

# bollettino

dell'Ordine degli ingegneri  
della provincia di Palermo



Periodico quadrimestrale  
Maggio/Agosto 2009

In caso di mancata consegna si prega di restituire al mittente che si impegna a pagare la relativa tassa.



## In questo numero

Il Piano Urbano del Traffico a Palermo

Messa in servizio di attrezzature in pressione ed impianti termici

Valutazioni tecniche ed economiche sull'uso degli inseguitori solari

Il servizio di ingegneria chimica

Il Piano Energetico Ambientale Regionale Siciliano e le fonti energetiche rinnovabili

Il trattamento con calce dei terreni fini di scavo

# Valutazioni tecniche ed economiche sull'uso degli inseguitori solari

Prof. Ing. Bernardo Zuccarello

Dipartimento di Meccanica - Facoltà di Ingegneria - Università degli Studi di Palermo - e-mail: zuccarello@dima.unipa.it

Ing. Vincenzo Di Dio

Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e delle Telecomunicazioni - Università degli Studi di Palermo

e-mail: vdiديو@dieet.unipa.it

p.i. Salvatore Vivona

SABER Technology s.r.l. via P.pe di Belmonte, 80 - 90126 - Palermo (Italia) - e-mail: sunkeeper@saber-technology.eu

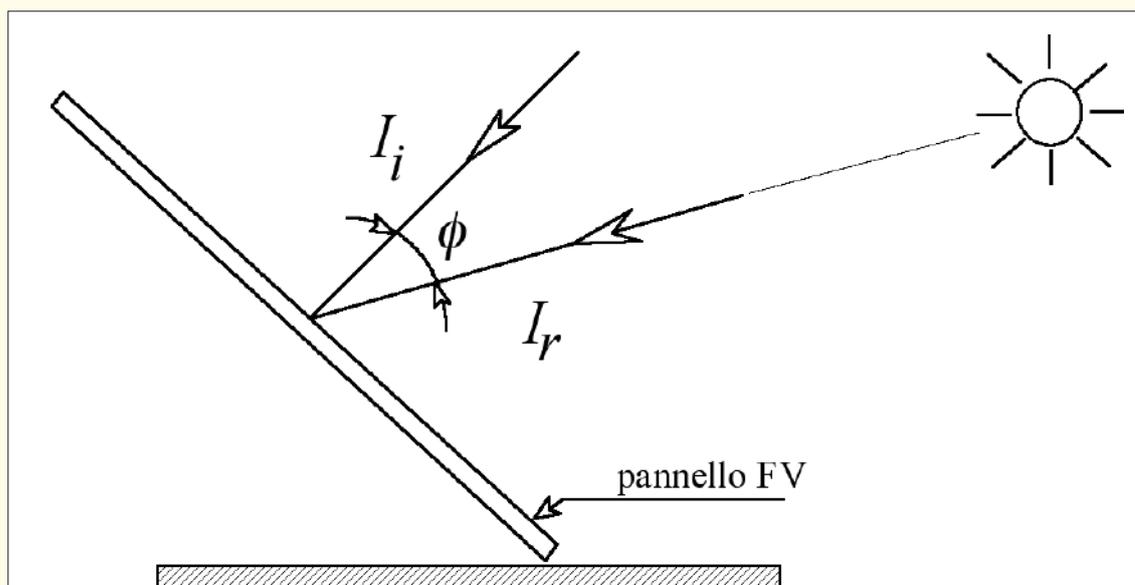
## In breve

I processi di antropizzazione connessi allo sviluppo del settore energia hanno determinato delle "impronte" sul nostro pianeta ormai indelebili. Non resta che provare a ridurre i consumi energetici e affidare la produzione dell'energia ad un mix equilibrato di fonti. In questo contesto, con particolare riferimento alla produzione dell'energia elettrica, lo sfruttamento della risorsa solare ha assunto un ruolo di primo ordine. Gran parte delle attività di ricerca e sviluppo del settore si è concentrata sulle tecniche e sulle metodologie innovative di conversione della fonte in energia elettrica. Accanto a queste, a parità di tecnologia di conversione adottata, altre attività di ricerca e sviluppo sono state indirizzate alla ottimizzazione della produzione di energia elettrica mediante "concentrazione" della radiazione solare nel punto di collocazione del dispositivo di conversione ovvero mediante opportuna variazione dell'orientamento del dispositivo rispetto alla direzione della radiazione stessa. Tali attività di ricerca e sviluppo, intraprese dalla comunità scientifica e dal mondo imprenditoriale, certamente favoriranno un migliore sfruttamento della fonte solare e avranno ricadute in tempi diversi. Questo articolo concentra la sua attenzione su gli inseguitori solari, dispositivi di semplice applicazione basati su tecnologie consolidate, la cui diffusa applicazione potrebbe portare, in breve termine, ad un rilevante incremento di producibilità degli impianti fotovoltaici. In particolare, dopo una disamina delle caratteristiche degli inseguitori solari vengono presentati alcuni dati sull'incremento della producibilità degli impianti e alcune considerazioni di ordine tecnico ed economico circa la corretta valutazione della convenienza economica dell'uso di tali dispositivi, che sta alla base dell'effettivo sviluppo del relativo mercato.

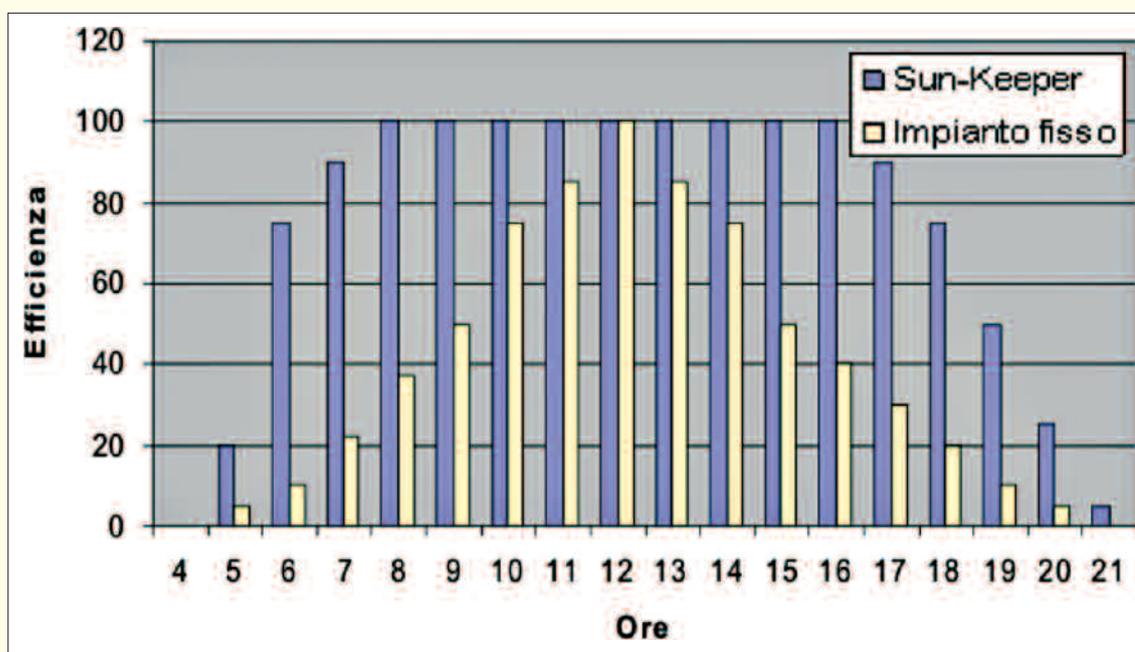
## 1. Generalità

Al succedersi delle stagioni e nel corso della giornata, la direzione con cui i raggi solari raggiungono la superficie di un pannello fotovoltaico fisso è variabile. Conseguentemente, pure variabile, risulta l'energia specifica  $I_i$  incidente su un pannello fotovoltaico fisso, data dal prodotto dell'energia specifica irradiata  $I_r$  per il coseno dell'angolo  $\phi$  che la normale alla superficie del pannello forma con la direzione di irraggiamento (fig.1). Il valore massimo può essere raggiunto solo in quell'istante della giornata in cui la direzione di irraggiamento è ortogonale alla superficie del pannello ( $\phi=0$ ). In tutti gli altri momenti della giornata, l'energia specifica incidente risulterà sempre inferiore alla energia specifica irradiata, cioè risulterà sempre  $I_i < I_r$ . Gli "inseguitori solari" sono dispositivi in grado di orientare opportunamente un gruppo di moduli fotovoltaici in modo che il loro piano risulti, in un qualunque istante della giornata, sempre ortogonale alla direzione di massimo irraggiamento solare. Ciò consente di massimizzare l'energia specifica incidente  $I_i$  che risulterà così sempre eguale alla energia specifica irradiata  $I_r$ .

Tale condizione ottimale consente di rendere massima l'energia prodotta da un impianto fotovoltaico poiché, come è ovvio, l'energia prodotta da una cella fotovoltaica aumenta con l'energia incidente. A



▲ Fig.1 – Energia specifica incidente ed energia specifica irraggiata con pannello avente generica giacitura.



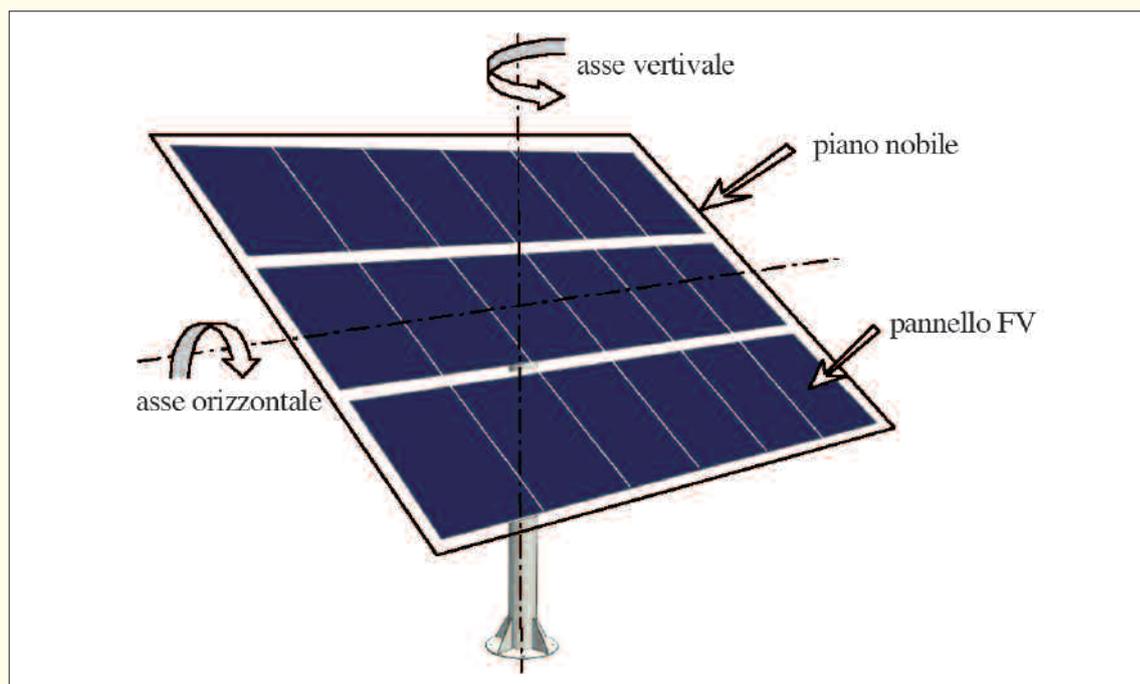
▲ Fig.2 – Andamento tipico della potenza di un impianto con inseguitore e di un impianto fisso (dal rif.[1])

titolo di esempio la fig. 2 (tratta da [1]), mostra un confronto durante la giornata tra la efficienza, definita dal rapporto tra la potenza istantanea e la potenza massima, di un pannello fotovoltaico fisso (orientato a Sud) e quella dello stesso pannello montato su un inseguitore solare biassiale [1].

Si vede come l'inseguitore consenta di aumentare significativamente la potenza istantanea (e quindi l'energia prodotta) praticamente in tutto l'arco della giornata. Nel caso illustrato in fig. 2, riferendosi all'uso di un inseguitore biassiale in una tipica giornata d'estate in un sito dell'Italia meridionale (Prov. di Palermo), l'incremento di produzione è di circa il 40%. Un inseguitore solare movimentato in genere non un singolo modulo fotovoltaico bensì un pannello, composto da più moduli, disposti secondo una matrice rettangolare e fissati in un apposito piano mobile (piano porta-pannello), che negli

inseguitori commerciali ha solitamente superficie complessiva compresa tra 3 e 60 mq (vedi fig.3).

In assenza di significativi ostacoli o di particolari condizioni di rifrazione dovute ad un cielo nuvoloso, la direzione di massimo irraggiamento coincide con la congiungente il centro del pannello con il sole (fig. 1). Poiché alla generica latitudine il sole descrive sulla volta celeste una curva gobba, la direzione di massimo irraggiamento descrive durante la giornata una superficie conica complessa. Conseguentemente, per un corretto inseguimento (piano del pannello sempre ortogonale alla direzione di massimo irraggiamento) il piano mobile dell'inseguitore deve essere dotato di un moto sferico, realizzabile attraverso due assi di rotazione ortogonali (vedi per esempio fig. 3). Inseguitori solari di questo tipo sono detti "biassiali" anche per distinguerli da una seconda tipologia di inseguitori,



▲ Fig.3 – Disposizione tipica dei moduli fotovoltaici sul piano porta pannello di un inseguitore solare.

dotata di un solo asse di rotazione, e detti per questo “monoassiali”. Evidentemente, indipendentemente dalla giacitura dell’unico asse di rotazione che può essere orizzontale, verticale o inclinato, gli inseguitori “monoassiali” realizzano sempre un “inseguimento” approssimato in quanto la normale al pannello coincide con la direzione pannello-sole solo in un istante della giornata. Ciò limita l’incremento di produzione ottenibile da tali inseguitori rispetto alla condizione di inseguimento esatto realizzabile soltanto dagli inseguitori biassiali. In particolare, in accordo con risultati riportati nella letteratura specializzata [2-4], rispetto ad un sistema fotovoltaico fisso con pannelli correttamente orientati a Sud con inclinazione tale da massimizzare l’energia prodotta durante la giornata, l’incremento di produzione ottenibile dall’uso di un inseguitore monoassiale varia tra l’8% ed il 16% in funzione dell’orientamento dell’asse e di eventuali limitazioni del campo di rotazione. Per contro, gli inseguitori biassiali consentono, per via del corretto inseguimento, incrementi di produzione che possono variare dal 28% [1] al 40% [2], con valori medi che nel centro-sud d’Italia si attestano effettivamente intorno al 40% [1,4]. Di fatto, tale risultato sperimentale [1] è in parte dovuto all’inseguimento (35%) ed in parte (5%) dovuto agli effetti benefici, in termini di minore temperatura di esercizio, causati dalla buona ventilazione dei pannelli montati sull’inseguitore (cioè a 2-6 m di altezza da suolo). Il montaggio a terra dei pannelli, così come avviene nei sistemi fissi, dà luogo infatti a temperature di esercizio più alte per via del riscaldamento estivo del suolo con corrispondente decremento significativo della potenza elettrica delle celle caratterizzate mediamente da coefficienti di temperatura di  $0.5\%/^{\circ}\text{C}$ . Nonostante gli inseguitori assicurino una maggiore produttività, nel passato essi sono stati

poco utilizzati in quanto in regime di incentivazione in “Conto Capitale” il parametro di valutazione primario di un impianto era il costo di investimento (superiore per impianti con inseguitore) e non la produttività dell’impianto stesso. Nell’attuale regime di incentivazione in “Conto Energia”, essendo la produttività il parametro primario di valutazione di un moderno impianto si comincia a valutare appieno il vantaggio economico dell’inseguitore, anche grazie alla presenza sul mercato di nuovi prodotti caratterizzati da maggiore affidabilità e bassi costi di manutenzione.

## 2. Tipologie costruttive

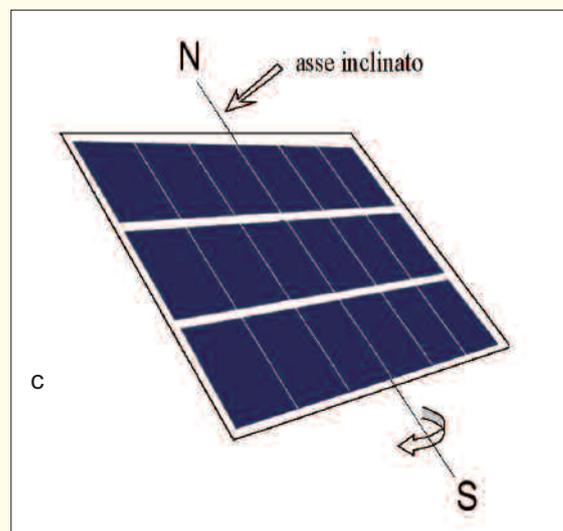
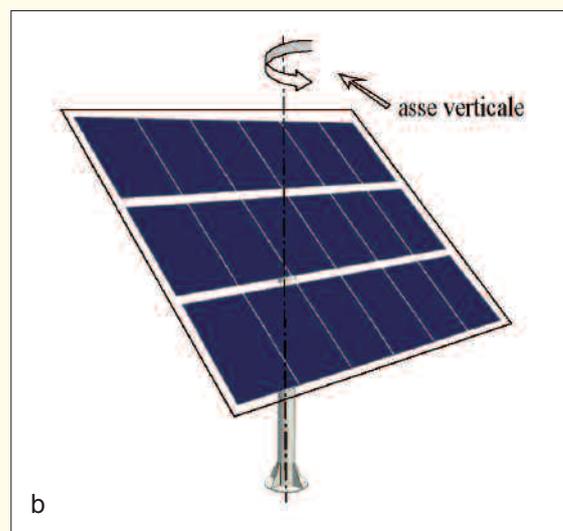
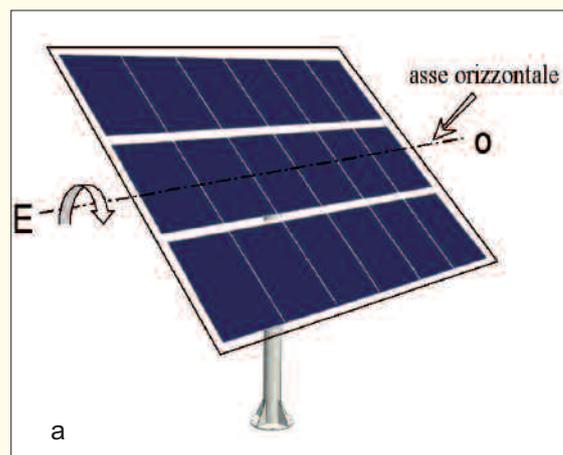
Sino ad oggi sono state costruite diverse tipologie di inseguitori solari che, in sintesi, possono essere classificate in funzione di:

- 1) numero di assi di rotazione;
- 2) configurazione strutturale;
- 3) sistemi di alimentazione e meccanismi di movimentazione;
- 4) sistema di controllo.

### 2.1 Numero di assi di rotazione

Come accennato nella sezione precedente, in base al numero di assi di rotazione gli inseguitori solari possono essere a due assi (biassiali, fig. 3) o ad un asse (monoassiali, fig. 4). In particolare, gli inseguitori monoassiali possono avere asse orizzontale, verticale o inclinato. In dettaglio, l’asse orizzontale è generalmente orientato in direzione Est-Ovest [5] e dà luogo ad un inseguitore cosiddetto di tilt (fig.4a), caratterizzato da incrementi di produttività relativamente modesti (8-10% al massimo). Se l’asse è verticale (fig.4b) si ha, invece, il cosiddetto inseguitore di azimut [6] caratterizzato da incrementi di produzione più significativi (intorno al 16-18%). L’asse inclinato (fig.4c) è solitamente orien-

tato nella direzione Nord-Sud e sovente l'angolo di inclinazione (tilt) viene variato manualmente con cadenza stagionale [3,7]; con questo inseguitore monoassiale si ottengono incrementi di produzione intorno al 16% circa [3]. Gli inseguitori biassiali, invece, sono caratterizzati da un asse di rotazione verticale (movimento azimutale del piano mobile) ed un asse di rotazione orizzontale (movimento di tilt), entrambi dotati di proprio meccanismo indipendente di movimentazione. Esistono, comunque,



▲ Fig.4 – Configurazioni tipiche di inseguitori monoassiali: (a) di tilt, (b) di azimut e (c) ad asse inclinato.

in commercio inseguitori monoassiali impropriamente detti biassiali in quanto, pur essendo dotati di un secondo asse, non dispongono di un secondo meccanismo di movimentazione automatica e quindi non realizzano il corretto inseguimento. Si tratta di costruzioni piuttosto artigianali in cui la movimentazione attorno all'asse orizzontale avviene con intervento manuale stagionale o periodico [6].

## 2.2 Configurazione strutturale

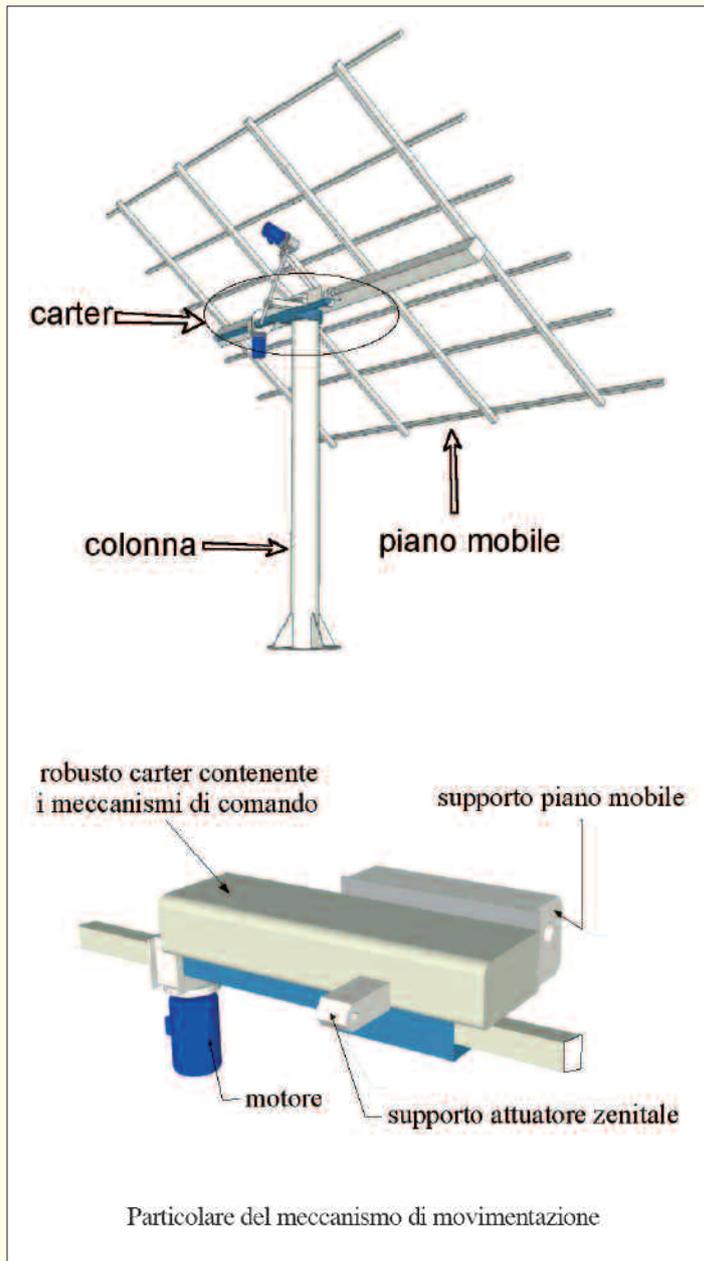
Con riferimento alla configurazione strutturale, gli inseguitori solari possono, in pratica, suddividersi in inseguitori “a colonna” [1] ed inseguitori a “rotaia circolare” [6]. Nei primi, una colonna metallica sorregge in testa il meccanismo di movimentazione del piano mobile porta pannelli, vedi per esempio fig. 5, tratta da [1].

Negli inseguitori a “rotaia circolare”, invece, il piano porta pannelli si appoggia su una struttura a traliccio dotata di 3 o più ruote che scorrono su una rotaia circolare fissata su apposita struttura a traliccio (per maggiori dettagli si veda rif. [6]). I sistemi a colonna sono usualmente quelli caratterizzati da maggiore qualità ed affidabilità in quanto i motori elettrici, gli assi, i cuscinetti e soprattutto il meccanismo di comando azimutale, sono opportunamente alloggiati e protetti all'interno di un robusto carter interposto tra colonna e piano porta pannelli; essi, inoltre, per via della loro conformazione risultano avere un minor impatto ambientale ed hanno il vantaggio di lasciare disponibile per altri usi (agricolo con colture basso fusto - vedi fig.6, parcheggio, ecc.) gran parte del suolo occupato dall'impianto. Quelli a “rotaia circolare” sono, invece, caratterizzati sovente da sistemi di comando a fune metallica con ruota-rotaia a cielo aperto, esposta a facile degrado ambientale con conseguenti significativi costi di manutenzione.

## 2.3 Sistemi di alimentazione e meccanismi di movimentazione

Per quanto concerne il sistema di alimentazione, gli inseguitori possono essere elettrici, oleodinamici e pneumatici. In genere nelle realizzazioni comuni è utilizzata l'alimentazione elettrica con motori di piccola potenza (50-380 W) mentre per taglie relativamente grandi (60-100 mq) può essere usata l'alimentazione oleodinamica che però risulta relativamente costosa. In taluni casi, per inseguitori di piccola taglia, l'alimentazione elettrica è prelevata direttamente da un piccolissimo pannello fotovoltaico aggiuntivo (oppure dallo stesso sensore di luce) abbinato a condensatori elettrolitici; questa tecnica risulta, però, assai poco affidabile (uso sconsigliato). Esistono, infine, alcune realizzazioni, poco usate nella pratica, facenti uso di alimentazione pneumatica associata ad un controllo pure pneumatico basato sull'uso di speciali gas [5].

In funzione del tipo di meccanismo di movimentazione, gli inseguitori possono essere così suddivisi: ad attuatore lineare elettromeccanico [8], rotativo



▲ Fig.5 – Esempio tipico della struttura di inseguitore solare biassiale a colonna (dal rif.[1]).

elettromeccanico [10-12] o a fune-puleggia [7], lineare oleodinamico [10] e lineare pneumatico [5]. Sono stati, altresì, messi in commercio recentemente inseguitori con meccanismi di movimentazione appositamente studiati al fine di superare gli inconvenienti degli attuatori tradizionali [1].

Gli attuatori lineari elettromeccanici, costituiti da martinetti a vite di comando e riduttori a vite senza fine, sono ancora quelli più utilizzati nella produzione industriale, grazie alla loro semplicità ed economia. Il loro uso per il movimento azimutale dà luogo però a diversi inconvenienti quali limitata escursione angolare (sempre inferiore a  $180^\circ$ ) e limitate capacità di sforzo. Per limitare i costi sono usati infatti attuatori sottodimensionati rispetto alle sollecitazioni che possono verificarsi in presenza di vento, cosicché in tali condizioni è necessario che il sistema sia munito di un dispositivo di protezione che provveda tempestivamente ad interdire l'inse-

guimento con disposizione orizzontale del piano porta pannello [9,10]. Evidentemente, a causa del sottodimensionamento strutturale e delle modeste capacità di sforzo del sistema di movimentazione, tale intervento deve verificarsi in modo preventivo già in presenza di basse velocità del vento: ciò è motivo di non trascurabili perdite di produzione specie in climi ventosi come quelli della Italia meridionale e soprattutto delle isole (Sicilia, Sardegna ecc.) caratterizzati dalla presenza di vento non necessariamente associato a condizioni atmosferiche di cielo coperto.

Questi inconvenienti sono in gran parte superati dagli attuatori elettromeccanici rotativi dotati di poderosi riduttori a vite senza fine [11]. Si tratta, comunque, di soluzioni molto costose (costo maggiore di 2.500-3.000 €/kWp) la cui applicazione può compromettere, come evidenziato più avanti, la convenienza economica dell'inseguitore stesso. Gli attuatori a riduttori epicicloidali [9,10] sono, infine, caratterizzati da elevati giochi di trasmissione e bassa coppia motrice con conseguente scarsa accuratezza di puntamento e impossibilità di funzionamento in presenza di vento. In tali sistemi con "gioco", infatti, il vento produce pericolose oscillazioni che avvengono con frequenze non molto distanti da quelle proprie (qualche Hertz); ne derivano così significativi fenomeni di fatica che riducono drasticamente la durata del sistema. L'errore di puntamento (disallineamento tra la normale al pannello e la direzione di massimo irraggiamento) è di circa  $5^\circ$  per dispositivo nuovo e tende a crescere progressivamente nel tempo a causa di inevitabile crescita dei giochi di accoppiamento (usura).

Gli attuatori a fune-puleggia [7] sono, per ovvi motivi, (non univoco posizionamento relativo fune puleggia) caratterizzati anche essi da puntamento grossolano e soprattutto danno luogo a sistemi di comando complessi che coinvolgono contemporaneamente più inseguitori; per questi motivi tali sistemi possono essere usati solo per impianti di piccola potenza disposti su tetti piani e simili.

Indipendentemente dalle soluzioni costruttive adottate, grazie anche ai consumi di energia elettrica molto bassi (sempre inferiori al 1% della produzione) gli attuatori più convenienti e per questo più diffusi sono senza dubbio quelli elettromeccanici. Esistono comunque attuatori oleodinamici e pneumatici riservati a particolari applicazioni. Per ragioni economiche l'uso dei primi è limitato a costosi inseguitori di grandi dimensioni (superficie maggiore di 60-70 mq, vedi per esempio [11]), mentre i secondi sono usati solo in associazione a particolari sistemi di controllo a gas [5]. Gli elevati costi dell'attuatore e dei relativi sistemi di alimentazione limitano, di fatto, la pratica applicazione industriale di tali meccanismi.

Al fine di superare gli inconvenienti tipici dei sistemi ad attuatore elettromeccanico lineare (limitate capacità di sforzo e quindi fuori servizio in presenza di vento) e rotativo (elevati costi) nonché di quelli a



▲ Fig. 6 – Impianto fotovoltaico con inseguitori biassiali coesistenti con colture a basso fusto (viti) - vedi rif.[1].

riduttori epicicloidali (elevati giochi e quindi puntamento incerto e scarsissima resistenza al vento) e a fune-puleggia (scarsa precisione di puntamento, dimensioni limitate), meccanismi compositi per la movimentazione azimutale di inseguitori solari sono stati appositamente studiati [1] e brevettati (per maggiori informazioni si rimanda al relativo produttore [1]). In associazione con una robusta struttura dell'inseguitore, tali meccanismi consentono un inseguimento piuttosto accurato (errori di allineamento inferiori a  $0.1^\circ$ ) e la possibilità di funzionamento anche in presenza di forte vento (capacità di sforzo elevate, sino a 1500 kgm nella realizzazione proposta in [1]). L'accuratezza di puntamento rende tali dispositivi adatti anche all'uso di sistemi di concentrazione solare (specchi, lenti ecc.).

#### 2.4 Sistema di controllo

Con riferimento al sistema di controllo della condizione di irraggiamento solare gli inseguitori si possono suddividere in sistemi provvisti di sensore di irraggiamento e sistemi privi di tale sensore (sensorless).

Nei primi il sensore è montato sul piano porta-pannello ed è provvisto di tre celle sensibili disposte sulle 3 facce di un tetraedro. Ogni qualvolta, al variare delle condizioni di irraggiamento, i tre segnali di intensità luminosa, percepiti dalle tre celle sensibili, avranno valore diverso il sensore comanderà all'attuatore dell'inseguitore di modificare la posizione del piano porta pannello fino a raggiungere la condizione di uguaglianza. I secondi, detti sensorless, basano il loro funzionamento su dati astronomici memorizzati in un'apposita memoria interna [14]. In pratica il controllo della posizione del piano porta pannello è attuato a catena chiusa confrontando il posizionamento ideale (estrpolato da un particolare algoritmo in funzione dei dati astronomici memorizzati) con la posizione rilevata da trasduttori.

Seppure i sistemi del primo tipo possono sembrare maggiormente efficaci la loro affidabilità è forte-

mente dipendente da quella dei sensori. Questi, soggetti alle condizioni atmosferiche, possono sporcarsi e fornire errati riferimenti. Inoltre, in presenza di una elevata componente di illuminazione diffusa (cielo nuvoloso), i 3 segnali risultano pressoché coincidenti per qualunque posizione del piano mobile. Per questi inconvenienti, oggi, sono di gran lunga preferiti i sistemi sensorless [1,9] per i quali è possibile calibrare l'inseguimento anche in ragione delle coordinate geografiche del sito di installazione dell'inseguitore. A titolo di esempio la fig.7 mostra la schermata principale del software di gestione e controllo di un inseguitore commerciale [1]; si vede come il sistema consente all'utente (a) di calibrare in modo interattivo l'inseguitore in funzione delle coordinate geografiche che possono essere determinate automaticamente con semplice "clic" sulla carta d'Italia, (b) di impostare i parametri dell'inseguimento (steps, accuratezza ecc) e (c) di monitorare lo stato del generico inseguitore.

Più in dettaglio, i sistemi sensorless possono essere a controllo distribuito o centralizzato.

I primi implementano in un'unica centrale, installata a bordo dell'inseguitore stesso, tutte le funzioni di controllo: l'algoritmo per la determinazione della direzione di massimo irraggiamento, i parametri di calcolo e le poche logiche funzionali per il comando locale dell'inseguitore. In questi la procedura di calibrazione e personalizzazione (inserimento parametri operativi, ecc.) da eseguire in fase di prima installazione risulta piuttosto laboriosa; pure relativamente complesso risulta il processo di gestione/comando durante il normale esercizio, specie se si tratta di campi fotovoltaici con numerosi inseguitori.

I sistemi a controllo centralizzato sono gestiti da un'unità centrale, in pratica un personal computer, e da unità periferiche installate a bordo inseguitore [1]. All'unità centrale è demandato il calcolo delle coordinate angolari del sole mentre le unità periferiche realizzano il controllo del loop di posizione. Il confronto della "richiesta di posizionamento", pro-



▲ Fig. 7 – Tipica schermata del software di gestione e controllo dell'inseguimento solare con sistema sensorless e controllo centralizzato (dal rif.[1]).

veniente dall'unità centrale, con la reale posizione del piano porta pannelli, ottenuta attraverso la lettura degli encoders, determina l'attivazione dei servomotori fino a recuperarne l'errore. Il software dell'unità centrale realizza anche l'interfaccia operatore. I vantaggi di questi sistemi sono rappresentati (a) dalla possibilità di impartire comandi da remoto e in modo centralizzato sugli inseguitori di un intero campo fotovoltaico e (b) dalla semplicità di settaggio dei parametri di calcolo e di esercizio attraverso pagine video interattive.

### 3. Durata e spese di manutenzione

Per valutare la durata ed i costi di manutenzione di un inseguitore occorre considerare ciascuna delle tre parti principali di cui esso è costituito e cioè: struttura di sostegno, meccanica di movimentazione e sistema di comando e controllo.

La struttura di un inseguitore è generalmente realizzata in acciaio zincato a caldo. Tenuto conto che in funzione dell'ambiente in cui l'inseguitore è installato il degrado dello zinco [15] può variare da 1  $\mu\text{m}/\text{anno}$  fino a 8  $\mu\text{m}/\text{anno}$  (ambienti industriali molto umidi e/o con elevato tasso di umidità), uno spessore minimo della zincatura di 200-300  $\mu\text{m}$  assicura nelle peggiori condizioni una resistenza agli agenti atmosferici con una durata sempre superiore a 25 anni. La manutenzione richiesta da una siffatta struttura zincata, se correttamente progettata tenuto conto delle sollecitazioni di fatica random prodotte dal vento [16], si limita al semplice controllo visivo e all'eventuale ripristino del serraggio dei bulloni, da effettuarsi solitamente con cadenza annuale [1].

Per quanto concerne la meccanica di movimentazione, l'uso di meccanismi composti appositamente progettati [1], caratterizzati da robustezza meccanica e assenza di giochi, garantisce una durata superiore a 30 anni (sistema progettato a vita infinita). La manutenzione di questi componenti è, pertanto, limitata ad un semplice ingrassaggio periodico delle parti rotanti o striscianti con cadenza annuale.

Per i meccanismi normalmente utilizzati dagli inseguitori commerciali [7-10], facenti uso di riduttori epicicloidali e/o martinetti elettromeccanici, poiché essi per ragioni economiche risultano sottodimensionati rispetto alle sollecitazioni generate dal vento, la frequenza di guasto ed i costi di manutenzione possono risultare relativamente elevati specie per impianti situati in ambienti ventosi. Al fine di prevenire il fuori servizio ed eventuali danni alle apparecchiature, è necessario pertanto un controllo manutentivo periodico finalizzato al rilevamento di anomali valori del gioco azimutale (riduttori epicicloidali) e zenitale (martinetti). Anche in presenza di tali controlli, la riparazione dei riduttori epicicloidali risulta operazione relativamente costosa in quanto necessita del completo smontaggio del piano porta pannello con conseguente interruzione della produzione elettrica.

Per quanto concerne i sistemi di comando e controllo si rileva come quelli basati su sensori di intensità luminosa risultano poco affidabili a causa dell'inevitabile sporco dei sensori. Per limitare tale inconveniente sono necessari frequenti interventi manuali di pulizia con significativo aumento dei costi di manutenzione. I sistemi sensorless non presentano tale inconveniente cosicché possono definirsi anche sistemi "senza manutenzione". Per

entrambi i sistemi la componente elettrica (motori ecc) ed elettronica risulta in genere molto affidabile con MTBF (tempo medio tra due guasti) superiore a 10 anni.

Si può affermare, pertanto, che un inseguitore dotato di una robusta struttura zincata a caldo con idoneo spessore minimo di zincatura, di un robusto meccanismo di movimentazione composito senza giochi [1], e di un sistema di comando e controllo *sensorless*, assicura una elevata affidabilità dell'impianto con costi manutentivi complessivi per ispezione periodica annuale paragonabili a quello di un analogo impianto fisso (circa 0.50-0.75% del costo di impianto). A titolo di esempio per un impianto di potenza  $P=100$  kWp il cui costo di impianto si aggira intorno ai 600-700 k€, il costo di manutenzione dei soli inseguitori solari si aggira intorno ai 6-7 €/kWp (circa 0.1 %), mentre il costo di manutenzione complessivo medio annuo si aggira intorno ai 3.500 € (0.5% circa). L'uso invece di inseguitori con comuni meccanismi di movimentazione e sistemi di controllo a sensori di intensità luminosa da luogo a più elevati costi di manutenzione (pulizia sensori, manutenzione e/o sostituzione riduttori, componenti ecc) con costi di manutenzione che possono essere ragionevolmente stimati intorno al 1.0 % del costo di impianto nei primi anni di vita (6-7 k€ per un impianto da 10 kWp), per crescere sino al 1.5-2.0% dopo i primi anni.

#### 4. Costi e convenienza economica

Il costo di un inseguitore può subire significative variazioni in funzione della tipologia considerata, delle condizioni di installazione (a terra, su tetto ecc.), dei dispositivi di ancoraggio usati (plinto, piastra ecc) e della ditta produttrice. Sul costo totale dell'inseguitore, l'installazione ha in genere una incidenza stimata intorno al 10-12% circa mentre il dispositivo di ancoraggio può incidere dal 10% (plinto) al 20% circa (piastra in c.a. prefabbricata). L'analisi dei prezzi praticati dai maggiori produttori europei [1,7,9,10] ed americani [8], scartando i prodotti di nicchia idonei per la sperimentazione e non per il mercato (vedi per es.[5]), mostra che un inseguitore monoassiale commerciale installato ha un costo complessivo specifico  $C_i$  variabile tra circa 700 e 1.000 €/kWp. Un inseguitore biassiale commerciale installato ha un costo complessivo specifico  $C_i$  variabile tra 800 e 4.000 €/kWp. Un semplice confronto tra costi specifici e relativo incremento di produzione consentito, mostra subito come gli inseguitori biassiali sono generalmente più convenienti di quelli monoassiali.

Una semplice valutazione della convenienza economica di un inseguitore, indipendente dai parametri di produttività dell'impianto quali tariffa incentivante, posizione geografica del sito di installazione ecc., può essere fatta considerando che per un impianto di potenza unitaria l'uso dell'inseguitore equivale ad un incremento di potenza fissa installa-

ta pari a  $\Delta$ , essendo  $\Delta$  l'incremento di producibilità specifico garantito dall'inseguitore stesso. L'uso di un inseguitore solare risulta in pratica economicamente vantaggioso se il costo complessivo specifico  $C_i$  dell'inseguitore risulta inferiore al costo dell'impianto fisso di potenza moltiplicato l'incremento  $\Delta$ , cioè se risulta:

$$C_i < c_f \cdot \Delta \quad (1)$$

$$c_{ins} = \frac{c_f + c_i \Delta}{1 + \Delta} \quad (2)$$

con una riduzione percentuale  $R_{\%}$  del costo specifico rispetto ad un tradizionale sistema fisso, pari a:

$$R_{\%} = 100 \frac{c_{ins} - c_f}{c_f} = 100 \frac{(c_i - c_f) \Delta}{(1 + \Delta) c_f} \quad (3)$$

Per esempio, per un costo specifico dell'impianto fisso  $c_f = 6000$  €/kWp (valore realistico), un inseguitore biassiale sensor-less montato su piastra in c.a. (vedi per esempio fig.8) con meccanismo di movimentazione composito [1] e controllo centralizzato avente un costo specifico complessivo  $C_i = 900$  €/kWp ed un incremento di producibilità  $\Delta=40\%$ , risulta certamente vantaggioso in quanto soddisfa ampiamente la (1); si ha infatti:

$$C_i < c_f \cdot \Delta \quad \Rightarrow \quad 900 < 6000 \cdot 40\%$$

$$\Rightarrow \quad 900 \text{ /kWp} < 2400 \text{ /kWp}$$

L'uso di questo inseguitore da luogo ad un costo specifico pari a:

$$c_{ins} = \frac{6000 + 900 \cdot 0.4}{1.4} \approx 4500 \text{ €/kWp}$$

con una riduzione percentuale del costo rispetto ad un sistema fisso pari a:

$$R_{\%} = 100 \frac{(4500 - 6000)}{6000} = -25\%$$

Per un impianto di 1 MW l'uso di tale inseguitore consente di ottenere una potenza equivalente di 1.4 MW con una riduzione di costo del 25 %. Per un costo specifico di 6000 €/kWp esso da pertanto luogo rispetto ad un impianto fisso ad un risparmio di circa 2.1 M€.

L'uso invece di un costoso inseguitore con attuatore rotativo con costo complessivo specifico  $C_i=3000$  €/kWp (relativamente elevato) ed incremento di producibilità  $\Delta=40\%$  non risulta economicamente conveniente non essendo verificata la (1);

si ha infatti in questo caso:

$$C_i > c_f \cdot \Delta \Rightarrow 3000 > 6000 \cdot 40\%$$

$$\Rightarrow 3000 \text{ €/kWp} > 2400 \text{ €/kWp}$$

Lo stesso dicasi per un inseguitore monoassiale con costo complessivo specifico  $C_i=1000 \text{ €/kWp}$  (relativamente elevato) ed incremento di producibilità  $\Delta=16\%$ ; esso non risulta affatto conveniente non essendo verificata la (1); si ha infatti in questo caso:

$$C_i > c_f \cdot \Delta \Rightarrow 1000 > 6000 \cdot 16\%$$

$$\Rightarrow 1000 > 960$$

Ovviamente tale valutazione è accurata per affidabili inseguitori solari caratterizzati da costi di manutenzione paragonabili a quelli dell'impianto fisso (struttura robusta appositamente progettata, meccanismo composito di movimentazione e sistema di comando sensor-less), mentre è certamente sovrastimata per inseguitori commerciali (strutture artigianali, meccanismi sottodimensionati e sistema di comando a sensori di intensità luminosa) caratterizzati da più elevati costi di manutenzione.

### 5. Conclusioni

Una diffusa applicazione degli inseguitori solari, dispositivi di semplice applicazione basati su tecnologie consolidate potrebbe portare, in breve termine, ad un rilevante incremento di producibilità degli impianti fotovoltaici. Le analisi economiche condotte consentono di affermare che nel caso di applicazione di inseguitori biassiali gli incrementi di producibilità degli impianti possono compensare ampiamente l'aumento dell'investimento iniziale. È pur vero che tali dispositivi risultano di difficile integrazione architettonica e più propri per un'applicazione su impianti a terra.

In considerazione, poi, che la realizzazione di impianti fotovoltaici di media e grossa taglia a terra ha un notevole impatto visivo, la possibilità di incrementare la producibilità degli impianti, a parità di aree occupate, dovrebbe essere un elemento di rilevante interesse per il legislatore.

Gli autori auspicano, pertanto, che la dimostrata convenienza economica insieme alle giustificate istanze di salvaguardia del territorio che in questo

ultimo periodo hanno interessato anche gli impianti di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, stimolino il legislatore ad incentivare l'uso degli inseguitori che, riducendo di circa il 35-40% l'impatto visivo a parità di producibilità, diventano a parere di chi scrive di irrinunciabile adozione nelle future installazioni fotovoltaiche a terra.

### Bibliografia

- [1] SABER-TECHNOLOGY, "Inseguitore biassiale innovativo Sun-Keeper", Palermo 2006, documento tecnico pubblicato on-line sul sito web [www.sun-keeper.it](http://www.sun-keeper.it).
- [2] Santini D., *Captazione, stoccaggio e distribuzione di energia da fonte solare: studio e sperimentazione di un semplice sistema ad inseguimento*, Tesi di laurea, relatore Prof. P. Piccarolo.
- [3] Poulek V., Libra M., *New Bifacial Solar Trackers and Tracking Concentrators*, Solar Energy Materials & Solar Cells, 51 (1998), 113-120.
- [4] Graditi G., Vivoli P., *Gli impianti fotovoltaici: tecnologia, dimensionamento e aspetti economici*, ENEA, 2006.
- [5] Isotest Engineering SRL, "Sistema di inseguimento solare passivo per pannelli fotovoltaici", pubblicato on-line sul sito web [www.isotest.it](http://www.isotest.it).
- [6] Pacinotti M., Chiaramente D., *Cenni sul solare a concentrazione*, Università di Firenze, Dipartimento di Energetica "S. Stecco", Firenze 2006.
- [7] Elettropiemme, *SincroSunSystem*, documento descrittivo pubblicato on-line sul sito web [www.elettropiemme.it](http://www.elettropiemme.it).
- [8] WATT-SUN, *Watt-Sun Solar Trachers: Technical Data*, documento tecnico pubblicato on-line sul sito web [www.watt-sun.com](http://www.watt-sun.com).
- [9] Ecoware, *Elianto 1923*, documento tecnico pubblicato on-line sul sito web [www.eco-ware.it](http://www.eco-ware.it).
- [10] DEGER, *Technical Data Sheet Deger TopTracker*, documento tecnico pubblicato on-line sul sito web [www.energyenv.co.uk](http://www.energyenv.co.uk).
- [11] Braux, *Seguidores Solares Braux*, documento tecnico pubblicato on-line sul sito web [www.braux.es](http://www.braux.es).
- [12] Pevafersa, *Caratteristica Tecnicas Seguidor SIP 10*, documento tecnico pubblicato on-line sul sito web [www.pevafersa.com](http://www.pevafersa.com).
- [13] Sbroglia G., "Idraulico o elettromeccanico: considerazioni tecniche ed economiche", EVOLUTION vol.4, 2006.
- [14] Meeus J., *Astronomical Algorithms*, Willmann-Bell, Inv. Richmond, Virginia (USA), 1991.
- [15] Shigley J.E., Mischke C.R., *Mechanical Engineering Design*, McGraw-Hill, Singapore, 2001.
- [16] Harris C.M., *Shock and Vibration HandBook*, McGraw-Hill, New York (NY), 2003.



▲ Fig. 8 – Impianto fotovoltaico con convenienti inseguitori biassiali sensorless su piastra in c.a. - vedi rif.[1].