



PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DI UN
IMPIANTO AGROVOLTAICO DENOMINATO

"HUGO"

SITO NEL COMUNE DI
RAGUSA (RG)
C.DA IMPERATORE, SNC

ANALISI ALTERNATIVE DI PROGETTO IN ORDINE AI POSSIBILI IMPATTI SULLE COMPONENTI AMBIENTALI

COMMITTENTE:

CML S.R.L.

Corso Buenos Aires 54 - 20124
Milano (MI)

IL TECNICO

Crucillà Vincenzo

CODICE:

CRRELTEC005A0

REVISIONE:

00

DATA ELABORATO:

19/07/2023



Sommario

1.	Premessa.....	3
2.	Tecnologia dei moduli fotovoltaici utilizzati	3
3.	Vantaggi nella scelta di moduli fotovoltaici monocristallini bifacciali	5
4.	Sistemi fotovoltaici con tensione massima 1500 V dc	6
5.	Strutture di supporto dei moduli fotovoltaici: tecnologie a confronto	7
6.	Conclusioni sulla scelta delle strutture di supporto dei moduli fotovoltaici ..	14
7.	Conclusioni	15

1. Premessa

La presente iniziativa si inquadra nel piano di sviluppo e realizzazione di impianti per la produzione di energia elettrica mediante conversione fotovoltaica dell'energia solare che la società **CML S.r.l.**, intende realizzare nella **Regione Sicilia**. L'impianto concorre al soddisfacimento delle esigenze di energia pulita e sviluppo sostenibile sancite dal Protocollo internazionale di Kyoto del 1997 e delle Direttive Europee da questo scaturite.

La presente relazione tecnica ha come obiettivo quello di fornire un'approfondita e dettagliata analisi delle alternative di progetto, con particolare riferimento agli aspetti tecnologici, costruttivi e dimensionali. Su questo aspetto è stata effettuata una specifica analisi in merito alle soluzioni impiantistiche in ordine ai possibili impatti sulle componenti ambientali. La scelta della migliore alternativa è stata valutata sotto il profilo dell'impatto ambientale, relativamente alle singole tematiche ambientali ed alle loro interazioni, al fine di confrontare in termini qualitativi e quantitativi la sostenibilità di ogni alternativa proposta. Nella scelta dell'alternativa ragionevole più sostenibile dal punto di vista ambientale, sono stati considerati in particolare gli aspetti relativi al consumo di suolo, paesaggio, vegetazione e fauna.

2. Tecnologia dei moduli fotovoltaici utilizzati

Oggi il panorama del fotovoltaico è dominato da tre tecnologie:

- pannelli in silicio monocristallino;
- pannelli in silicio policristallino;
- pannelli a film sottile (silicio amorfo).

Le tecnologie fotovoltaiche sono in continua evoluzione, alla ricerca di materiali sempre più efficienti, economici ed eco-compatibili. Tuttavia queste tecnologie alternative sono ancora in una fase sperimentale (fotovoltaico organico) o comunque non hanno raggiunto una maturità tale da giustificare l'impiego per un progetto quale quello considerato (celle al Telluro di Cadmio (CdTe), Diseleniuro di Indio Rame (CIS), Diseleniuro di Indio Rame Gallio (CIGS), Arseniuro di Gallio (GaAs) etc...). Inoltre, in conseguenza delle basse efficienze raggiunte, l'impatto sul consumo di suolo, a parità di potenza installata, sarebbe non sostenibile.

Pertanto si è optato per la tecnologia di moduli fotovoltaici in silicio monocristallino, che presenta, allo stato attuale, le migliori prestazioni in termini di efficienza, che si traduce in minore superficie necessaria a parità di potenza. Questo risultato è dovuto principalmente alle loro celle, costruite appositamente con un grado di purezza del silicio molto elevato. Inoltre



la conformazione di questi pannelli, caratterizzati da un unico cristallo a formare la trama delle varie celle, favorisce una maggiore dispersione. Di contro i pannelli in silicio monocristallino sono, per le specifiche costruttive richieste, i più costosi presenti sul mercato. Inoltre la resa diminuisce all'aumentare della temperatura della superficie.

TECNOLOGIA	EFFICIENZA [%]	SUPERFICIE [M2/KW]
monocristallino	18%-20%	6
policristallino	16%-18%	8
film sottile	6%-8%	20

I pannelli monocristallini attualmente in commercio sono di due tipi: monofacciali e bifacciali. I pannelli monofacciali (gli unici in commercio fino a qualche anno fa) sono solitamente racchiusi in un vetro sulla parte anteriore ed un incapsulante opaco sul retro costituito da un materiale polimerico protettivo.

I moduli fotovoltaici bifacciali sono pannelli solari monocristallini, emersi negli ultimi anni sul mercato, che possono ricevere e produrre energia non solo dal lato frontale, ma anche da quello retrostante, che dunque è trasparente. I moduli bifacciali sono costituiti pertanto da celle attive su entrambi i lati. Quindi, sono in grado di generare elettricità pure dalla luce ambientale proveniente da dietro al pannello, cioè che è riflessa dalle superfici circostanti, producendo di conseguenza più energia rispetto ai pannelli monofacciali tradizionali. Per massimizzare l'efficacia di questi pannelli, conviene montare il tutto su una struttura con inseguimento monoassiale. In tal modo, si ha dal 5% al 20% in più di energia prodotta rispetto ai pannelli monofacciali, a seconda del tipo di struttura utilizzato (altezza dal suolo, angolo di tilt, etc...) e del quantitativo di luce indirizzato sul retro del pannello bifacciale (albedo della superficie del terreno circostante).

I parametri che caratterizzano un modulo bifacciale sono:

- **fattore bifacciale:** rapporto tra efficienza lato posteriore e lato anteriore, o rapporto fra la potenza anteriore e posteriore misurata in condizioni di test standard;
- **guadagno bifacciale:** potenza aggiuntiva ottenuta dal retro del modulo rispetto alla potenza della parte anteriore del modulo in condizioni di test standard. Il guadagno bifacciale dipende dal montaggio (struttura, altezza, angolo di inclinazione etc..) e dall'albedo della superficie del terreno.



3. Vantaggi nella scelta di moduli fotovoltaici monocristallini bifacciali

I vantaggi nell'impiego di moduli bifacciali sono i seguenti:

- prestazioni migliori del modulo: poiché anche il lato posteriore del modulo è in grado di catturare la luce solare, è possibile ottenere un notevole incremento nella produzione di energia lungo tutta la vita utile del sistema. Ricerche sul campo mostrano che un impianto FV che impiega moduli bifacciali può arrivare a produrre fino al 20% in più, rispetto ad un impianto con moduli cristallini tradizionali di pari potenza;
- maggiore durabilità: il lato posteriore del modulo è dotato di uno strato di vetro aggiuntivo (modulo vetro-vetro), per consentire alla luce di essere captata anche dal retro della cella. Questo conferisce al modulo caratteristiche di maggiore rigidità, fattore che riduce al minimo lo stress meccanico a carico delle celle, dovuto al trasporto ed all'installazione o a fattori ambientali esterni come carico vento. Ciò si traduce in minore necessità di sostituzione/smaltimento/riciclo di moduli durante la vita utile dell'impianto;
- riduzione costi del BOS e consumo di suolo: il modulo bifacciale permette di aumentare l'efficienza del modulo e la densità di potenza, rendendo possibile la riduzione dell'area di installazione ed il consumo di suolo, oltre che i costi relativi al montaggio e cablaggio del sistema (strutture di supporto, cavi, etc...);
- riduzione della radiazione solare riflessa dal suolo, perché assorbita dai moduli, con minore impatto sulla avifauna;

TECNOLOGIA	EFFICIENZA [%]	SUPERFICIE [M2/KW]
monofacciale	18%-20%	6
bifacciale (max gain)	24%-25%	4,8

L'impiego di moduli bifacciali vetro-vetro Astroenergy ASTRO N5 CHSM72N(DSG)/F-BH Bifacial Series (182) 560-580 W da 575 Wp utilizzati per il progetto HUGO mostra una riduzione del BOS (Balance of System) fra il 6% e l'8% e riduzione del costo di produzione dell'energia elettrica LCOE (Levelized Cost of Electricity) dal 3% al 4%, nel confronto con moduli di moduli tradizionali da 400 Wp, a parità di potenza di impianto. Dai dati appare che il consumo di suolo nella scelta di questo tipo di tecnologia, è ridotto dall'11% al 27%, in funzione del guadagno bifacciale, rispetto all'impiego di moduli da 400 Wp monofacciali.

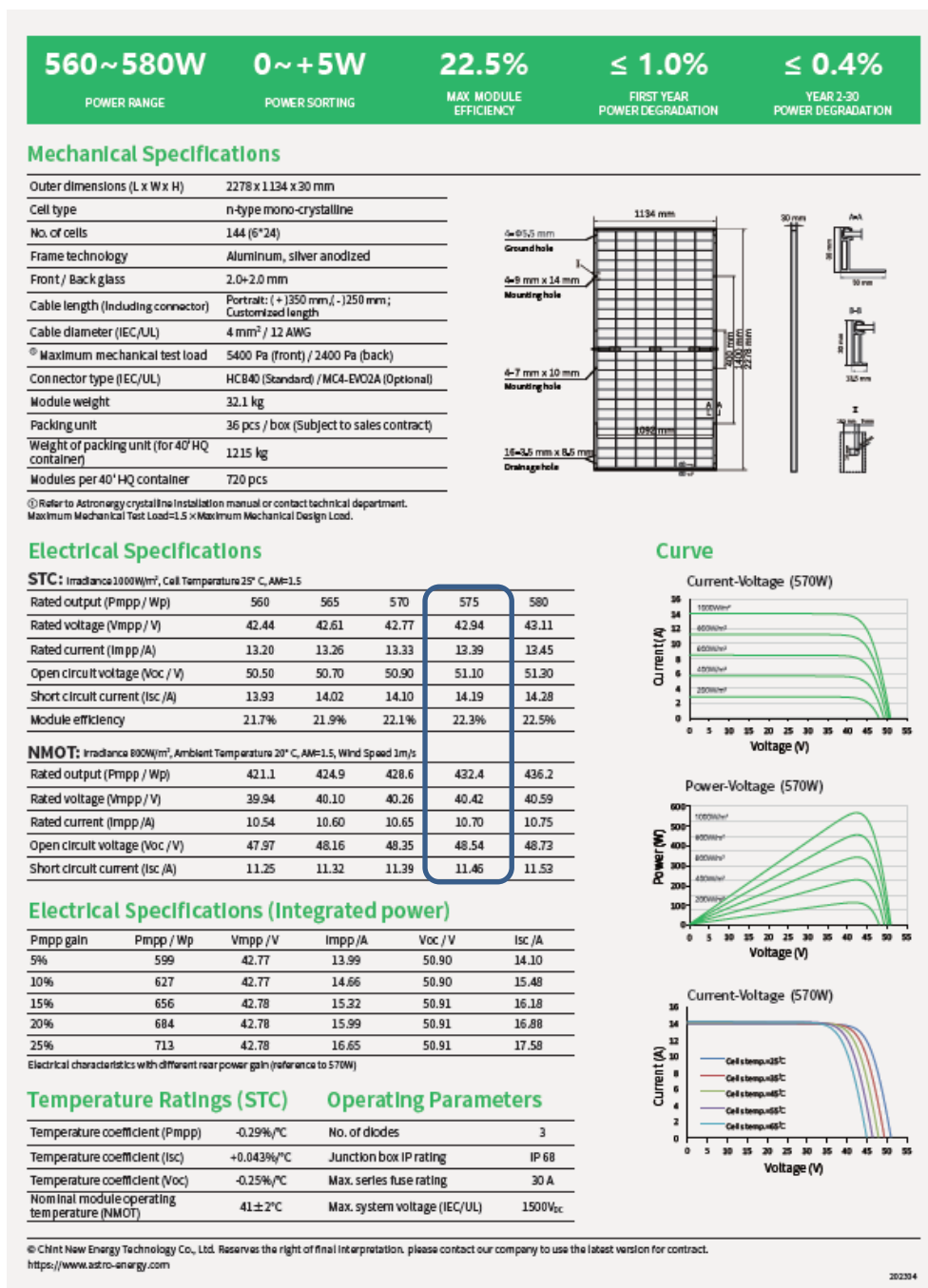
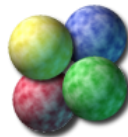


Figura 1 – Estratto scheda tecnica moduli

4. Sistemi fotovoltaici con tensione massima 1500 V dc

La progettazione di sistemi fotovoltaici di nuova concezione ha come obiettivo principale quello di aumentare la produttività e ridurre i costi di investimento, di gestione e di dismissione, con conseguente minore impatto anche sull'ambiente. Una tra le migliori apportate negli ultimi anni alla componentistica principale degli impianti fotovoltaici, è



l'incremento della tensione massima di esercizio di moduli ed inverter da 1000 V DC a 1500 V DC. Questo cambiamento permette a parità di potenza, la riduzione della corrente erogata, con conseguente riduzione della sezione dei cavi e quindi di quantità di materiale conduttore necessario a trasportare la stessa quantità di energia; in aggiunta vi sarà anche una riduzione di quantitativi di componenti in bassa tensione necessari al funzionamento dell'impianto quali connettori, string box etc.... Questo determina sia una riduzione dei costi di impianto, che anche una riduzione di impatto sull'ambiente in quanto una minore quantità di materiale conduttore necessario per il trasporto dell'energia, determina anche una riduzione di (i) quantitativo di scavi, (ii) consumo di materia prima intesa come conduttore di energia, (iii) e quindi anche una riduzione di materiali da smaltire in fase di dismissione.

Pertanto in fase di progettazione dell'impianto Maas 2 si è deciso di optare per moduli, inverter e componenti che rientrano in questi criteri. In particolare si è optato per realizzare una configurazione di impianto lato dc tale che le stringhe che compongono il campo fotovoltaico siano mediamente costituite da n. 26 moduli in serie, con una tensione lato DC nell'intorno dei 1500 V.

5. Strutture di supporto dei moduli fotovoltaici: tecnologie a confronto

Al fine di aumentare la producibilità dell'impianto e ridurre, a parità di potenza, il consumo di suolo, si ritiene opportuno utilizzare, al posto di strutture di supporto fisse, comunemente adottate fino ad oggi per gli impianti "utility scale", dei sistemi di supporto ad inseguimento. Le strutture di supporto dei moduli fotovoltaici, sono ad oggi suddivise in due grandi categorie: (i) sistema fisso, (ii) sistema ad inseguimento.

Di seguito saranno messe a confronto le varie tecnologie tutt'oggi presenti sul mercato.

Il sistema fisso è costituito da strutture di supporto con telaio metallico che presentano una inclinazione fissa (generalmente intorno a 30°) sono rivolte verso il sud (azimut 0°).

Il sistema ad inseguimento può essere suddiviso in due macrocategorie: (i) sistema ad inseguimento monoassiale e (ii) sistema ad inseguimento biassiale.

I sistemi ad inseguimento monoassiale, essendo dispositivi che "inseguono" il sole ruotando attorno a un solo asse, possono, a seconda dell'orientazione di tale asse, essere ulteriormente distinti in quattro tipologie:

- **inseguitori di tilt:** ruotano attorno all'asse est-ovest e sono gli inseguitori solari più semplici. Poiché normalmente i pannelli solari sono orientati verso sud, in questo caso



si deve aumentare o diminuire l'inclinazione del pannello rispetto al terreno di un piccolo angolo, in modo tale che l'angolo rispetto al suolo, detto angolo di tilt sia statisticamente ottimale rispetto alla stagione. Questa operazione viene di solito eseguita manualmente due volte l'anno, grazie a una montatura apposita che permette di abbassare o sollevare a mano i pannelli rispetto all'orizzonte: poiché l'incremento nella produzione di energia offerto da questo tipo di inseguitori non supera il 10%, raramente sarebbe giustificato l'impiego di un servomeccanismo.



Figura 2 – Inseguitori monoassiali di “tilt”

- **inseguitori di rollio:** sono dispositivi che, con l'ausilio di servomeccanismi, inseguono il Sole lungo il suo percorso quotidiano nel cielo, a prescindere dalla stagione, e dunque ruotando ogni giorno lungo un asse nord-sud parallelo al suolo, ignorando la variazione di altezza (giornaliera ed annua) del Sole sull'orizzonte. Tale tipo di inseguitore, che effettua una rotazione massima di $\pm 60^\circ$, risulta particolarmente adatto per i Paesi come l'Italia caratterizzati da basse latitudini, poiché in essi il percorso apparente del Sole è più ampio. Per evitare il problema degli ombreggiamenti reciproci che con file di questi inseguitori si verificherebbero all'alba e al tramonto, viene impiegata la cosiddetta tecnica del backtracking: i moduli seguono il movimento del Sole solo nelle ore centrali del giorno, invertendo il movimento a ridosso dell'alba e del tramonto, quando raggiungono un allineamento perfettamente orizzontale. L'incremento nella



produzione di energia offerto tali inseguitori si colloca all'interno di un intervallo compreso tra il 15% ed il 20%.



Figura 3 - Inseguitori monoassiali di "rollio"

- **inseguitori di azimut:** ruotano intorno a un asse verticale perpendicolare al suolo. Perciò i pannelli sono montati su una base rotante complanare al terreno che, tramite un servomeccanismo, segue il movimento del sole da est a ovest durante il giorno ma, a differenza degli inseguitori di tilt e di rollio, senza mai variare l'inclinazione del pannello rispetto al suolo. Ovviamente, gli inseguitori di azimut normalmente hanno i pannelli solari inclinati di un certo angolo rispetto all'asse di rotazione. I progetti che utilizzano questo tipo di inseguitori devono tener opportunamente conto degli ombreggiamenti per evitare perdite di energia e per ottimizzare l'utilizzo del terreno. Tuttavia, l'ottimizzazione in caso di raggruppamento ravvicinato è limitata a causa della natura delle ombre che si creano nel corso dell'anno, perciò sono adatti, sostanzialmente, quando si abbiano a disposizione degli spazi estremamente ampi. L'incremento nella produzione di energia offerto da questo tipo di inseguitori si colloca all'interno di un intervallo compreso tra il 20% ed il 25%.



Figura 41 - Inseguitori monoassiali di "azimut"

- **inseguitori ad asse polare:** ruotano, con l'ausilio di un servomeccanismo, intorno a un asse parallelo all'asse nord-sud di rotazione terrestre (asse polare), e dunque inclinato rispetto al suolo. Si noti che negli inseguitori di rollio l'asse di rotazione è ugualmente orientato in direzione nord-sud ma esso (ed i pannelli) è parallelo al suolo, e non all'asse terrestre. Negli inseguitori a asse polare, invece, l'asse di rotazione è inclinato rispetto al suolo per poter essere circa parallelo all'asse di rotazione terrestre. L'asse di rotazione di tali inseguitori, quindi, è simile a quello attorno al quale il sole disegna la propria traiettoria nel cielo, ma non uguale, a causa delle variazioni dell'altezza del sole nel cielo nelle varie stagioni. Gli inseguitori ad asse polare, dunque, riescono a tenere i pannelli solari all'incirca perpendicolari rispetto al sole durante tutto l'arco della giornata (trascurando le suddette oscillazioni di altezza stagionali) e danno la massima efficienza che si possa ottenere con un solo asse di rotazione (con potenziali punte del 30%).



Figura 5 - Inseguitori monoassiali ad "asse polare"

Gli inseguitori fotovoltaici **biassiali**, a differenza di quelli monoassiali, hanno due assi di rotazione, di cui uno principale ed uno secondario, solitamente perpendicolari fra loro. Grazie ad essi, e con l'ausilio di una strumentazione elettronica più sofisticata rispetto al sistema ad inseguimento monoassiale, è possibile puntare precisamente, ed in tempo reale, i moduli fotovoltaici verso il sole, via via che lo stesso si sposta sulla volta celeste, e, di conseguenza, seguirne il moto diurno, massimizzando l'efficienza dei moduli fotovoltaici. Questi sistemi possono avere un incremento della produzione di energia del 35-40% rispetto agli impianti con sistema di strutture di supporto fisse dei moduli fotovoltaici, e dunque di almeno il 5% in più rispetto ai più efficienti sistemi ad inseguimento monoassiale, a fronte però di una complessità costruttiva decisamente maggiore. Esistono due tipi di inseguitori biassiali molto comuni, i quali si differenziano per la diversa orientazione degli assi di rotazione della montatura:



- **inseguitori biassiali azimut-elevazione:** inseguono il sole assistiti da un computer il quale calcola la posizione prevista nel cielo oppure da un sensore di luce che controlla i motori, hanno il loro asse di rotazione principale verticale rispetto al terreno, e quello secondario perpendicolare ad esso. Questa sistema di montaggio (detto "altazimutale"), permette di puntare, con l'ausilio di elettronica molto sofisticata, qualsiasi punto del cielo. Le strutture di questi sistemi di inseguimento sono molto grandi e di questo di deve tener conto durante la progettazione, soprattutto in riferimento alla stima dell'uso del suolo correlata alla valutazione degli ombreggiamenti, al fine di evitare consistenti perdite di energia.



Figura 6 - Inseguitore biassiale "azimut-elevazione"

- **inseguitori biassiali tilt-rollo:** hanno l'asse principale parallelo al suolo, mentre quello secondario è normalmente perpendicolare all'asse primario. I posti disponibili alle estremità dell'asse primario possono essere condivisi con più gruppi di pannelli, permettendo costi di installazione più bassi. Per evitare il problema degli ombreggiamenti reciproci che con file di questi inseguitori si verificherebbero all'alba e al tramonto, viene impiegata la cosiddetta tecnica del *backtracking*: i moduli seguono il movimento del Sole ruotando lungo l'asse di rollo solo nelle ore centrali del giorno, invertendo il movimento a ridosso dell'alba e del tramonto.



Figura 7 - Inseguitore biassiale "tilt – rollio"

Tecnologia	Irraggiamento solare	consumo di suolo	presenza fondazioni in cemento armato	altezza massima strutture
-	[kWh/m ²]	[ha/MW]	-	[m]
sistema fisso	2000	1,3	pali infissi a terra con o senza calcestruzzo o blocchi in cemento poggiati a terra	3,5
sistema ad inseguimento monoassiale di "tilt"	2200	1,5	plinti in cemento armato	4,5
sistema ad inseguimento monoassiale di "rollio"	2350	1,6	pali infissi a terra con o senza calcestruzzo	4,5



sistema ad inseguimento monoassiale di "azimut"	2450	2	plinti in cemento armato	5,5
sistema ad inseguimento monoassiale ad "asse polare"	2550	1,8	plinti in cemento armato o blocco di cemento esterno poggiato a terra	5
sistema ad inseguimento binoassiale di "azimut-elevazione"	2700	3,5	plinti di fondazione in cemento armato	6
sistema ad inseguimento biassiale di "tilt-rollio"	2700	4	plinti di fondazione in cemento armato	6

6. Conclusioni sulla scelta delle strutture di supporto dei moduli fotovoltaici

In conclusione gli inseguitori monoassiali permettono di conseguire un incremento nella produzione di energia compreso fra il quasi 10% dei semplici inseguitori di tilt ed il 30% degli inseguitori ad asse polare. Pur essendo quelli più efficienti, gli inseguitori ad asse polare sono tuttavia raramente utilizzati a causa dell'elevato profilo esposto al vento. Gli un po' meno efficienti inseguitori di azimut necessitano, da parte loro, di spazi relativamente ampi per evitare il problema degli ombreggiamenti, che invece nel caso degli inseguitori di rollio è stato risolto con la tecnica del backtracking. Gli inseguitori di tilt, infine, non hanno questo tipo di problema e presentano il vantaggio di essere particolarmente economici non avendo servomeccanismi, tuttavia l'aumento di producibilità è limitato e richiedono l'intervento diretto dell'operatore due volte l'anno, per variare l'inclinazione rispetto al suolo, che per impianti di grandi dimensioni può essere abbastanza oneroso.

Pertanto, per coniugare le esigenze di aumento della producibilità, limite nel consumo di suolo ed impatto sull'area di impianto, si ritiene che il miglior compromesso sia di adottare un sistema ad inseguimento monoassiale del tipo a rollio con asse di rotazione in direzione nord-sud ed angolo di tracking $-55^{\circ}/+55^{\circ}$, con tecnologia backtracking. Il tipo di sistema consente un aumento di producibilità rispetto al sistema fisso di circa il 20%. Grazie alla tecnologia

backtracking, il consumo di suolo è notevolmente ridotto rispetto alle altre tipologie di inseguitori (fisso, azimut ed asse polare). Inoltre le strutture sono fissate al suolo mediante pali infissi (senza o con ridotto impiego di calcestruzzo in funzione della tipologia di suolo) quindi con fondazioni meno impattanti sull'area di impianto rispetto ai sistemi monoassiali di azimut e ad asse polare e rispetto agli inseguitori biassiali, che necessitano, al contrario, di opere di fondazioni in cemento armato, anche di notevole consistenza, a causa dei grandi profili esposti al vento. In ultimo le altezze massime (raggiunte all'alba e al tramonto, quando l'angolo di rotazione è massimo), sono dell'ordine di 4,50 m, nettamente inferiori rispetto ad altre tipologie, come i sistemi monoassiali ad asse polare o a inseguitore di azimut o i sistemi biassiali.

7. Conclusioni

La attenta analisi degli aspetti tecnologici, relativi alla tipologia di moduli utilizzati (tipologia di celle, tipologia di moduli, tensione massima di sistema) ed agli aspetti costruttivi (sistemi di supporto dei moduli) ed il loro impatto sugli aspetti ambientali, ha orientato le scelte progettuali verso tecnologie che presentino il minor fabbisogno di superficie a parità di potenza e il minor impatto sull'area in termini di interazione con il suolo e la vegetazione circostante:

- **tecnologia celle fotovoltaiche:** si è optato per la tecnologia di moduli fotovoltaici in silicio monocristallino, che presenta, allo stato attuale, le migliori prestazioni in termini di efficienza, che si traduce in minore superficie necessaria a parità di potenza;
- **utilizzo di moduli bifacciali (vetro-vetro) da 575 Wp:** il modulo bifacciale permette di aumentare l'efficienza del modulo e la densità di potenza, rendendo possibile la riduzione dell'area di installazione ed il consumo di suolo, oltre che i costi relativi al montaggio e cablaggio del sistema (strutture di supporto, BOS, cavi, etc...).
- **tensione massima di sistema 1500 V dc:** l'incremento della tensione massima di esercizio di moduli ed inverter da 1000 V dc a 1500 V dc offre l'opportunità di ridurre il costo dell'impianto, in quanto, a parità di potenza, la corrente erogata dai moduli diminuisce riducendo il numero di componenti in BT (connettori, string box etc...) ed il cablaggio totale necessario. Il sistema risulta inoltre più efficiente lato dc in quanto le perdite ohmiche sono minori, con minore impatto sull'ambiente e sul consumo di materie prime (rame etc...)



- **sistema di supporto moduli ad inseguimento monoassiale:** per coniugare le esigenze di aumento della producibilità, limite nel consumo di suolo ed impatto sull'area di impianto, si ritiene che il miglior compromesso sia di adottare un sistema ad inseguimento monoassiale del tipo a rollio con asse di rotazione in direzione nord-sud ed angolo di tracking $-55^{\circ}/+55^{\circ}$, con tecnologia backtracking. Il tipo di sistema consente un aumento di producibilità rispetto al sistema fisso di circa il 20%. Grazie alla tecnologia backtracking, il consumo di suolo è notevolmente ridotto rispetto alle altre tipologie di inseguitori (fisso, azimut ed asse polare). Inoltre le strutture sono fissate al suolo mediante pali infissi (senza o con ridotto impiego di calcestruzzo in funzione della tipologia di suolo) quindi con fondazioni meno impattanti sull'area di impianto rispetto ai sistemi monoassiali di azimut e ad asse polare e rispetto agli inseguitori biassiali, che necessitano, al contrario, di opere di fondazioni in cemento armato, anche di notevole consistenza, a causa dei grandi profili esposti al vento. In ultimo le altezze massime (raggiunte all'alba e al tramonto, quando l'angolo di rotazione è massimo), sono dell'ordine di 4,30 m, nettamente inferiori rispetto ad altre tipologie, come i sistemi monoassiali ad asse polare o a inseguitore di azimut o i sistemi biassiali.