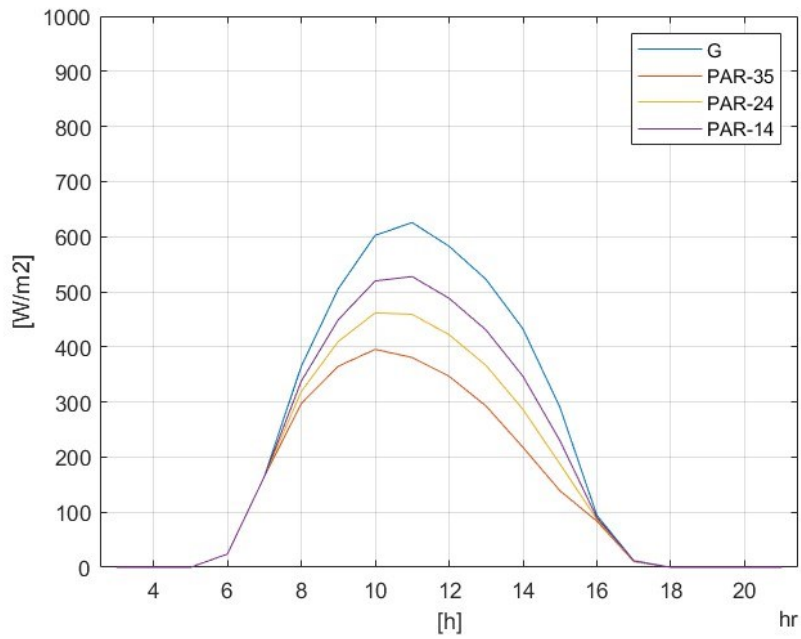


Fig. 52 – PAR ottobre

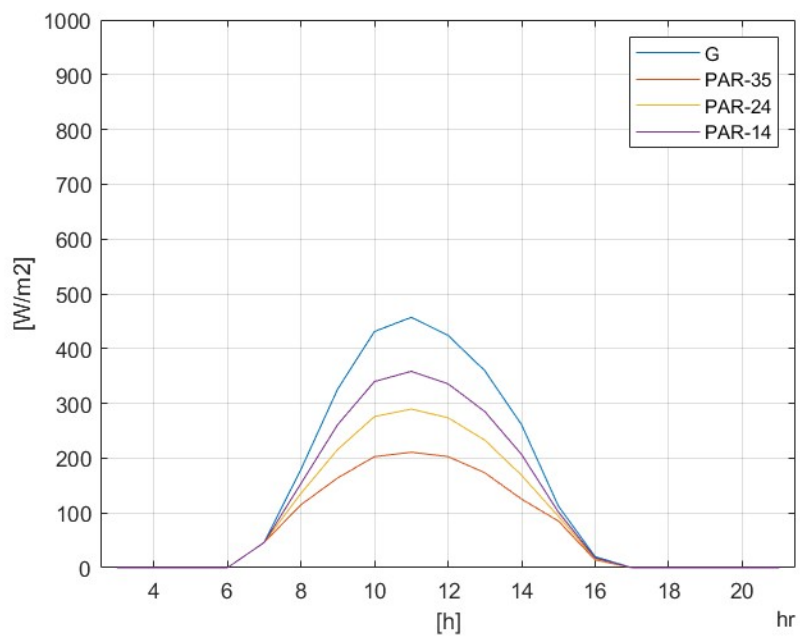


Fig. 53 – PAR novembre

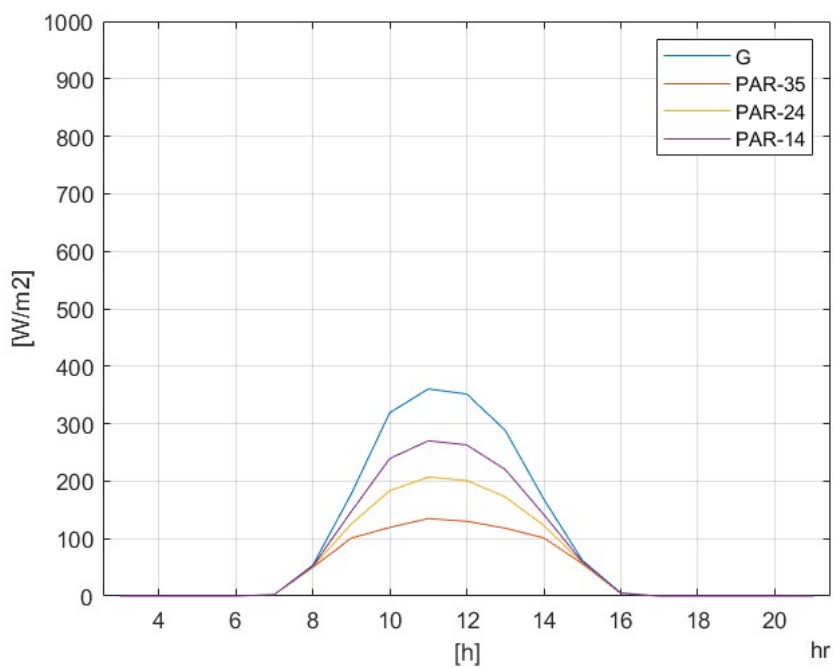


Fig. 54 – PAR dicembre

Dalle simulazioni è possibile notare una riduzione di radiazione solare al suolo all'aumentare della percentuale di LAOR, ciò significa che aumentando la quantità di moduli fotovoltaici si avrà una maggiore quantità di ombra e una riduzione della radiazione solare disponibile per le colture per effettuare la fotosintesi.

5.3 RESA IMPIANTO AGROVOLTAICO

5.3.1 RESA IMPIANTO FOTOVOLTAICO - Y_{PV}

Il rendimento dell'impianto fotovoltaico applicato al contesto agricolo Y_{PV} è stato calcolato per le tre configurazioni di LAOR, tenendo conto che in condizioni standard è stato considerato un Y_{PV} pari a 1, in quanto idealmente si riesce a sfruttare tutta la superficie disponibile, calcolata in funzione degli ombreggiamenti che possono crearsi tra i pannelli fotovoltaici stessi.

Tab. 11 – Rendimento impianto fotovoltaico in contesto agrovoltaico

LAOR	Y_{PV}
35 %	0.7117
24 %	0.4839
14 %	0.2847

5.3.2 RESA COLTURE - Y_{PAR}

La resa della coltura Y_{PAR} va ricavata in funzione delle piante utilizzate, in quanto per il calcolo della resa della coltura è necessario conoscere il PAR di saturazione delle piante. Di seguito vengono riportati alcuni esempi in cui si va a considerare la resa di una coltura di lattuga, di cavolo e di pomodoro che hanno rispettivamente un PAR di saturazione di 200 W/m², 355 W/m² e di 630 W/m²

Tab. 12 – Resa di una coltura di lattuga

PAR_{th} = 200 [W/m²]			
LAOR [%]	35	24	14
Mese	Y_{PAR}		
gennaio	0.6727	0.8622	0.9278
febbraio	0.8308	0.9116	0.9558
marzo	0.9382	0.964	0.9819
aprile	0.9621	0.9765	0.9862
maggio	0.9768	0.9842	0.9907
giugno	0.9874	0.9915	0.995
luglio	0.9875	0.9915	0.995
agosto	0.9771	0.9852	0.9923
settembre	0.9641	0.9797	0.9931
ottobre	0.9539	0.9807	0.9917
novembre	0.842	0.9237	0.9643
dicembre	0.7372	0.9003	0.9543
MEDIA	0.9025	0.9543	0.9773

Tab. 13 – Resa di una coltura di cavolo

PAR_{th} = 355 [W/m²]			
LAOR [%]	35	24	14
Mese	Y_{PAR}		
gennaio	0.5444	0.6963	0.8292
febbraio	0.6309	0.7925	0.907
marzo	0.8743	0.928	0.966
aprile	0.924	0.9563	0.9755
maggio	0.9618	0.974	0.9847
giugno	0.9663	0.98	0.9882
luglio	0.9631	0.9796	0.988
agosto	0.9554	0.971	0.9835
settembre	0.9245	0.9562	0.978
ottobre	0.8736	0.9319	0.9684
novembre	0.6315	0.7722	0.8942
dicembre	0.6393	0.7552	0.8566
MEDIA	0.8241	0.8911	0.9433

Tab. 14 – Resa di una coltura di pomodoro

PAR_{th} = 630 W/m²			
LAOR [%]	35	24	14
Mese	Y_{PAR}		
gennaio	0.5370	0.6852	0.8148
febbraio	0.5668	0.7054	0.8267
marzo	0.7005	0.8064	0.899
aprile	0.8127	0.8951	0.944
maggio	0.9049	0.9467	0.972
giugno	0.9123	0.947	0.9708
luglio	0.905	0.944	0.9698
agosto	0.8763	0.9307	0.9634
settembre	0.7887	0.8657	0.933
ottobre	0.7243	0.8125	0.8897
novembre	0.5982	0.7268	0.8393
dicembre	0.6387	0.7543	0.8555
MEDIA	0.7471	0.8350	0.9065

Il rendimento della coltura Y_{PAR} tende ad essere maggiore per le configurazioni di impianto agrovoltico in cui il LAOR è più basso, in quanto alle piante si trovano in una condizione più favorevole per effettuare il processo di fotosintesi; inoltre emerge anche che le piante che hanno un PAR di saturazione basso riescono ad avere una resa maggiore, in quanto la quantità di radiazione solare necessaria alle stesse per effettuare la fotosintesi è bassa. Considerando uno specifico mese e due colture con un PAR di saturazione (PAR_{th}) differenti è possibile notare una variazione della resa Y_{PAR} .

Ad esempio, fissando come condizione iniziale il mese di febbraio e un LAOR di 35%, e si considera una coltura di lattughe che ha un PAR_{th} di 200 W/m², dalle simulazioni risulta che la pianta arriva a saturazione dalle ore 9:30 circa alle 13:00, perciò in quel range avrà un rendimento pari a 1, mentre dall'alba alle 9:30 e dalle 13:00 al tramonto il rendimento sarà di poco inferiore a 1, in quanto la coltura non riesce a sfruttare tutta la radiazione disponibile per effettuare la fotosintesi.

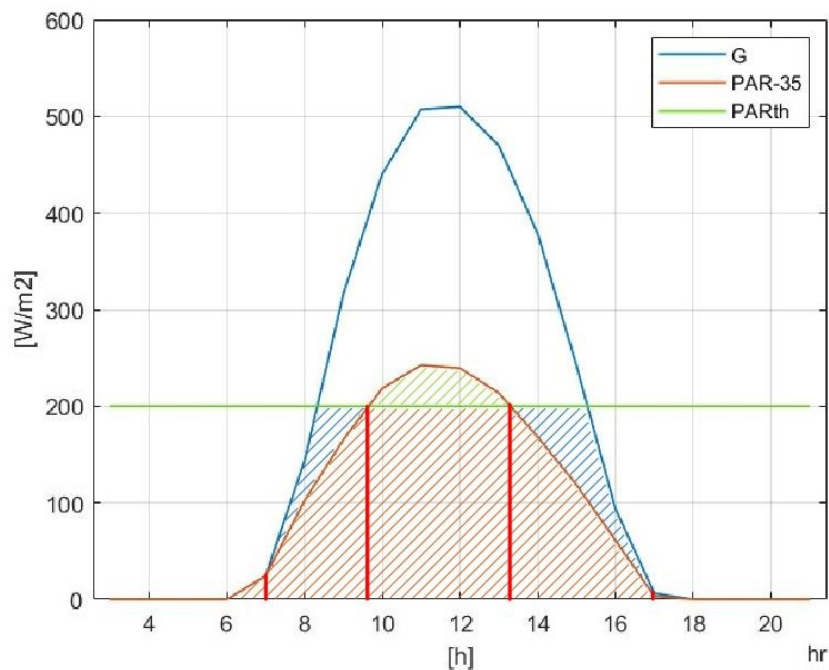


Fig. 55 – radiazione globale e PAR febbraio, considerando la lattuga

Tab. 15 – Y_{PAR} ora per ora lattuga

Ora	Y_{PAR}
[h]	[-]
3:00	0.0000
4:00	0.0000
5:00	0.0000
6:00	0.0000
7:00	1.0000
8:00	0.7133
9:00	0.8274
10:00	1.0000
11:00	1.0000
12:00	1.0000
13:00	1.0000
14:00	0.8405
15:00	0.5924
16:00	0.6516
17:00	0.5141
18:00	0.0000
19:00	0.0000
20:00	0.0000
21:00	0.0000

La resa della coltura Y_{PAR} , invece, si abbassa se si considera una coltura con un PAR_{th} più alto, rispetto al caso precedente. Ad esempio, considerando le stesse condizioni precedenti, ma cambiando la coltura di lattughe con una coltura di cavolo, che ha un PAR_{th} di 355 W/m^2 , il rendimento della coltura sarà costantemente inferiore a 1 durante l'arco della giornata, in quanto la pianta non riceve la radiazione solare sufficiente per arrivare a saturazione, così il processo di fotosintesi sarà meno efficiente.

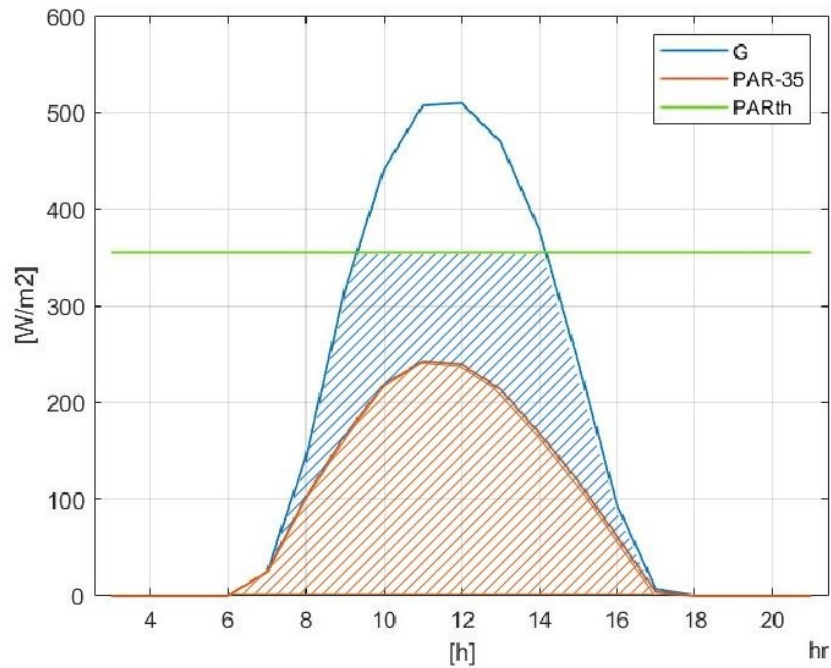


Fig. 56 – Radiazione globale e PAR febbraio, considerando il cavolo

Tab. 16 – Y_{PAR} ora per ora cavolo

Ora	Y_{PAR}
[h]	[-]
3:00	0.0000
4:00	0.0000
5:00	0.0000
6:00	0.0000
7:00	1.0000
8:00	0.7133
9:00	0.5235
10:00	0.6154
11:00	0.6832
12:00	0.6744
13:00	0.6016
14:00	0.4735
15:00	0.4899
16:00	0.6516
17:00	0.5141
18:00	0.0000
19:00	0.0000
20:00	0.0000
21:00	0.0000

5.3.3 RESA TOTALE DELL'IMPIANTO AGROVOLTAICO – LPF

La resa dell'impianto agrovoltaiico è quantificato tramite il coefficiente LPF, come specificato nel capitolo 3, sommando Y_{PAR} e Y_{PV} . Riprendendo gli esempi precedenti, in cui si considerano tre colture, lattuga, cavolo e pomodoro, la resa LPF, per le tre configurazioni di LAOR, sarà:

Tab. 17 – Resa LPF con la lattuga

PAR_{th} = 200 [W/m²]			
LAOR [%]	35	24	14
Mese	LPF		
gennaio	1.3844	1.3461	1.2125
febbraio	1.5425	1.3955	1.2405
marzo	1.6499	1.4479	1.2666
aprile	1.6738	1.4604	1.2709
maggio	1.6885	1.4681	1.2754
giugno	1.6991	1.4754	1.2797
luglio	1.6992	1.4754	1.2797
agosto	1.6888	1.4691	1.277
settembre	1.6758	1.4636	1.2778
ottobre	1.6656	1.4646	1.2764
novembre	1.5537	1.4076	1.249
dicembre	1.4489	1.3842	1.239
LPF Annuo	1.6142	1.4382	1.2620

Tab. 18 – Resa LPF con il cavolo

PAR_{th} = 355 [W/m²]			
LAOR [%]	35	24	14
Mese	LPF		
gennaio	1.2561	1.1802	1.1139
febbraio	1.3426	1.2764	1.1917
marzo	1.586	1.4119	1.2507
aprile	1.6357	1.4402	1.2602
maggio	1.6735	1.4579	1.2694
giugno	1.678	1.4639	1.2729
luglio	1.6748	1.4635	1.2727
agosto	1.6671	1.4549	1.2682
settembre	1.6362	1.4401	1.2627
ottobre	1.5853	1.4158	1.2531
novembre	1.3432	1.2561	1.1789
dicembre	1.351	1.2391	1.1413
LPF Annuo	1.5358	1.3750	1.2280

Tab. 19 – Resa LPF con il pomodoro

PAR_{th} = 630 [W/m²]			
LAOR [%]	35	24	14
Mese	LPF		
gennaio	1.2487	1.1691	1.0995
febbraio	1.2785	1.1894	1.1114
marzo	1.4121	1.2903	1.1837
aprile	1.5244	1.379	1.2286
maggio	1.6165	1.4306	1.2567
giugno	1.624	1.431	1.2555
luglio	1.6167	1.4279	1.2545
agosto	1.5879	1.4147	1.248
settembre	1.5004	1.3496	1.2177
ottobre	1.4359	1.2964	1.1744
novembre	1.3098	1.2107	1.1239
dicembre	1.3504	1.2383	1.1401
LPF Annuo	1.4588	1.3189	1.1912

Come è possibile notare dai risultati emergono due considerazioni:

1. Analizzando singolarmente le tabelle 17, 18 e 19 è possibile notare come all'aumentare della percentuale di LAOR, aumenta il valore LPF;
2. Analizzando le tabelle nel complesso 17, 18 e 19, è possibile notare come il valore di LPF diminuisca all'aumentare del valore di PAR_{th} .

Tab. 20 – Resa LPF annuale

LAOR	$PAR_{th} = 200 \text{ W/m}^2$	$PAR_{th} = 355 \text{ W/m}^2$	$PAR_{th} = 630 \text{ W/m}^2$
	LPF		
35 %	1.6142	1.5358	1.4588
24 %	1.4382	1.3750	1.3189
14 %	1.2620	1.2280	1.1912

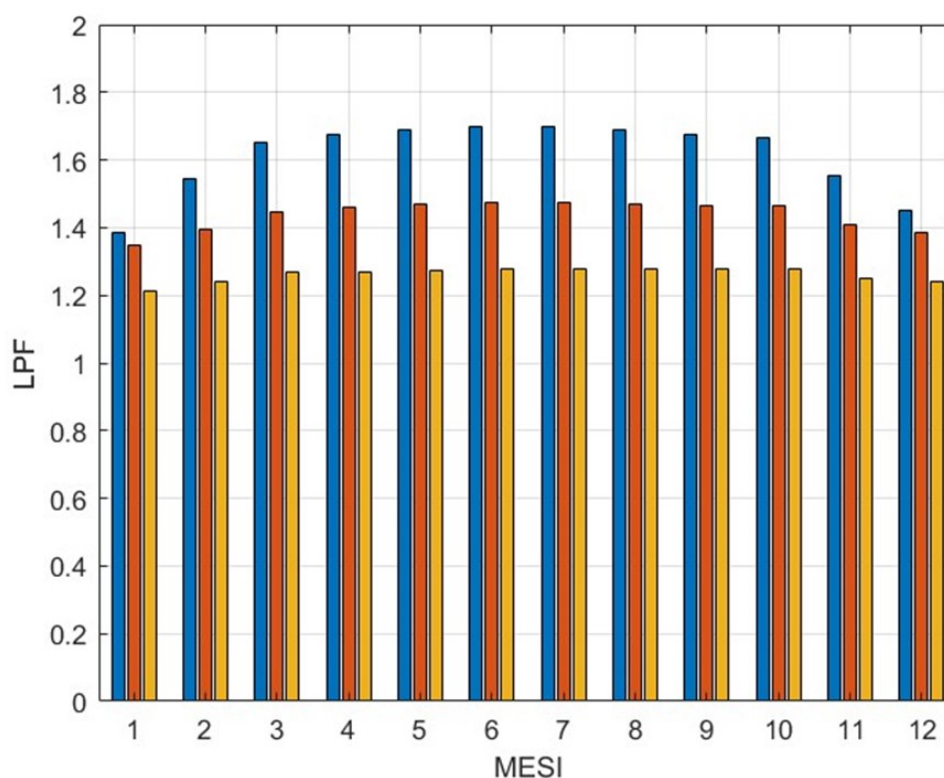


Fig. 57 – LPF di ogni mese con una coltura di lattughe,
in blu LAOR 35%, in rosso LAOR 24% e in arancio LAOR 14%

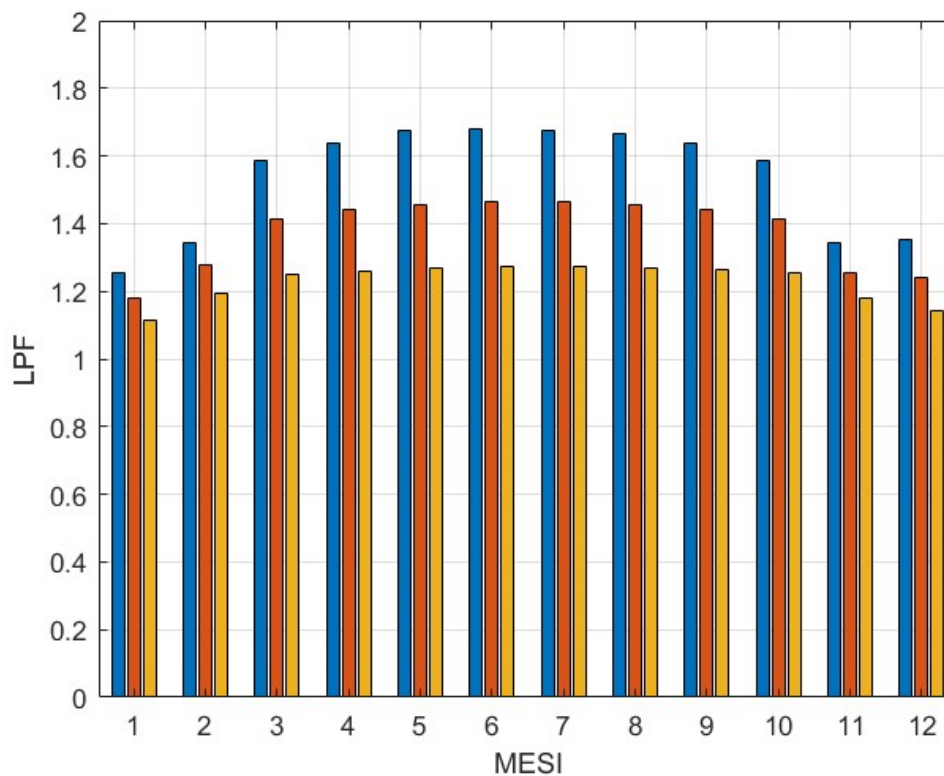


Fig. 58 – LPF di ogni mese con una coltura di cavoli,
in blu LAOR 35%, in rosso LAOR 24% e in arancio LAOR 14%

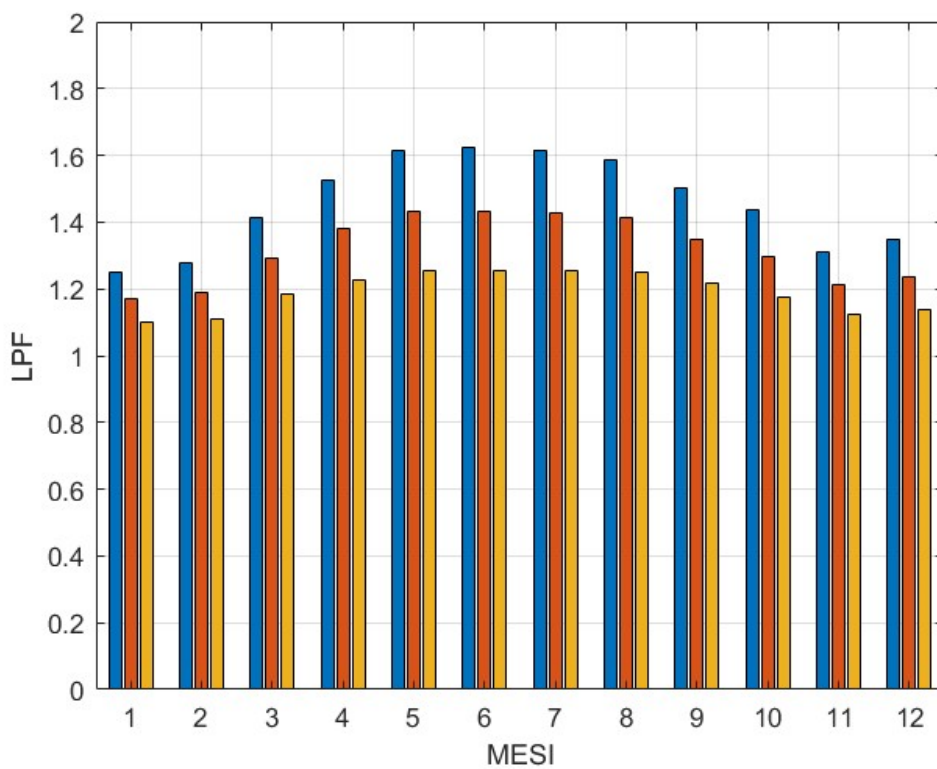


Fig. 59 – LPF di ogni mese con una coltura di pomodori,
in blu LAOR 35%, in rosso LAOR 24% e in arancio LAOR 14%

CAPITOLO 6

CONCLUSIONI

La resa di un impianto agrovoltaico è elevata, grazie alla presenza dei moduli fotovoltaici, che sopperiscono alla perdita di efficienza delle coltivazioni. La resa totale dell'impianto LPF è influenzata in maggior modo dal coefficiente Y_{PV} (resa dell'impianto fotovoltaico, in un contesto agrovoltaico) rispetto al coefficiente Y_{PAR} (resa delle colture in un impianto agrovoltaico).

Facendo riferimento alle indicazioni descritte nel PNRR, è possibile notare come gli impianti con una percentuale di LAOR vicino al 40%, limite massimo per accedere al finanziamento, siano più efficienti. Facendo riferimento ai limiti del PNRR, attraverso le simulazioni è stato possibile calcolare i limiti minimi e massimi per accedere al finanziamento.

I valori minimi e i valori massimi per accedere all'incentivo del PNRR, considerando le caratteristiche dell'impianto agrovoltaico del caso studio, sono:

Tab. 21 – Valori minimi per accedere al finanziamento

LAOR	Numero Pannelli	Potenza Nominale	Produzione Media
[%]	[-]	[kWp]	[MWh]
30	1306	418.17	501.8

Tab. 22 – Valori massimi per accedere al finanziamento

LAOR	Numero Pannelli	Potenza Nominale	Produzione Media
[%]	[-]	[kWp]	[MWh]
40	1755	561.60	673.92

Delle tre configurazioni di impianto agrovoltaico simulate, rientra nell'incentivo solo il sistema con LAOR al 35%, poiché la configurazione con LAOR al 14% ha una potenza nominale inferiore ai 300 kW e la configurazione con LAOR al 24 % ha una produzione elettrica specifica inferiore al 60%, quindi non rispettano i limiti imposti dal PNRR.

Tab. 23 – Configurazioni impianto agrovoltaico.

LAOR	LPF	Potenza Nominale	Produzione Media
[%]	[-]	[kWp]	[MWh]
35	1.6142	496.00	595.20
24	1.4382	337.28	404.74
14	1.2620	198.40	238.08

Dalle simulazioni risulta che, per rendere un sistema agrovoltaico il più efficiente possibile, è utile adottare:

- Una percentuale di LAOR vicina al 40%, che è il limite massimo definito dal PNRR per accedere all'incentivo, limite che consente comunque di ottenere un certo equilibrio tra spazio occupato dalle colture e superficie che viene ricoperta dai moduli fotovoltaici;
- Pannelli fotovoltaici con una potenza di picco elevata, ciò consente, a parità di spazio occupato dai moduli, di avere una potenza nominale dell'impianto maggiore e di conseguenza una produzione media maggiore;
- Diversificare le coltivazioni in base al periodo dell'anno, ciò consente di mantenere il valore di LPF alto, in quanto, se si utilizzano colture che hanno un PARth, relativamente basso nei mesi invernale e, al contrario, se si utilizzano piante che hanno un PARth elevato nei mesi estivi, si va a sfruttare nel modo migliore la luce disponibile per le piante per il processo di fotosintesi.

Tab. 24 – Colture divise per mese

MESE	COLTURA	PARth [W/m ²]	LPF
gennaio	Funghi	160	1.4781
	Lattuga	200	1.3843
	Cipolotto	200	1.3843
febbraio	Patata	240	1.4899
	Pepe verde	240	1.4899
marzo	Carota	310	1.6111
	Zucca	355	1.5860
	Mirtillo	355	1.5860
	Cavolo	355	1.5860
	Riso	355	1.5860
	Cetriolo	435	1.5263
aprile	Cetriolo	435	1.6142
	Taro	630	1.5244
	Pomodoro	630	1.5244
maggio	Taro	630	1.6165
	Pomodoro	630	1.6165
giugno	Anguria	710	1.5924
luglio	Anguria	710	1.5813
	Pomodoro	630	1.6167
agosto	Pomodoro	630	1.5879
	Cetriolo	435	1.6536
settembre	Cetriolo	435	1.6049
ottobre	Cetriolo	435	1.5152
	Riso	355	1.5852
novembre	Patata	240	1.4721
	Lattuga	200	1.5537
dicembre	Lattuga	200	1.4489
	Funghi	160	1.5213

Nel modello non si tiene di vari parametri, che possono influenzare in maniera positiva il sistema, come la temperatura ambiente al disotto delle stringhe, che può offrire riparo al pascolo, ad esempio, o il risparmio idrico che si potrebbe ottenere, dovuto, sempre, alle zone d'ombra che si vanno a creare o si potrebbe implementare in maniera abbastanza semplicemente un sistema di raccolta delle acque piovane.

Un limite del modello di simulazione sta nel tener conto di un solo parametro delle piante, il PAR-limite. Stando alle simulazioni, si potrebbe coltivare nello stesso terreno, ad esempio, la lattuga in inverno e il riso in estate, ma non è possibile sapere se effettivamente ciò è possibile, inoltre bisogna tener conto di come una pianta reagisce nel momento in cui si trova in ombra, ci sono piante che all'ombra aumentano la superficie fogliare, altre che potrebbero risentirne negativamente.

Un altro limite del sistema agrovoltaico è legato alle lavorazioni legate alle colture. Ci sono colture che necessitano di macchinari di dimensioni importanti per essere coltivate e raccolte, ciò comporta la necessità di spazi di manovra per i mezzi e per i lavoratori importanti. È importante tener conto di questo limite, in quanto l'impianto agrivoltaico, per accedere al finanziamento del PNRR, deve avere una potenza nominale di almeno 300 kW, quindi, si presume che il sistema debba essere applicato su terreni di dimensioni importanti.

BIBLIOGRAFIA

- [1] – Solar Energy Engineering – Kalogirou
- [2] – International Energy Agency: IEA – <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/final-consumption>
- [3] – Parlamento europeo – <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/it/sheet/70/energie-rinnovabili>
- [4] – curiosando708090.altervista.org – <https://curiosando708090.altervista.org/cera-una-volta-la-dinamo/>
- [5] – iStockphoto.com – <https://www.istockphoto.com/it/foto/viola-fulmine-orizzontale-gm95778785-3561379>
- [6] – lescienze.it – <http://pasini-lescienze.blogautore.espresso.repubblica.it/2015/11/09/ce-calore-e-calore/>
- [7] – Decreto Legislativo 29 dicembre 2003, n. 387
- [8] – assinews.it – <https://www.assinews.it/01/2020/swiss-re-corso-kwh-collaborano-espandere-ladozione-dellenergia-solare/660070382/>
- [9] – startmag.it – <https://www.startmag.it/energia-eolica/energia-eolica-inizia-la-campagna-yes-to-wind-power/>
- [10] – curiosando il mondo – <https://curiosandoilmondocom.wordpress.com/2017/02/02/curiosita-sui-vulcani-dellislanda/>
- [11] – dirigentindustria.it – <https://dirigentindustria.it/notizie/sviluppo-sostenibile/dove-va-l-idroelettrico-italiano-.html>
- [12] – energiealternative.soswiki.com – <https://energiealternative.soswiki.com/energia-solare.php>
- [13] – enelgreenpower.com – <https://www.enelgreenpower.com/it/learning-hub/energie-rinnovabili/energia-solare>
- [14] – Sonnen.it – <https://sonnen.it/il-fotovoltaico-dal-1839-a-oggi-la-storia-di-un-importante-innovazione/>
- [15] – minformo.it – <https://www.minformo.it/29977/ambiente/energie-rinnovabili/fotovoltaico-monocristallino.html>

- [16] – cosvig.it – <https://www.cosvig.it/fotovoltaico-in-silicio-policristallino-nuovo-record-defficienza/>
- [17] – tecnosolarimpianti.it – <https://tecnosolarimpianti.it/>
- [18] – iermimpianti.it – https://www.iermimpianti.it/ita/articoli/soluzioni/solare-termico/solare-termico_196.html
- [19] – tatano.com – <https://www.tatano.com/it/blog/guida-al-riscaldamento/solare-termico-circolazione-naturale>
- [20] – pss-italy.com – <https://www.pss-italy.com/categoria-prodotto/impianto-solare-termico-a-circolazione-naturale/>
- [21] – vaillant.it – <https://www.vaillant.it/home/approfondimenti-e-consigli/come-funzionano-le-diverse-tecnologie/riscaldamento-con-solare-termico/>
- [22] – sorgenia.it – <https://www.sorgenia.it/guida-energia/solare-termodinamico-concentrazione>
- [23] – energiaoltre.it – <https://energiaoltre.it/energia-la-tecnologia-enea-sbarca-nord-africa/>
- [24] – A review of research on agrivoltaic systems – Dargusch, Al Mamun, Wadley, Zulkarnain, Aziz
- [25] – Conflicts between decentralized renewable electricity production and landscape services – Kienast F, Huber N, Hergert R, Bolliger J, Moran LS, Hersperger AM. "
- [26] – The earthscan expert guide to design and construction of utility-scale photovoltaic systems. – Neill S, Stapleton G, Martell C. Solar Farms
- [27] – Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses. Renew Sustain Energy Rev – Hassanien RHE, Li M, Dong Lin W."
- [28] – Agrivoltaics: Opportunities For Agriculture And The Energy Transition – Fraunhofer ISE
- [29] – PNRR – Piano nazionale di ripresa e resilienza
- [30] – ENEA – Alessandra Scognamiglio
- [31] – Agrivoltaic Systems Design and Assessment: A Critical Review, and a Descriptive Model towards a Sustainable Landscape Vision (Three-Dimensional Agrivoltaic Patterns) – Toledo, Scognamiglio"
- [32] – Qualenergia – <https://www.qualenergia.it/articoli/agrovoltaico-cantiere-aperto-per-italia-guardiamo-solo-soluzioni-win-win/>

- [33] – Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production – Amaducci, Yin, Colauzzi
- [34] – Ansa – https://www.ansa.it/ansa2030/notizie/lavoro_sviluppo/2023/03/24/ef-solaresullagrivoltaico-serve-un-quadro-normativo-chiaro_24cb7ad2-8c70-4b7e-b08b-67edf3dab735.html
- [35] – SeaSolar – <https://seasolargroup.com/agrivoltaico/>
- [36] – enelgreenpower.com – <https://www.enelgreenpower.com/it/media/news/2022/06/modello-agrivoltaico-risultati-sperimentazione>
- [37] – Ideegreen – <https://www.ideegreen.it/piante-c3-e-c4-differenze-esempi-97520.html>
- [38] – Linee Guida Per L'applicazione Dell'Agro-Fotovoltaico In Italia
- [39] – Dictio – <https://www.dictio.id/t/apakah-perbedaan-antara-tanaman-c3-c4-dan-cam/3467>
- [40] – Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels – Marrou, Wery, Dufour, Dupraz"
- [41] – Analysis of Light Environment under Solar Panels and Crop Layout – Wang, Sun, Lin, Gao
- [42] – Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency – Akeh, Selker, Higgins
- [43] – Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? – Marrou, Wery, Dufour, Dupraz, Giulioni
- [44] – Photosynthetically active radiation decomposition models for agrivoltaic systems applications – Ma Lu, Zainali, Stridh, Avelin, Amaducci, Colauzzi, Campana "
- [45] – anniluce – http://anniluce.files.wordpress.com/2011/05/spettro_luce12-copia.jpg
- [46] – Solar Sharing – <https://solar-sharing.org/>
- [47] – ASHRAE
- [48] – Solar Engineering of Thermal Processes – Duffie, J.A., Beckman, W.A.
- [49] – chimica-online – <https://www.chimica-online.it/astronomia/longitudine.htm>
- [50] – Mondogeo – https://www.mondogeo.it/Pagine_100/pagina_05.html
- [51] – The albedo of Earth – Stephens, O'Brien, Webster, Pilewski, Kato, Jui-lin Li

[52] – architetturaecosostenibile – <https://www.architetturaecosostenibile.it/architettura/criteri-progettuali/albedo-riflesso-sole-valore-superfici-040>

[53] – utopia.solar – <https://www.utoopia.solar/la-tecnologia-perc>