

POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

Corso di Laurea in
Ingegneria Energetica



**Analisi sperimentale di un sistema microcogenerativo
Dish Stirling**

Relatore: Prof. Giampaolo Manzolini

Tesi di Laurea di:

Nicola Langone Matr:818664

Anno Accademico 2014-2015

RINGRAZIAMENTI

Vorrei ringraziare innanzitutto il Prof. Giampaolo Manzolini per il supporto costante fornitomi e le linee guida ricevute, nonostante la mia istanza all'estero per le ricerche e la stesura della mia tesi.

Inoltre ringrazio Il Prof. Antoni Sudria Andreu e Josep Andreu Vidal Clos per avermi aperto le porte del loro dipartimento.

Infine ringrazio la mia famiglia senza il cui sostegno non sarei mai giunto al conseguimento del mio titolo, ed i miei amici e colleghi, indispensabili compagni di questo lungo viaggio.

INDICE

RINGRAZIAMENTI	3
INDICE	4
INDICE DELLE FIGURE	6
ABSTRACT	8
1 INTRODUZIONE	9
2 STATO DELL'ARTE	11
2.1 PANORAMICA DELLE TECNOLOGIE RINNOVABILI SOLARI	11
2.2 OFFERTA COMMERCIALE	16
2.3.1 Confronto con le tecnologie concorrenti	17
2.3.2 Osservazione sul trend di diffusione delle FER	18
2.3 TECNOLOGIA DISH STIRLING SYSTEM	18
2.3.1 Motore Stirling e ciclo di lavoro ideale e reale	19
2.3.2 Collettore parabolico	26
2.3.3 Ricevitore	30
2.3.4 Generatore	31
2.3.5 Sistema di raffreddamento	32
3 CASO DI STUDIO	35
3.1 INSTALLAZIONE IN ESAME	35
3.2 TRINUM E I SUOI SISTEMI ASSOCIATI	36
3.2.1 Solar field: Collettore Parabolico	39
3.2.2 Solar field: Solar Tracking	41
3.2.3 Supporto e Area di sicurezza	42
3.2.4 Il blocco di potenza	44
3.2.5 Sistema idraulico	45

<i>Analisi sperimentale di un sistema microcogenerativo Dish Stirling</i>	
3.2.6 Sistema di controllo	49
3.2.6 Sistema di monitoraggio	50
3.2.7 Sensori.....	51
3.3 DATI OUTPUT DEL DISH STIRLING SYSTEM	52
4 METODOLOGIA E ANALISI	54
4.1 INPUT.....	54
4.1.1 DATI SPERIMENTALI	54
4.1.2 DATI METERELOGICI	56
4.1.3 PREVISIONI SU BASE STATISTICA	57
4.2 CALCOLO DELLA TRAIETTORIA SOLARE.....	61
4.3 CALCOLO DELLA RADIAZIONE DIRETTA.....	64
4.4 STUDIO DELLE SOGLIE DI ATTIVAZIONE	67
Studio delle perdite convettive.....	70
4.5 VALUTAZIONE DELLE PERFORMACE	73
4.6 PRESENTAZIONE DELL'ALTERNATIVA TRADIZIONALE.....	75
4.7 PREVISIONE DELLE PRODUZIONI ANNUALI.....	79
4.8 ANALISI DI REDDITIVITA'	82
CONCLUSIONI	87
BIBLIOGRAFIA	89
APPENDICI	94
appendice 1 installazioni dss.....	94
appendice 2 schede tecniche.....	96

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1 Impianto CSP central tower di Almeria [7]	13
Fig. 2 concentratori cilindro parabolici [7]	14
Fig. 3 concentratori Fresnel [7]	14
Fig. 4 Disco Stirling installato presso la ETSEIB	15
Fig. 5 Dish Stirling serie DISTAL installati presso la PSA [18].....	17
Fig. 6 Ciclo Stirling ideale	19
Fig. 7 Motore Stirling a configurazione Alfa	23
Fig. 8 Motore Stirling a configurazione Beta	23
Fig. 9 Motore Stirling a configurazione Gamma.....	24
Fig. 10 Motore cinematico [28]	25
Fig. 11 Motore FPSE [27]	25
Fig. 12 Collettori parabolici composti da un ensemble di elementi [5]	27
Fig. 13 Tipologie di paraboloide [5]	27
Fig. 14 DSS a membrana polimerica	29
Fig. 15 DSS in Space frame.....	29
Fig. 16 Ricevitore a cavità interna [35]	31
Fig. 17 Tipologia DSS a dissipazione d'energia termica residuale.....	32
Fig. 18 Tipologia DSS cogenerativo.....	33
Fig. 19 Tipologie di Solar Tank	34
Fig. 20 Vasca di espansione	34
Fig. 21 Schema riassuntivo installazione DSS in esame	36
Fig. 22 Diagramma di Sankey proposto da InnovaSolar.....	37
Fig. 23 Schema componenti inclusi nel pack di Innova	39
Fig. 24 Esploso del collettore parabolico.....	40
Fig. 25 Range angolo di elevazione.....	41
Fig. 26 Range angolo di Azimut	42
Fig. 27 Pianta Security Area.....	43
Fig. 28 Schema del sistema di ancoraggio.....	44
Fig. 29 FPSE progettato per Trinum.....	45

Analisi sperimentale di un sistema microcogenerativo Dish Stirling

Fig. 30 Schema sistema idraulico	46
Fig. 31 Schema sistema di monitoraggio	51
Fig. 32 Piranometro della stazione meteo di zona universitaria	56
Fig. 33 Interfaccia PVGIS Monthly Radiation	59
Fig. 34 Andamento del rapporto D/G nei mesi dell'anno	59
Fig. 35 Andamento dell'angolo di incidenza ottimale I_{opt} nell'anno.....	60
Fig. 36 Traiettoria solare prevista da PVGIS <i>Daily Radiation</i> per la giornata modello di Gennaio, confrontata con il solstizio di Gennaio e di Dicembre ...	61
Fig. 37 confronto tra i dati sperimentali di grado di elevazione prevista ed imposta.....	62
Fig. 38 Confronto tra i dati sperimentali di angolo di azimut previsto e imposto con l'andamento della temperature di riceviore.....	63
Fig. 39 Prospetto degli effetti della defocalizzazione automatica	64
Fig. 40 Output del modello di calcolo della DNI: opzione a rapporto D/G costante.....	66
Fig. 41 Output del modello di calcolo della DNI: opzione a componente diffusa costante.....	66
Fig. 42 Andamento del rapporto D/G nei mesi dell'anno secondo <i>Monthly Radiation</i>	67
Fig. 43 andamento della radiazione diffusa secondo <i>Daily Radiation</i>	67
Fig. 44 Output sperimentale temperature d'attivazione.....	68
Fig. 45 Prospetto soglie d'attivazione osservate	69
Fig. 46 Prospetto soglie d'attivazione al netto delle perdite convettive	73
Fig. 47 Prospetto tempo di attivazione al netto delle perdite convettive	73
Fig. 48 Regressione lineare per il rendimento elettrico	74
Fig. 49 Regressione lineare per il rendimento termico	74
Fig. 50 Collettore solare termico Sonnenkraft SKR500.....	76
Fig. 51 Schema geometrico per il calcolo dell'angolo di incidenza θ	78
Fig. 52 Array di pannelli fotovoltaici SunPower X21-335	79
Fig. 53 Prospetto di produzione elettrica annuale attesa	81
Fig. 54 Prospetto di produzione termica annuale attesa	81
Fig. 55 Produzione annuale attesa per le differenti tecnologie	82
Fig. 56 Net PresentValue delle due tecnologie a confronto (VU 15 anni).....	84
Fig. 57 Net Present Value delle due tecnologie a confronto (VU 25 anni).....	85

ABSTRACT

Una sempre più eminente necessità di approvvigionamento energetico sostenibile ha indotto la comunità europea a commissionare campagne sperimentali su tecnologie di generazione decentralizzata da fonte rinnovabile. L'ETSEIB di Barcellona ha installato un microgeneratore Dish Stirling (1kWe e 3 kWth) con lo scopo di valutarne le performance e intavolare una proiezione sulle produzioni attendibili. Nonostante l'utilizzo dei soli misuratori di sicurezza preinstallati dalla produttrice *InnovaSolar* (non potendo manomettere il *DSS* per clausole di contratto), i risultati ottenuti sembrano, nei limiti delle incertezze, confermare le performance dichiarate. Un'analisi economica in comparazione con un sistema tradizionale fotovoltaico con collettore solare, afferma l'attuale non redditività dell'investimento richiedendo, come tutte le tecnologie innovative, incentivi per lo sviluppo di un indotto industriale massivo che ne abbatta i costi iniziali, unica vera problematica del *DSS*.

The increasing need for sustainable energy supply induced the EU to fund data campaign about renewable decentralized generation technologies.

The ETSEIB of Barcelona set a *Dish Stirling System* (1kWe and 3kWth) on his rooftop in order to test performance and expected productions.

Even if only security measurement were available (because of contract term with the *DSS* provider *InnovaSolar*), results seem to confirm the declared performance, through the measurement uncertainty. Economic analysis compared with traditional microgenerative solution (Photovoltaic + Solar collector) states the not proficiency of the investment, as all the innovative renewable solutions, needing some kind of state incentives to support the industrial diffusion to large scale production, in order to reduce the initial cost, the only real problem relate to *DSS* nowadays.

1 INTRODUZIONE

La tecnologia ***Dish Stirling System (DSS)*** mostra gran potenziale per il futuro qualora dovessero ridursi i costi di produzione ad oggi proibitivi, permettendole di competere con tecnologie solari già affermate sul mercato energetico. Pertanto la comunità europea ha ritenuto opportuno includere il *DSS* tra le soluzioni tecnologiche innovative da sottoporre a campagna dati sperimentale nell'ambito del progetto DIDSOLIT-PB (Development & Implementation of Decentralised Solar Energy-Related Innovative Technologies for Public Buildings in the Mediterranean Basin Countries), nell'ambito di un programma di cooperazione transmediterranea ai fini di promozione di uno sviluppo sostenibile, tale ENPI–CBCMED (European neighbourhood and Partnership Instrument – CrossBoarder Cooperation in the Mediterrean).

L'obiettivo dell'elaborato è giungere ad un'analisi della redditività e sostenibilità economica dell'investimento a confronto con le soluzioni concorrenti tradizionali. A tal scopo ci si avvale dei dati forniti dal sistema *DSS* installato su finanziamento della commissione europea presso la facoltà di ingegneria industriale dell'*Universitat Politecnica de Catalunya* (detta ETSEIB), valutandone le performance sulla base delle condizioni ambientali registrate dagli istituti metereologici locali.

Il lavoro presenterà due componenti principali. La prima di carattere bibliografico documentativo, riportando stato dell'arte delle tecnologie solari di piccola taglia, leggi di funzionamento del *DSS* e dei suoi componenti, progetto

Analisi sperimentale di un sistema microcogenerativo Dish Stirling

di ingegneria associato al dettaglio delle misure di sicurezza e protocolli dettati dalle normative vigenti, terminando con una panoramica degli altri parametri di interesse. La seconda avrà un focus decisamente più pratico operativo, riportando i dettagli delle apparecchiature sotto esame, letture di potenze e rendimenti e dati metereologici di misura diretta o indiretta; terminando con una analisi di praticabilità economica.

2 STATO DELL'ARTE

2.1 PANORAMICA DELLE TECNOLOGIE RINNOVABILI SOLARI

Di seguito si riporta una rassegna delle differenti famiglie di soluzioni energetiche solari, entrando nello specifico della classe delle solari a concentrazione, **Concentrated Solar Power (CSP)** alla quale appartiene il *DSS*.

COLLETTORI SOLARI PIANI

Assorbono la radiazione solare trasferendo l'energia al fluido di lavoro in circolo nel collettore [6]. Intrappolano l'energia utilizzando materiali selettivi con differente riflettività alle differenti lunghezze d'onda, così da permettere l'ingresso della radiazione ma limitandone l'uscita, in quanto la superficie dona alla radiazione riflessa un'altra lunghezza d'onda esterna allo spettro di ammissione dello schermo selettivo ottenendo così un effetto serra all'interno del collettore [7]. Non focalizzando radiazione diretta, utilizzano anche la radiazione diffusa disponendo, quindi, di una maggiore capacità di captazione termica rispetto alle tecnologie concorrenti, ma presentano anche le maggiori perdite, pertanto non sono solite operare a temperature superiori agli 80°C per efficienze superiori al 25% [6].

TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA

Basata sulla conversione diretta di energia solare in elettrica per effetto fotoelettrico mediante l'uso di semiconduttori [7]. Una cellula in silicio è capace di sfruttare approssimativamente il 65% dello spettro della radiazione solare ricevuta [7], includendo la non diretta.

TECNOLOGIA SOLARE CHIMICA

La più immatura delle tecnologie solari. Basata su reazioni chimiche promosse dalla radiazione solare al fine di immagazzinare prodotti di formazione/scissione di legami chimici, come nelle celle a combustibile solari per la scissione di idrogeno e ossigeno dell'acqua d'alimento [9].

TECNOLOGIA DI CONCENTRAZIONE SOLARE CSP

Vi appartiene il *DSS*, consiste nel concentrare la radiazione solare diretta su una superficie contenuta. Tale focalizzazione viene impiegata per scaldare un fluido termovettore, il quale apporta potenza termica al ciclo termodinamico tramite uno scambiatore di calore, o opera direttamente come fluido di lavoro. Infine, sarà compito del ciclo convertire energia termica in meccanica, e successivamente elettrica [10][11][12][7]. Possono essere suddivise in quattro categorie in funzione della potenza elettrica nominale espressa: grande taglia per impianti superiori a 1MWe, taglia media se compresi tra 0.5 e 1MWe e piccola taglia gli inferiori ai 500kWe, di cui fanno parte i sistemi di microgenerazione inferiori ai 20kWe [11]; un'altra possibile catalogazione delle CSP dipende dalla focalizzazione che può essere puntuale, con temperature massime teoriche superiori ai 1000°C, o lineare, fino a 550°C [11].

Le più comuni soluzioni a concentrazione solare sono:

TORRE SOLARE O CENTRAL RECEIVER

Una disposizione di eliostati (specchi ad elevata riflettività dotati di sistemi di inseguimento a due assi) concentrano la radiazione solare in un ricettore situato in cima ad una torre centrale, dove viene trasferita ad un termovettore che alimenterà il ciclo di potenza. Si opta per lo più per termovettori ai sali fusi che, per la loro capacità termica, permettono l'ottimizzazione dei componenti e lo stoccaggio dell'energia, così da poter produrre elettricità

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

indipendentemente dalla disponibilità istantanea della fonte [7]. La conversione termoelettrica è affidata ad un ciclo Rankine a vapore [7]. Nonostante le proiezioni di performance teoriche di questa soluzione siano le più promettenti (date le elevatissime temperature raggiungibili), ad oggi solo un impianto, il *Solar One*, ha raggiunto gli obiettivi di produzione e redditività assegnati, gli altri hanno sofferto problemi di rendimenti inferiori alle attese [7].



Fig. 1 Impianto CSP central tower di Almeria [7]

CONCENTRATORI CILINDRO-PARABOLICI

I concentratori più utilizzati su scala mondiale [6]; la superficie riflettente è una parabola bidimensionale estrusa in modo tale da fornire un fuoco lineare, nel quale si collocano tubi ricettori di calore, che trasportano il fluido di lavoro del ciclo termodinamico o un termovettore intermedio e, in tal caso, anche qui, è possibile interporre un sistema d'accumulo di energia termica. Il collettore in questione può essere fisso o mobile fino a due assi di regolazione per l'inseguimento solare. La conversione termoelettrica è affidata ad un ciclo Rankine a vapore o a fluidi organici [7]. Questa tecnologia si presta anche a soluzioni di tipo cogenerativo. Tipicamente operano fino a temperature di circa 450°C. Spesso si adopera olio diatermico come fluido termovettore. Disponendo di un fuoco lineare, il valore di concentrazione media massima è un quarto del massimo teorico producibili con fuoco puntuale [10][11][12][7].



Fig. 2 concentratori cilindro parabolici [7]

CONCENTRATORI FRESNEL

Il principio è focalizzare la radiazione solare esattamente come farebbe un cilindro-parabolico, ma adoperando una disposizione di lenti, dette lenti *Fresnel*, associabili a prismi retti sezione regolare con fuoco lineare comune, riducendo drasticamente il peso dell'ensemble [7]. Solitamente sono dotate di sistema di inseguimento a due assi. Le installazioni più diffuse adoperano acqua come fluido di lavoro, senza termovettore intermedio [10][11][12].



Fig. 3 concentratori Fresnel [7]

DISH STIRLING SYSTEM DSS

Trattasi di un disco parabolico generato dalla rivoluzione della parabola bidimensionale attorno ad un asse centrale, sul quale giace il fuoco puntuale,

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

permettendo rapporti di concentrazione molto maggiori; è nel fuoco che viene collocato il motore-generatore Stirling. I dettagli su materiali, componenti e funzionamento del sistema sono riportati nelle sezioni successive. L'ottima capacità di concentrazione e il sistema di inseguimento biassiale, conferiscono al *DSS* valori di temperatura di fuoco caldo teoriche elevatissime (si potrebbero sfiorare i 4900K). Si preferisce non adoperare termovettori per semplicità costruttiva e eliminarne la voce di perdita termica annessa.



Fig. 4 Disco Stirling installato presso la ETSEIB

Nel seguente prospetto [tavola 1] si confrontano le efficienze dei diversi sistemi di inseguimento (si assume come efficienza unitaria quella della superficie di captazione fissa), sulla base di prove sperimentali.

TIPO	ORIENTAZIONE	EFFICIENZA ANNUALE RELATIVA
1 asse	Asse orizzontale N-S	1.17
	asse orizzontale E-O	1.13
	asse polare	1.4
2 assi	Inseguimento continuo	1.45

Tab1 Prospetto delle efficienze dei sistemi di inseguimento

2.2 OFFERTA COMMERCIALE

La generazione di energia elettrica da fonte rinnovabile mediante l'uso di tecnologia *DSS* presenta attualmente difficoltà ad introdursi nel mercato, dovute innanzitutto alla forte concorrenza di altre soluzioni energetiche, specialmente la fotovoltaica. Ne sono un chiaro esempio la chiusura di imprese come la *Stirling Energy System* o la *Infinia*, quest'ultima acquisita da parte della *Qnergy*, o il precedente insuccesso della *Tessera Solar* nel completare i suoi progetti *Calico Solar Project* e *Imperial Valley*, acquisita da una cordata di imprese operanti nel fotovoltaico, sebbene va precisato che tali progetti furono ostacolati da tematiche quali le controversie circa il terreno da occupare o difficoltà di finanziamento [13].

Senza dubbio l'interesse per questa tecnologia non è morto, come si può osservare dai progetti condotti della svedese *Cleanenergy* a Dubai, dove sta allestendo un intero parco *DSS* come progetto pilota per verificarne la fattibilità [14]. In scala più modesta, si è anche studiato un suo utilizzo in zone rurali dell'India dove la connessione con la rete nazionale dovesse risultare troppo onerosa, con risultati decisamente positivi [15]. In Spagna, sei dischi Stirling da 10 kWe cada uno, di tecnologia a membrana tesa, presso la PSA (Plataforma Solar Almeria, centro pubblico di R&D tecnologico spagnolo, il più grande e completo a livello mondiale in quanto a sistemi termosolari a concentrazione [16]) hanno accumulato 4000 ore di funzionamento e sono gli unici che a livello mondiale abbiano superato le prove di durabilità [7]. Nonostante ciò le apparecchiature vennero rimpiazzate con nuovi esemplari con calchi e materiali compositi [17]. Dalle figure si può apprezzare il chiaro sviluppo in disegno progettuale.

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

DISTAL I (1992) offriva 40kWt, 9kWe e una concentrazione solare di 12000, *DISTAL II (1996)* da 50kWt, 10kWe e 16000 di concentrazione solare [17] e, infine, *EURODISH (1999)* da 9 kWe, capaci di raggiungere i 650°C [18].



Fig. 5 Dish Stirling serie DISTAL installati presso la PSA [18]

Nell'appendice 1 si riporta una tabella sintetica delle installazioni *DSS* in corso nel mondo

2.3.1 CONFRONTO CON LE TECNOLOGIE CONCORRENTI

Il *DSS* offre il maggiore potenziale di efficienza nominale di conversione di energia solare in elettrica sul mercato, fino a un 32%, confrontato con il 15% o 16% di altre soluzioni termiche come le centrali CSP a torre centrale o i concentratori solari parabolici lineari, anche se le aspettative più realistiche prevedono un rendimento non superiore al 25% [35]. Altro indubbio vantaggio sui grandi impianti è la modularità del sistema, che permette sia di dimensionare a seconda del carico da soddisfare sia di accrescerne l'affidabilità in quanto un malfunzionamento di un modulo riduce ma non interrompe la produzione.

L'unica alternativa che ne condivide questa preziosa caratteristica è il fotovoltaico, sua concorrente naturale al giorno d'oggi, sulla quale presenta ancora alcuni vantaggi; primo tra tutti la scarsa sensibilità del Dish Stirling alle alte temperature (chiave di volta per progetti come quelli di Dubai) e l'inseguimento solare (meno usato sui pannelli fotovoltaici, mentre praticamente obbligatorio sui *DSS*) che offre una produzione più omogenea.

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

A vantaggio del fotovoltaico c'è senz'altro la conversione diretta solare-elettrica, senza passare da un ciclo termodinamico sottoposto ai limiti del ciclo di Carnot. Inoltre il fotovoltaico lavora anche con radiazione diffusa ed è capace di sfruttare anche le ore di irraggiamento minore, presentando un soglia di radiazione minima molto favorevole[3].

Con i *DSS* spesso si opta per un accumulo di acqua calda (come nel caso in esame), rivendicando un pregio della famiglia di soluzioni solari CSP [19].

Le speranze di diffusione e sviluppo della tecnologia *DSS*, secondo la bibliografia inerente, si basano sulla riduzione dei costi iniziali per mezzo della produzione in larga scala e sviluppo dell'indotto tecnologico necessario [20].

2.3.2 OSSERVAZIONE SUL TREND DI DIFFUSIONE DELLE FER

Dai trend di diffusione delle *FER* nel parco di generazione dei differenti stati interessati, non si osservano dati promettenti, specialmente per fonti di ultima generazione come la solare o l'eolica, che in 20 anni di sovvenzioni hanno raggiunto solo il 3,35% della copertura della domanda negli USA, in particolare il solare copre solo lo 0.16%[21]. Sono molti gli ostacoli che andranno affrontati per una vera diffusione delle *FER*:

- La difficile integrazione in una rete senza sostanziali capacità d'accumulo (problema tipico delle nuove *FER*, come eolico e solare, penalizzate dall'aleatorietà della fonte);
- La conversione della rete stessa da passiva a intelligente per accogliere differenti punti di immissione decentralizzati.

2.3 TECNOLOGIA DISH STIRLING SYSTEM

Ora viene riportata una sintetica rassegna delle tecnologie impiegate e delle leggi fondamentali di funzionamento dei *DSS*

2.3.1 MOTORE STIRLING E CICLO DI LAVORO IDEALE E REALE

Prende il nome dal reverendo Robert Stirling che lo brevettò nel 1817 [22] e all'epoca si basava su un ciclo chiuso monofase ad aria. L'innovazione del Rev. Stirling, che portò al successo del suo motore, fu il riprogettare il sistema dei cicli ad aria (fino ad allora risultato fallimentare) con un rigeneratore che ne riducesse drasticamente le perdite. Il motore Stirling nacque per concorrere con i motori a vapore (allora ancora molto rudimentali e pericolosi) nelle applicazioni di trazione in miniera [22]. Al migliorarsi di quest'ultimi, caddero in disuso se non per sporadiche applicazioni stand-alone (alimentazione pompe isolate dalle reti o di ripetitori radio). Il vero grande ostacolo allo sviluppo di questa tecnologia risiede nelle perdite fluidodinamiche derivanti dalla movimentazione di un fluido comprimibile e nell'impossibilità tecnica di sviluppare una apparecchiatura che realizzi le fasi del ciclo ideale senza ricorrere a inefficienti sovrapposizioni delle stessa, in conseguenza dei cinematismi delle macchine a fluido adoperate. In figura 6 si riporta il diagramma pressione volume descritto dal ciclo Stirling ideale e da un generico ciclo reale.

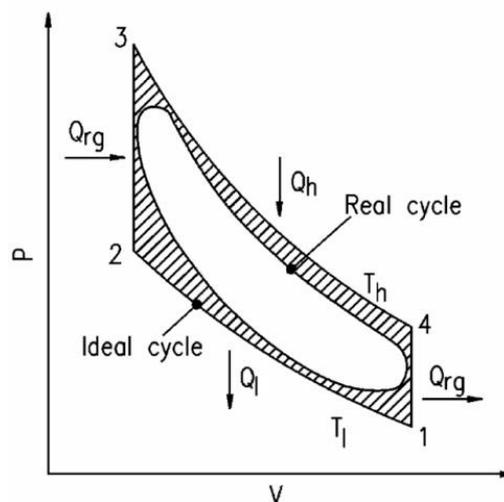


Fig. 6 Ciclo Stirling ideale

Ciclo Stirling ideale si compone di quattro trasformazioni:

Analisi sperimentale di un sistema microcogenerativo Dish Stirling

1-2 Compressione isoterma. Fase solitamente promossa dall'inerzia meccanica del sistema. In caso di motore in avvio, necessita il supporto di un starter esterno

2-3 Riscaldamento isocoro. Il fluido di lavoro presenta inizialmente il volume minimo e scorre, a volume costante, attraverso il rigeneratore, raggiungendo la temperatura di fuoco caldo [23].

3-4 Espansione isoterma. Nel punto 3 si ripresenta la medesima configurazione del punto 2, solo a camere invertite. Il fluido espande a temperatura costante mentre avviene l'adduzione di calore al sistema. Si realizza lavoro di espansione

4-1 Raffreddamento isocoro. Il fluido, ora a volume massimo, scorre verso la camera fredda attraverso il rigeneratore, che ne assorbe l'energia termica residua.

Tale ciclo risulta assolutamente molto promettente in quanto tra tutti i cicli motore termodinamici presenta l'efficienza più prossima al rendimento del ciclo di Carnot, fissate le temperature delle sorgenti. In particolare il teorema di comparazione Stirling afferma che:

“Di tutti i cicli motore termodinamici che lavorino entro i medesimi estremi di temperature e volume, con la stessa massa di gas ideale, [...] il motore Stirling ideale possiede la massima efficienza” [23].

Indi per cui, risulta l'unico ciclo adoperabile per la produzione di energia elettrica da fonti energetiche di scarsa qualità, come nelle soluzioni bottoming alimentati da fumi di scarico industriali, o addirittura residenziali.

Al momento di implementare fisicamente il ciclo Stirling, si riscontrano problemi di tipo tecnico che impediscono una fedele realizzazione dello stesso. In particolare si è affermato che *“Immaginare un ciclo ideale (irrealizzabile*

*Analisi sperimentale di un sistema microcogenerativo Dish Stirling
fisicamente), ha poco a che fare con quanto accade, di fatto, in un ciclo reale,
e questo vale soprattutto nel ciclo Stirling»”.*

*“Il problema analitico del rigeneratore (lo scambiatore di calore centrale nel
ciclo Stirling) è stato giudicato di un livello tra i più complessi che si possano
incontrare in ingegneria ' [24] [25].*

La principale difficoltà tecnica affrontata nella realizzazione di un motore Stirling risiede nelle catene cinematiche legate ai meccanismi delle configurazioni ad oggi disponibili, che impediscono la netta separazione tra le differenti trasformazioni come richiederebbe il ciclo ideale. In particolare si ottiene una sua deformazione più “arrotondata” e inefficiente.

Il professor Israel Urieli, uno dei massimi esperti della modellizzazione numerica del ciclo in questione, afferma che *il ciclo Stirling ideale non è né fisicamente realizzabile, né tantomeno rappresentativo delle sue implementazioni reali”* [26].

Inoltre, trattandosi di una macchina basata sulla rapida oscillazione di un fluido comprimibile, non si dispone di un modello di analisi e previsione delle performance del motore reale, né tantomeno si possono ritenere scalabili i dati ottenuti dall’osservazione di macchine già testate [26].

Ne deriva un grave onere di R&D per ogni soluzione progettata, con conseguenti forti restrizioni di segreto industriale. Per questo non sono disponibili documentazioni dettagliate sulle soluzioni ingegneristiche adoperate per far fronte alle suddette difficoltà insite nel ciclo. Inoltre è frequente che le imprese fornitrici non provvedano il motore di misuratori interni, per il monitoraggio dei parametri di interesse da parte dei loro clienti, ma si limitino a stipulare contratti full service, facendosi carico di ogni manutenzione, come nel caso in esame.

CARATTERISTICHE FONDAMENTALI

Si riportano ora le principali caratteristiche del motore Stirling con vantaggi e svantaggi che ne derivano.

- Ciclo chiuso a combustione esterna.

Trattando sempre lo stesso fluido di lavoro è possibile selezionare accuratamente il più conveniente, a patto di provvedere la macchina delle dovute tenute. Inoltre le componenti interne della macchina non soffrono di sporramento, stress termico e/o meccanico (tipiche dei motori a combustione interna). Infine sarà adoperabile qualunque tipologia di risorsa energetica come fonte di calore.

D'altro canto sono indispensabili superfici di scambio termico sufficientemente estese e pressioni interne adeguate che mettono a dura prova le tenute; ne consegue un aggravio nel costo, nell'ingombro e nel rapporto peso/potenza.

Ne deriva un motore pulito, silenzioso, senza problematiche di vibrazione, con ridotte necessità di manutenzione, promettente in tema di vita utile ma inadatto alla propulsione di veicoli per peso, costo e tempo di risposta (tutte le applicazioni realizzate ad oggi sono di generazione stazionaria).

- Ciclo monofase.

L'assenza di transizioni di fase comporta una semplificazione costruttiva rilevante per il motore; al contempo grazie alle forma del ciclo Stirling, non saranno necessarie differenze di temperatura elevatissime tipiche di altri cicli monofase, come il ciclo Brayton.

- Reversibile

Trattandosi del unico ciclo reversibile monofase disponibile in commercio, si presta molto bene ad applicazioni criogeniche.

Al fianco di soluzioni convenzionali come il *DSS* o l'applicazione CHP domestica alimentata a gas di rete, va riportata anche un'altra tipologia di motore Stirling, come l'unità Stirling di calore di radioisotopi, adoperati dalla

NASA per aumentare l'efficienza di generazione elettrica da fonte nucleare [16] [31].

CLASSIFICAZIONE DEI MOTORI STIRLING

Esistono tre principali classificazioni possibili per i motori Stirling, per la loro configurazione interna, per la connessione meccanica dei componenti e per il fluido di lavoro impiegato.

CONFIGURAZIONE ALFA

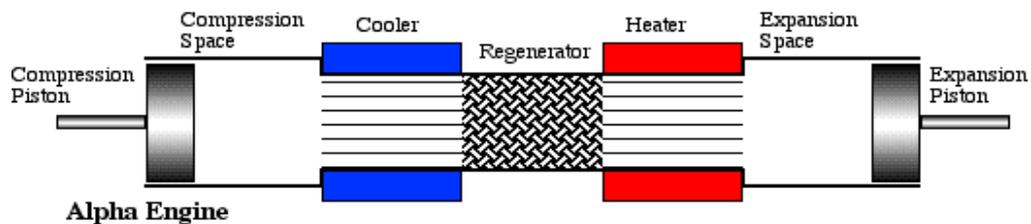


Fig. 7 Motore Stirling a configurazione Alfa

Presenta due pistoni agli estremi dei 2 cilindri che operano da fuoco caldo e freddo connessi tra loro mediante un canale nel quale si colloca il rigeneratore. Trattasi della configurazione più rudimentale con maggiori libertà progettuali, facilità di costruzione e montaggio ma comporta anche il peso maggiore pertanto viene scelta solo questo non sia un fattore decisivo [29]. Presenta problematiche di tenuta del fuoco caldo.

CONFIGURAZIONE BETA

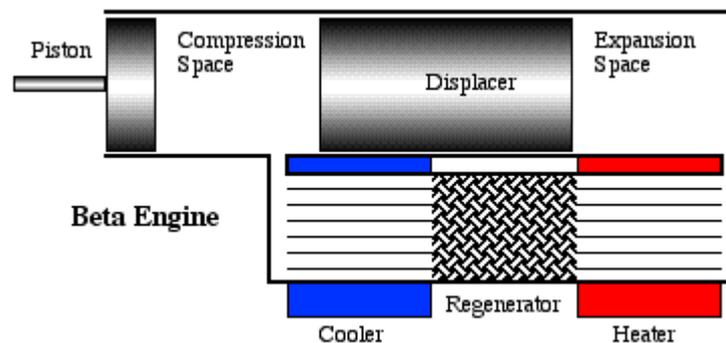


Fig. 8 Motore Stirling a configurazione Beta

Non presenta il pistone nel fuoco caldo, quindi le relative problematiche di tenuta. Le due camere sono separate tramite un displacer che non esercita

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

alcun tipo di lavoro sul fluido, ma resta indispensabile per la sua movimentazione dal fuoco caldo al fuoco freddo.

CONFIGURAZIONE GAMMA

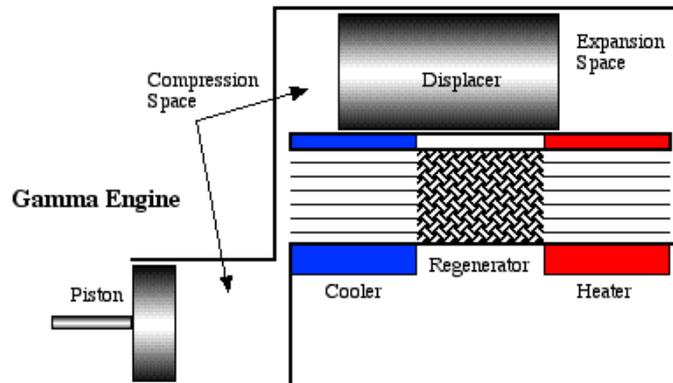


Fig. 9 Motore Stirling a configurazione Gamma

E' una variante del Beta, quindi presenta un solo pistone ed un displacer, con relativi vantaggi dal punto di vista della tenuta. La differenza sta nel avere pistone e displacer in due cilindri diversi, riducendo il rapporto di compressione effettivamente raggiunto a vantaggio di semplicità costruttive e di montaggio [29].

MOTORI STIRLING CINEMATICI

Trattasi della soluzione tradizionale. Il sincronismo dei pistoni o del pistone-displacer viene assicurata da connessioni meccaniche. Presenta un disco inerziale per l'accumulo di energia cinetica da rinviare al sistema nei punti del ciclo che lo richiedano [28]. In figura 10 si riporta uno schema esemplificativo.

MOTORI STIRLING A PISTONE LIBERO FPSE

Ideati da William Beale nell'Università dell'Ohio, negli anni settanta prima di fondare la Sunpower, sono basati sull'accoppiamento diretto di un generatore lineare al pistone/displacer [27] racchiusi in un unico vessel (vedi figura 11), semplificando le tenute del sistema. Il pistone è privo di connessioni meccaniche esterne e oscilla tra il fluido ed un sistema di molle che assicura sincronismo dello stesso e del generatore con la rete [30]. Risulta la soluzione

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

vincente in quanto, grazie alla drastica riduzione di parti mobili e all'assenza di tenute dinamiche non è richiesta lubrificazione [31] con conseguente riduzione di costi di produzione e manutenzione ed una vita utile più lunga dei cinematici [30].

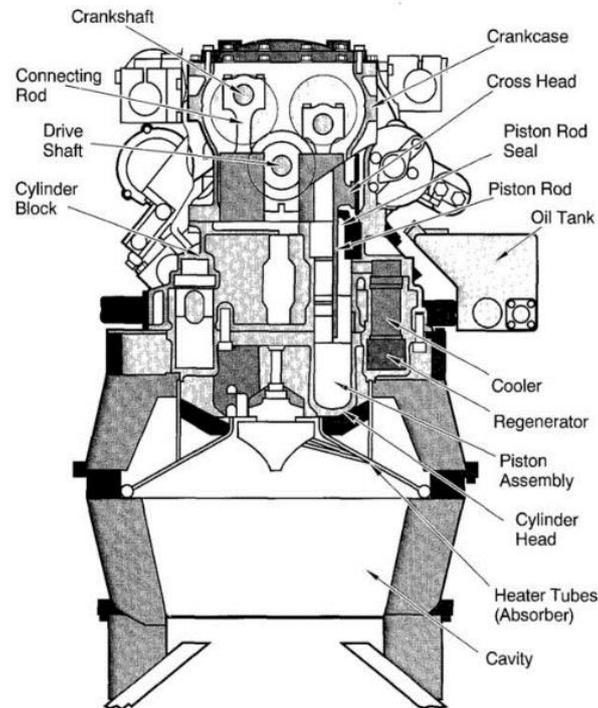


Fig. 10 Motore cinematico [28]

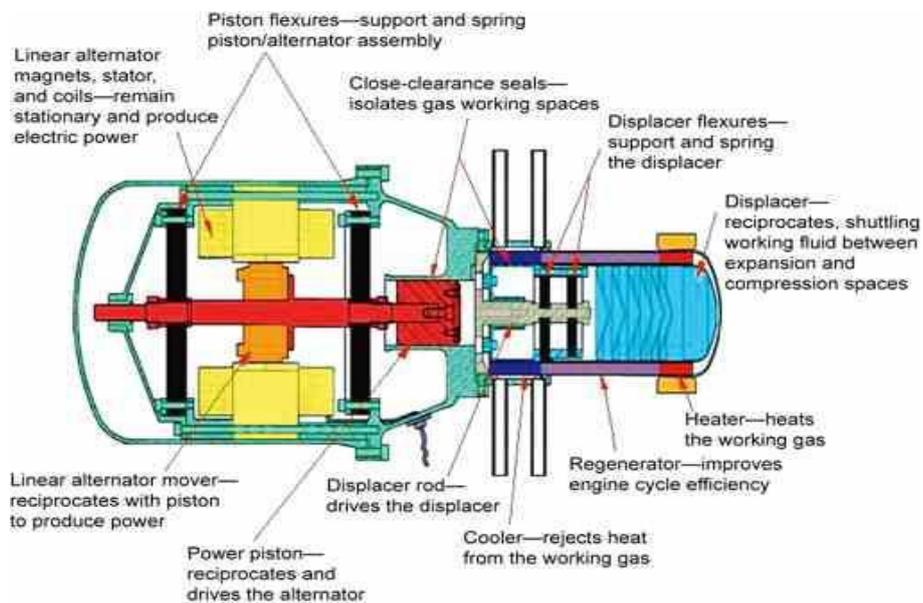


Fig. 11 Motore FPSE [27]

CLASSIFICAZIONE PER FLUIDI DI LAVORO

Il fluido di lavoro incide fortemente sulle performance del sistema e viene scelto secondo i criteri di:

- Capacità termica possibilmente elevata per ridurre l'onere della zona di scambio termico
- Reattività chimica con altri componenti del sistema possibilmente assente per non avere malfunzionamenti o necessità di cambio e manutenzione
- Sicurezza a fronte di qualunque contingency
- Costo ridotto.

L'aria, originariamente impiegata, presenta caratteristiche di scambio termico e viscosità inadeguate (come anche l'azoto molecolare), pertanto un'opzione vagliata è l'idrogeno, irrevocabilmente esclusa per la sua alta reattività esplosiva. I sistemi moderni lavorano con Elio: gas nobile (nessuna reattività chimica) innocuo dalle ottime capacità termiche che comporta solo problematiche di tenuta (comunque contenibili nel caso di FPSE).

2.3.2 COLLETTORE PARABOLICO

La scelta della forma del concentratore risulta fondamentale per qualunque tecnologia CSP. In particolare per un *DSS* la soluzione con parabola è l'unica che conferisce i rapporti di concentrazione *RC* richiesti con costi adeguati, sebbene si tratti di una geometria di difficile realizzazione e spesso venga approssimata con ensemble di elementi di più semplice fabbricazione.

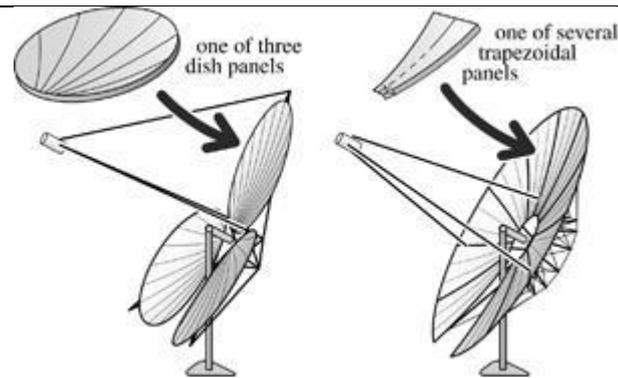


Fig. 12 Collettori parabolici composti da un ensemble di elementi [5]

RC, definita come il rapporto della intensità di radiazione nel fuoco fratto l'intensità sulla superficie del concentratore, valore che coincide con il rapporto tra le aree in assenza di ombre altre interferenze [5], è spesso il criterio di catalogazione più comune per concentratori [6].

E' possibile classificare le paraboliche per concentrazione solare secondo il loro angolo di bordo ϕ , definito come l'angolo tra l'asse di rivoluzione della parabola e la retta passante per il fuoco e un qualunque punto del bordo. Così facendo si definiscono parabole profonde con $\phi > 90^\circ$, o poco profonde altrimenti. Queste ultime necessitano un inseguimento molto preciso ma possono accogliere anche ricettori piani come nel caso della doppia parabolica [5].

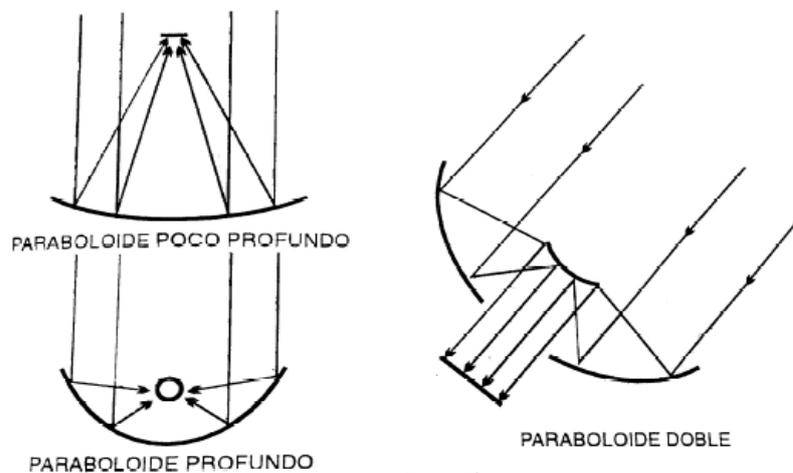


Fig. 13 Tipologie di paraboloide [5]

MATERIALI DELLE PARABOLICHE

I criteri di selezione dei materiali adoperati nelle paraboliche *DSS* sono molto stringenti, dovendo mantenere inalterate le proprietà di riflettività degli specchi (sempre superiore al 90%) e di stabilità strutturale dell'armatura, pur lavorando esposti a condizioni meteorologiche a volte estreme (raffiche di sabbia del deserto, temperature elevate, raffiche di vento). Il tutto richiede un compromesso entro:

- Resistenza e stabilità alle condizioni di servizio.
- Facilità di conformazione.
- Costo di materiali, fabbricazione e installazione.

I materiali variano molto a seconda dei fabbricanti, da combinazioni di vetro e argento a materiali polimerici, sviluppati ad hoc perché non presentino distorsioni dimensionali. Fabbricare una parabola in questi materiali risulta troppo dispendioso, per questo si opta per soluzioni alternative modulari come la costituzione di uno *space frame* di specchi trapezoidali, quadrati o circolari, o in alternativa si tende un tessuto polimerico altamente riflettente su uno scheletro parabolico in metalli duttili [33]. Alcuni esempi di questi materiali sono l'*Alzak*, *Tenzalloy* e il *Kanigen*. I materiali plastici tesi, invece, permettono di ottenere specchi sottili e leggeri in con tecnologie di produzione abbastanza agevoli [33].

Le superfici riflettenti possono essere esterne o interne. Le prime sono direttamente esposte alle intemperie e quindi sono più propense a danni e riduzioni di riflettività nel tempo. Le seconde sono ricoperte da una protezione vitrea che comporta ulteriori perdite ottiche per assorbimento, circa pari al 5-7% del rendimento ottico [33]. Trattasi di riflettenti metallici in argento o alluminio, depositati a vuoto o chimicamente, rivestiti con materiali dielettrici come il fluoruro di magnesio (MgF_2) o monossido di silicio (SiO) [33].

STRUTTURA E SUPPORTO

Il fissaggio del disco al suolo avviene tramite ancoraggio all'edificio, sfruttandone la stabilità strutturale, o, qualora non sia possibile, si optano soluzioni *autoancorate* ovvero dotate di una base di cemento al quale fissare il piedistallo [7]. L'armatura di sostegno degli specchi varia a seconda della soluzione spaziale adoperata:

- Struttura in pannelli riflettenti, ovvero l'armatura opera da specchio. Soluzione quasi mai impiegata in quanto le tensioni strutturali interne comporterebbero deformazioni e, quindi, dispersioni inammissibili di radiazione.
- Membrana polimerica tesa su un supporto parabolico, soluzione economica, leggera e di facile manutenzione; la difficoltà risiede nella produzione di un supporto unico parabolico



Fig. 14 DSS a membrana polimerica



Fig. 15 DSS in Space frame

- Space Frame di elementi riflettenti su una struttura di supporto economica e di facile fabbricazione; soluzione robusta ed efficiente, particolarmente raccomandata per sistemi di alta potenza

2.3.3 RICEVITORE

Il ricevitore è l'elemento del disco Stirling adiacente alla sorgente calda del motore sul quale viene focalizzata la radiazione solare captata, quindi situato nel fuoco della parabola. Il suo scopo è quello di convertire la radiazione in potenza termica in ingresso al ciclo di lavoro. Si dividono in due categorie:

- I ricevitori esterni sono capaci di accogliere la radiazione in maniera più efficiente grazie alla loro forma sferica, ma soffrono di maggiori perdite termiche.

- I ricevitori a cavità interna (figura 16) ricevono meno radiazione ma risultano molto meno esposti all'ambiente pertanto contengono meglio le perdite e sono meno inclini allo sporco per polvere, grazie alle pareti esterne coibentate. Inoltre dispongono di una superficie di ricezione più ampia che permette una migliore omogeneizzazione del flusso, riducendo i problemi di stress termico locale nei materiali. Operano solitamente a temperature TH di circa 600°C [35].

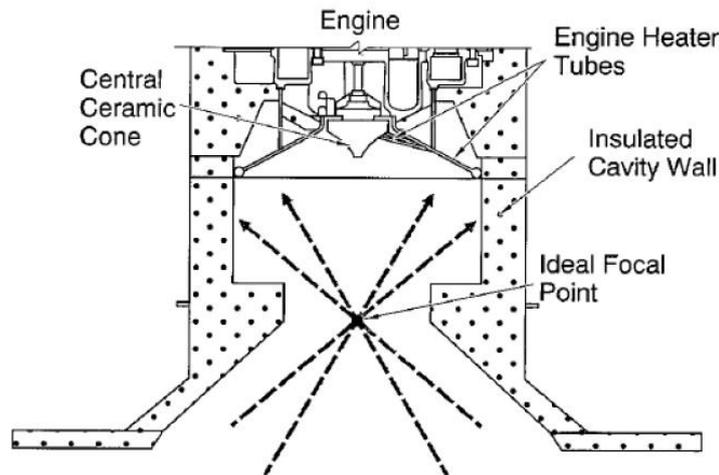


Fig. 16 Ricevitore a cavità interna [35]

Date le temperature in gioco, la selezione del materiale risulta essere critica, essendo il componente più esposto a carichi termici; la scelta più comune è un materiale ceramico che non soffra distorsioni dimensionali o deterioramenti superficiali. L'assorbitore è l'elemento del sistema incaricato di trasferire l'energia termica del ricevitore al fluido di lavoro del motore.

2.3.4 GENERATORE

Componente di conversione della potenza meccanica estratta al ciclo in potenza elettrica. Le opzioni disponibili sono principalmente generatori a corrente diretta, generatori sincroni o asincroni. I primi risultano particolarmente interessanti in presenza di sistemi accumulo dell'energia elettrica tramite batterie elettrochimiche alimentate in DC; Un accumulatore elettrico permetterebbe grossi vantaggi di disconnessione produzione-consumo ma anche costi rilevanti per accumulatori adeguati. I generatori sincroni permettono un perfetto controllo sulla potenza reattiva del sistema, ma spesso risultano troppo costosi e pesanti.

Si può optare per i generatori ad induzione, molto più semplici ed economici, che però non concedono nessun controllo diretto sul fattore di potenza. Sarà

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

quindi necessario disporre di una batteria di condensatori che compensi il consumo di potenza reattiva della macchina e rifasi la corrente a monte del nodo d'immissione.

A differenza della maggior parte dei gruppi di generazione termoelettrica, il motore Stirling del *DSS* esprime potenza meccanica in moto alternativo. Si opta, pertanto, per un generatore lineare per semplificare l'accoppiamento generatore-motore, malgrado gli effetti di bordo e le altre complicazioni peculiari scaturite da questa geometria [35].

2.3.5 SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO

Il sistema di raffreddamento assicura l'estrazione della potenza termica di scarto del ciclo, mantenendo la temperatura della sorgente fredda compatibile con il funzionamento del motore. Consiste in un circuito chiuso di un fluido termovettore, solitamente acqua miscelata con un anticongelante, alimentato da uno scambiatore a tubi (il fluido di lavoro circola nei tubi interni) munito di una elettropompa per vincere le perdite di carico nella linea e di un radiatore esterno aria-acqua assistito da un ventilatore, l'*Air cooler*, assorbe la componente maggiore di energia parassita del sistema. A seconda della funzione del *DSS*, sono disponibili due tipologie progettuali riportate nelle figure 17 e 18: la prima senza utilizzo dell'energia termica residuale, la seconda per sistemi cogenerativi.

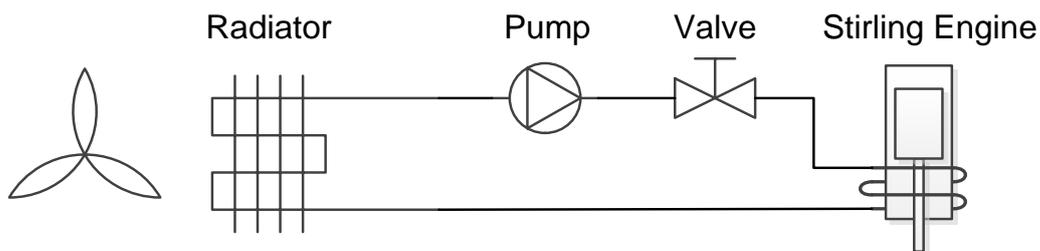


Fig. 17 Tipologia DSS a dissipazione d'energia termica residuale

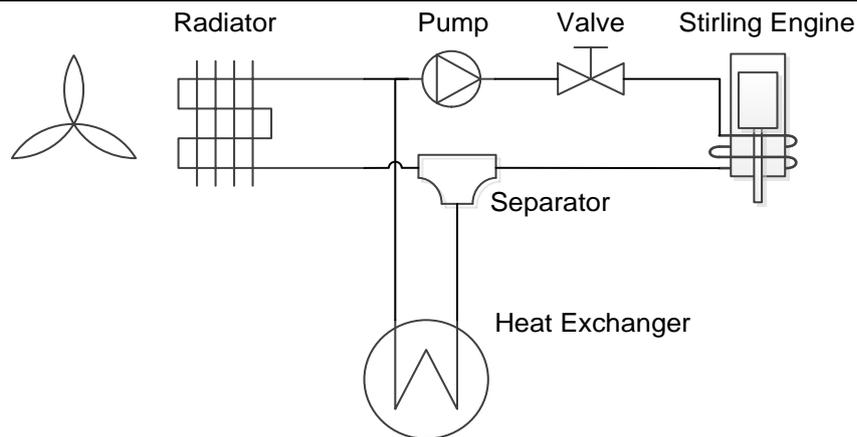


Fig. 18 Tipologia DSS cogenerativo

Nel caso di *DSS* cogenerativo si consegue una importante riduzione del carico elettrico del sistema declassando il radiatore ad elemento ausiliario (e di sicurezza interna), oltre a la valorizzazione del calore di scarto come fonte termica a bassa temperatura. Questo richiede un ulteriore scambiatore liquido-liquido a tubi che spesso funge anche da vessel di accumulo di energia termica.

Il funzionamento delle pompe dipenderà del disegno delle linee di circolazione e dai sui componenti e sarà coordinato da un sistema di controllo centralizzato in funzione delle letture del flussimetro e dei termometri differenziali per la portata e le temperature del fluido termovettore [37].

Lo scambiatore di calore tra circuito primario (estrazione di calore dallo Stirling) e secondario (distribuzione all'utenza termica) è solitamente contenuto nell'accumulatore stesso; esso può avere conformazione a serpentina unica, doppia serpentina o a doppia camera per i due fluidi, come mostrato in figura 19.

Le valvole permettono un perfetto controllo della distribuzione tra i flussi all'accumulatore e al dissipatore ausiliario. Le valvole di purga, presenti sia nel circuito primario sia nel secondario permetteranno l'estrazione di bolle

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

formatesi nel flusso, assicurando un corretto funzionamento del scambiatore di calore [37].

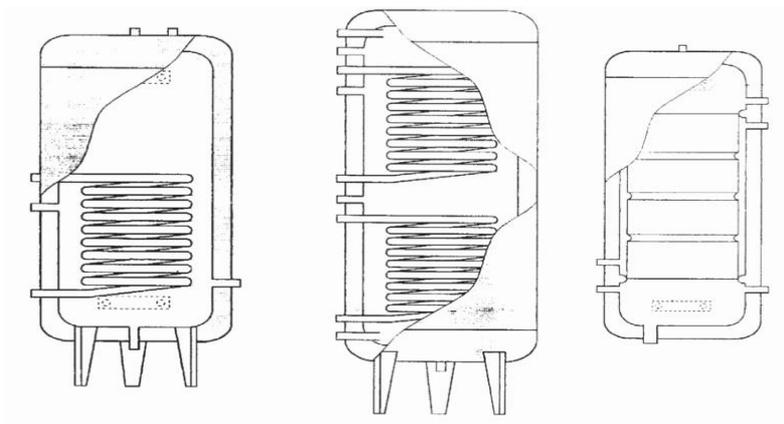


Fig. 19 Tipologie di Solar Tank

Le vasche di espansione (figura 20) si occupano di mantenere la pressione adeguata nei circuiti; presentano una membrana impermeabile mobile che divide la camera di espansione del termovettore da una seconda camera stagna contenente un gas, solitamente azoto [37].

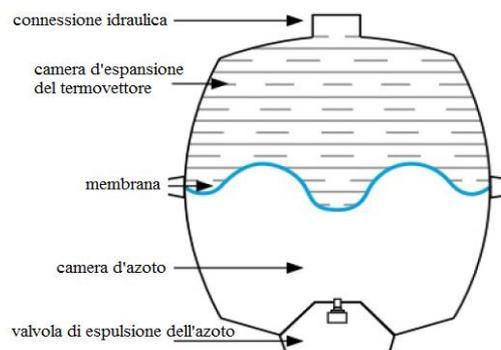


Fig. 20 Vasca di espansione

Una buona scelta dei materiali da impiegare è di vitale importanza per moderare quanto più possibile le perdite termiche e di carico, oltre che ridurre al minimo le manutenzioni straordinarie per deterioramento dei componenti. I materiali più usati ad oggi sono rame, acciaio galvanizzato e materiali plastici [37].

3 CASO DI STUDIO

Al fine di introdurre l'analisi del sistema, in questo capitolo si forniscono informazioni dettagliate sui componenti scelti per l'installazione in esame. Innanzitutto si riporta la documentazione tecnica delle parti del *DSS*, fornita del produttore, e degli elementi aggiuntivi del sistema.

3.1 INSTALLAZIONE IN ESAME

Trattasi di un sistema di microcogenerazione progettato per ridurre le spese energetiche della facoltà di ingegneria industriale di Barcellona (*ETSEIB*), contribuendo fino ad 1 kWe direttamente iniettato nella rete monofase dell'edificio e fino a 3 kWth per il preriscaldamento dell'acqua di rete in supporto alla caldaia di produzione d'ACS per i differenti servizi dello stabile, primo tra tutti la fornitura della palestra universitaria. Tale progetto comporta svariate problematiche peculiari da affrontare nella progettazione del sistema di cogenerazione. Prime tra tutte:

- Non è permesso dalla regolazione vigente un qualunque intervento che influenzi le condizioni normali dell'edificio.
- L'utenza termica è relativamente distante dalla produzione, in quanto la palestra è situata in un padiglione volto a nord, con ombre eccessive per l'installazione.
- La connessione elettrica deve prevedere differenti punti di iniezione.
- Il progetto è sottoposto alle normative vigenti in di tema di produzione di ACS, in particolare per prevenire la contaminazione della stessa (legionella).

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

In figura 21 si riporta l'ensemble dei componenti costituenti il DSS in esame, che verranno documentati nel corso del presente capitolo.

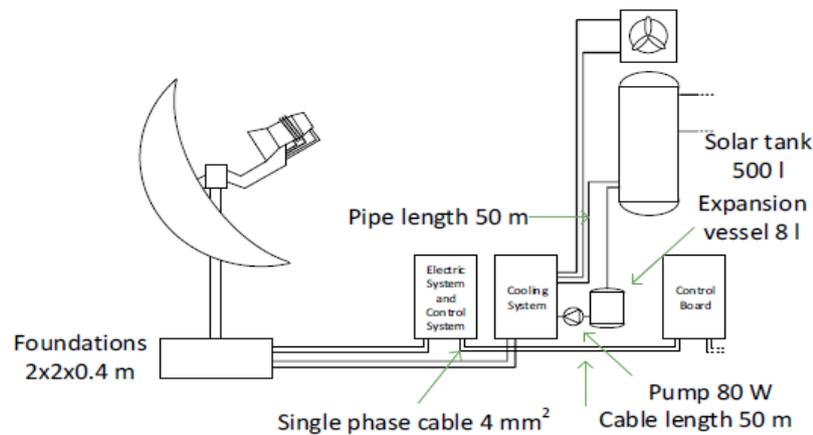


Fig. 21 Schema riassuntivo installazione DSS in esame

3.2 TRINUM E I SUOI SISTEMI ASSOCIATI

Il disco Stirling *TRINUM* è un prodotto della compagnia italiana *INNOVA Solar*, fondata nel 2000, impegnata nella sperimentazione di alternative energetiche solari CSP dal 2005 con differenti progetti pilota localizzati in svariate città dell'Abruzzo come Lettomanopello (PE), Montedodorisio (CH), Torino di Sangro(CH) e Roccamontepiano(CH) [38].

Il disco solare in questione rientra nella categoria dei sistemi CSP micro-scale (inferiori a 20 kWe installati) progettato per la microgenerazione ad uso residenziale come industriale, fornendo una potenza nominale di 1kWe e 3kWth. I punti di forza rimarcati dalla fornitrice sono una alta efficienza globale, ottima utilizzazione della superficie, efficiente inseguimento solare a 2 assi e la semplicità di connessione alla rete elettrica in virtù dell'output in alternata monofase a 230V e 50Hz [40] dichiarando che, a valle della sua sperimentazione in Calabria, è stato capace di fornire 2100 kWh elettrici annuali e 6400kWh termici di ACS a 45°C, con un'efficienza complessiva del 55% (13.8% elettrica e 41.4% termica) [40]. In figura 22 si riporta il diagramma

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

Sankey con il quale la InnovaSolar sintetizza le differenti fasi di conversione dell'energia, in quale componente avvengono, le relative perdite e i parametri da cui quest'ultime sono influenzate [40].

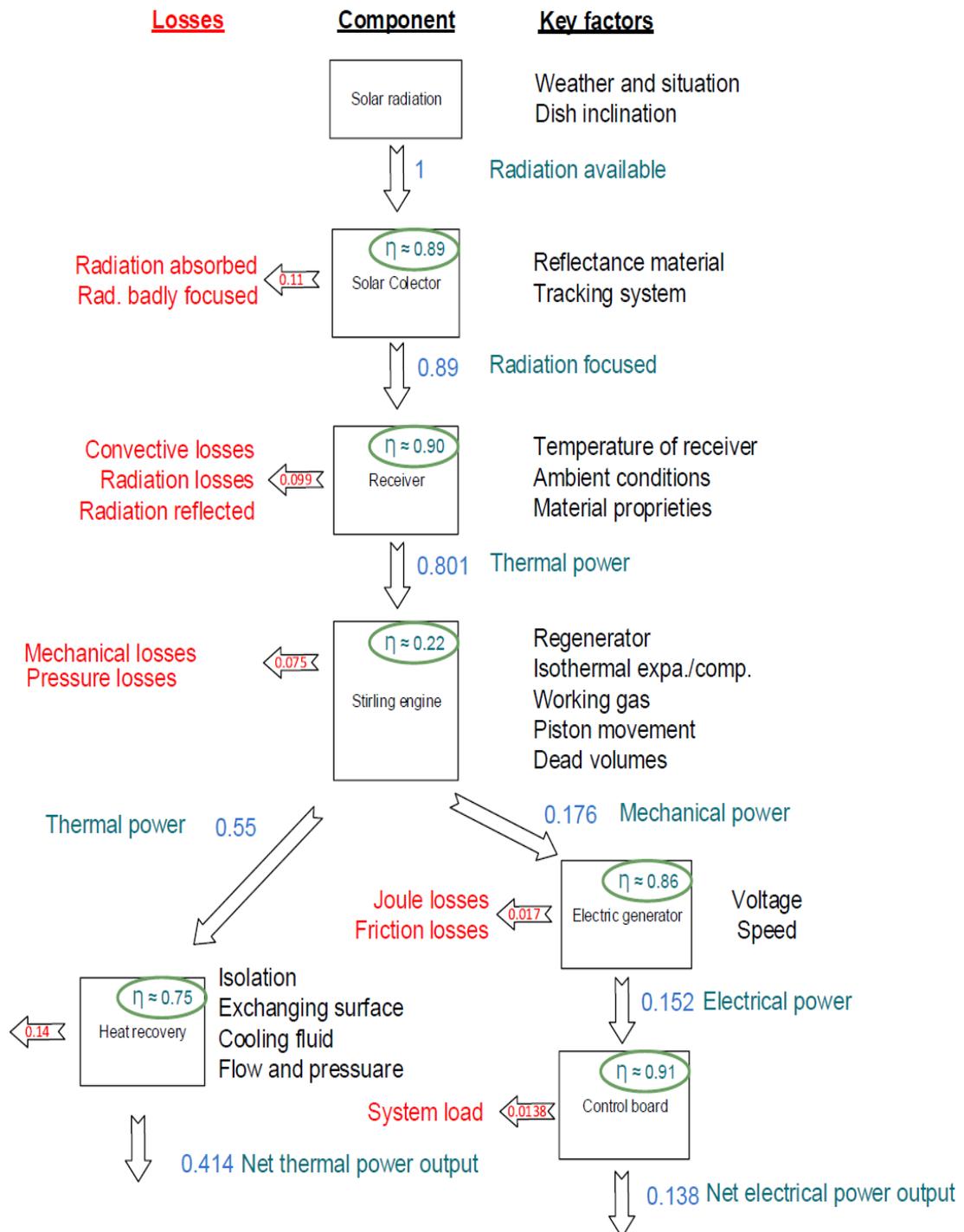


Fig. 22 Diagramma di Sankey proposto da InnovaSolar

Analisi sperimentale di un sistema microcogenerativo Dish Stirling

Innova non fornisce tutti gli elementi necessari alla completezza del sistema, dovendo alcuni di essi adattarsi alle peculiari necessità del caso e starà al cliente munirsi delle apparecchiature ausiliari adeguate. Il pacchetto fornito dal produttore consta di:

- Disco Stirling
- ECU - unità del controllo del motore
- HCU - unità di controllo del sistema idraulico primario
- Vasca di espansione
- Sistema di raffreddamento

I componenti a carico del cliente sono:

- Struttura base di sostegno in funzione della location
- Accumulatore, componente opzionale di disconnessione tra produzione e consumo
- Scambiatore di calore interno o esterno all'accumulatore
- Condotte idrauliche
- Cavi
- Valvole di purga automatica

Data suddivisione viene chiaramente rappresentata in figura 23 [41]

Di seguito si riportano i dettagli dei differenti componenti, divisibili per categorie funzionali quali il solar field, il blocco di potenza, sistema idraulico e sistema di controllo.

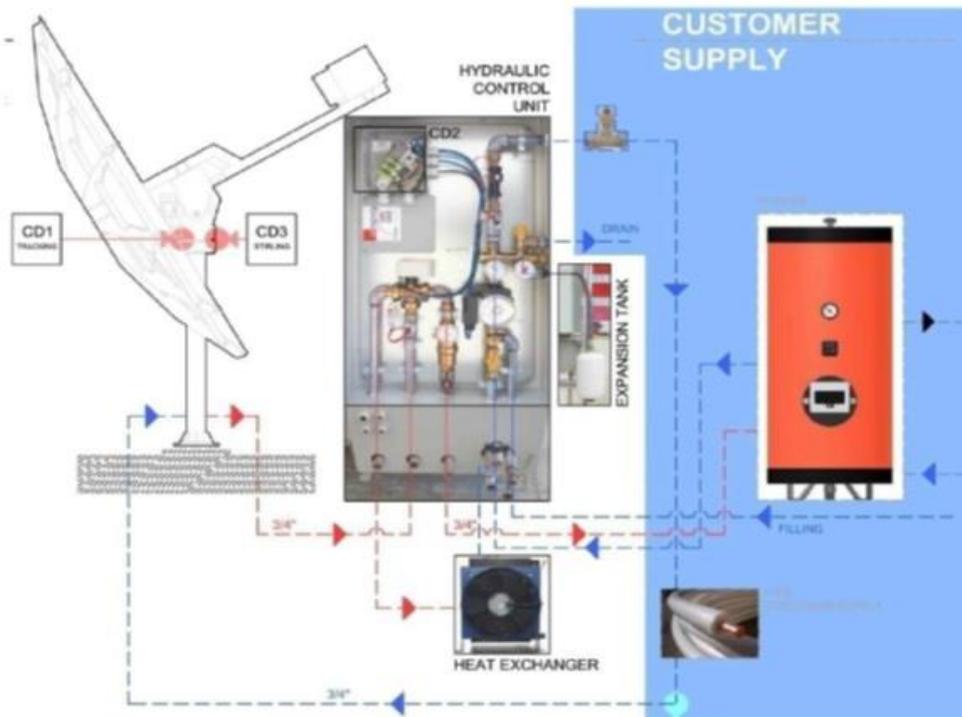


Fig. 23 Schema componenti inclusi nel pack di Innova

3.2.1 SOLAR FIELD: COLLETTORE PARABOLICO

Il collettore parabolico è composto da 11 elementi trapezoidali in alluminio ad alta riflettività assicurati ad un supporto in acciaio inossidabile per mezzo di viti di classe M16 come mostrato in figura 24 [41].

I bracci dello scheletro sono fissati al pilastro centrale per mezzo di 48 viti M8x25, e su di essi vengono installati i supporti che sostengono gli specchi.

L'area di captazione teorica del parabola non coincide con il valore riportato nella scheda tecnica del produttore, in quanto ad un diametro della parabola $D = 3.75m$ corrisponderebbe un valore dell'area di captazione teorica $A_{C,th}$ di $11.045m^2$ tramite la formula

$$A_{C,th} = \pi D^2 / 4$$

Ovviamente il disco Stirling non disegna una parabola completa, riservando una determinata sezione circolare al sostegno del gruppo motore-generatore, integrato alla parabola per concedere maggiore libertà di movimento al

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

sistema; il disegno di tale sezione mancante esclude solo l'area della parabola che sarebbe comunque priva di captazione efficiente date le ombre del sostegno e del motore [40]. La componente di area da sottrarre al valore teorico quindi risulta equivalente all'area d'ombra del sostegno del motore, che potrà essere considerata come una costante (dato l'inseguimento solare). L'area reale quindi risulterà

$$A_C = A_{c,th} - \Phi_{ombra}$$

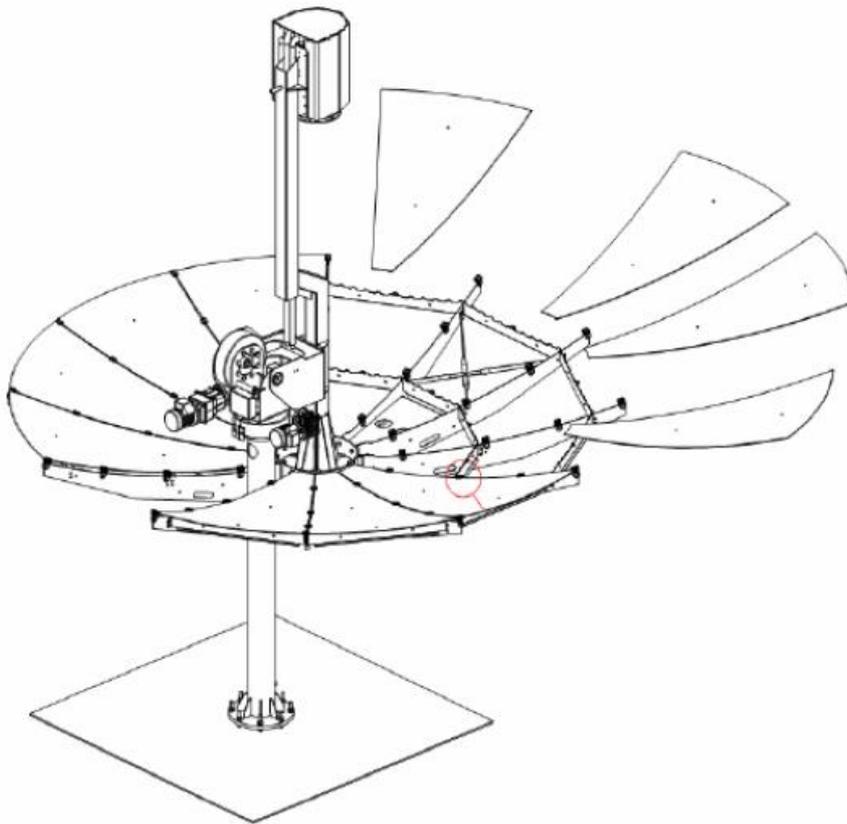


Fig. 24 Esploso del collettore parabolico

Il valore efficace dell'area di captazione, infine, sarà ulteriormente ridotto dalla non perfetta riflettività degli specchi ($\rho < 1$). In mancanza di misure esatte della riflettività si assume il valore fornito dalla scheda tecnica.

$$A_{Cnetta} = A_C * \rho = 9.58m^2$$

3.2.2 SOLAR FIELD: SOLAR TRACKING

Per massimizzare la ricezione della radiazione disponibile il *DSS* è stato dotato di sistema d'inseguimento solare. Si dispone di un Solar Tracking System biassiale azionato da due motori elettrici controllati dall'unità centrale. Note le coordinate GPS del collettore (**41°23'01.7" N; 2°06'57.3" E**) e il giorno dell'anno, il sistema implementa una previsione della traiettoria solare di tipo azimut – elevazione i cui parametri di traiettoria sono:

- L'**azimut solare γ_s** è definito come l'angolo formato dal semimeridiano Sud (raramente Nord) con la proiezione sulla superficie terrestre della retta che unisce l'origine del sistema di riferimento (disco) con il punto della volta celeste in questione (Sole), che nel nostro caso sarà il raggio di sole da captare
- L'**elevazione solare α_s** è l'angolo formato da quest'ultima retta (il raggio) con il piano orizzontale [4].

L'area copribile dal tracking è molto ampia; azimut che vanno dai -110° ai $+110^\circ$ (con riferimento a 0° verso Sud), e un angolo di elevazione da $+90^\circ$ (Zenith) a -90° , la cosiddetta disposizione di sicurezza. La *Safety mode*, con il collettore rivolto verso il basso, è comandata dall'ECU qualora previsto dal protocollo automatico di funzionamento. Si riporta in figura 25 e 26 gli schemi rappresentativi dei gradi di libertà.

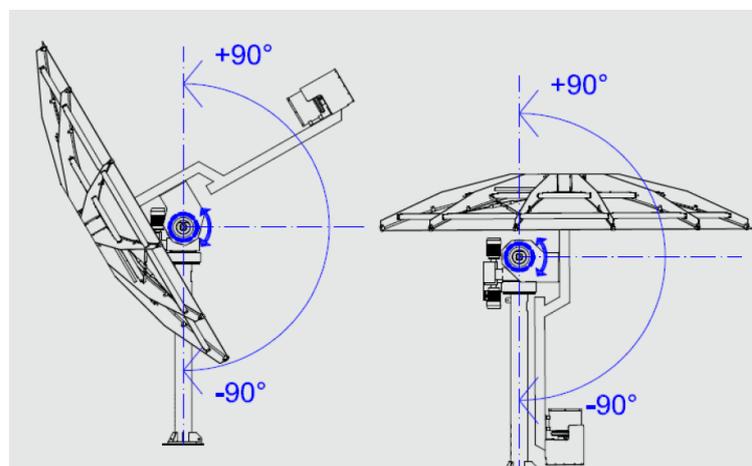


Fig. 25 Range angolo di elevazione

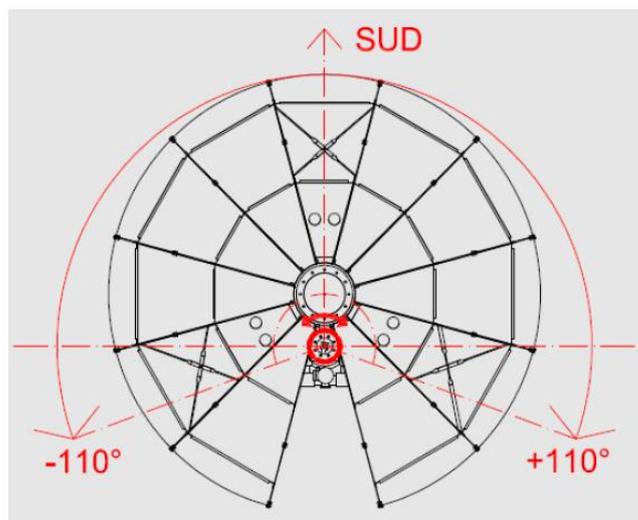


Fig. 26 Range angolo di Azimut

Data la vitale importanza di una focalizzazione ottimale, il funzionamento discreto va impostato ad intervalli quanto più brevi possibili (trattassi di alcuni secondi). Da ciò dipenderà l'omogeneità della captazione e quindi della produzione del *DSS*.

3.2.3 SUPPORTO E AREA DI SICUREZZA

Il sistema ha una altezza di $4.6m$ quando in funzionamento e $3m$ quando in *safety mode* ed occupa un area di $23m^2$, nella quale non ci devono essere né ostacoli né ombre di alcun tipo, per un peso complessivo di 650 kg . Il controllo centrale manda il disco in modalità di sicurezza qualora l'anemometro legga una velocità del vento superiore a 50 km/h , in mancanza di sole, per pioggia o per qualunque malfunzionamento del sistema elettrico o idraulico. L'area di sicurezza da recintare è di $49m^2$ e può contenere solo il *DSS* con il relativo supporto, i quadri elettrici con display di lettura dei misuratori e l'armadio di sicurezza, come mostrato in figura 27.

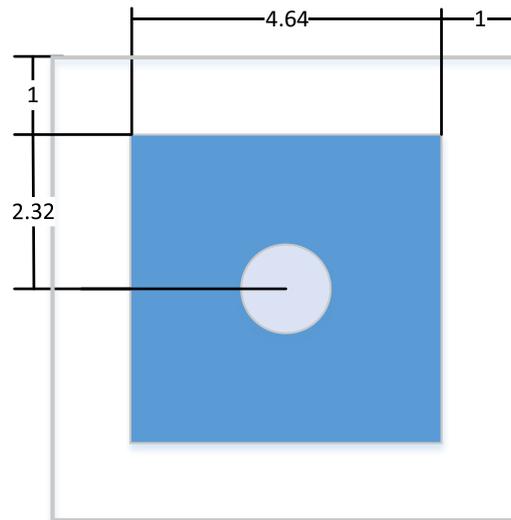


Fig. 27 Pianta Security Area

L'intera struttura è ricoperta da una verniciatura antiossidante ed in gran parte formata da elementi cavi per il passaggio di conduttori, condotte idriche e connessioni elettroniche di comunicazione.

Il disco non può essere fissato direttamente al tetto per non pregiudicare la stabilità strutturale dell'edificio, pertanto scarica su una base progettata ad hoc dall'*ETSEIB* considerando cautelativamente la condizione più avversa alla struttura, che può resistere, da completamente aperto, a raffiche di vento fino a 55km/h e 162km/h in modo sicurezza. Pertanto al momento dell'installazione del disco è stato impiegato un piedistallo di cemento da 4000 kg. L'ancoraggio del disco alla base di $2 \times 2 \times 0.5\text{m}$ consta di armature dal profilo *HEB160* per le connessioni principali e 3 profili *HEB140* da fissare al sostegno centrale del disco con bulloni M16, con l'aggiunta di contrappesi di cemento armato. In figura 28 un schema dell'ancoraggio progettato dalla facoltà.

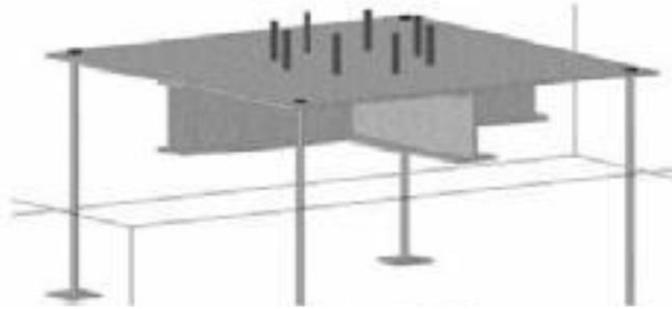


Fig. 28 Schema del sistema di ancoraggio

3.2.4 IL BLOCCO DI POTENZA

Il motore Stirling montato nel Trinum appartiene alla classe dei LFPEG, ovvero Motori Generatori Lineare a Pistone Libero. Sviluppato dalla Sunpower per la NASA, porta licenze e implementazioni aggiuntive della British Gas ed è stato prodotto dalla Microgen Engine Corporation. Le sue caratteristiche più rilevanti, da quanto riportato dalla Innova solar, sono:

- Silenziosità di operazione
- Frequenza output a 50 Hz
- Sicurezza operativa (stabile, non esplosivo)
- Non necessita inverter

Opera con pressioni attorno ai 28 bar e temperatura del ricevitore di circa 400°C con un'efficienza superiore al 30%, superiore alle macchine Stirling concorrenti. Il motore si avvia automaticamente quando si raggiunge la temperatura T_H minima di 190°. Il ricevitore è un disco di diametro $d_{ricevitore} = 0.1m$ che trasferisce il calore direttamente al circuito del fuoco caldo. Per resistere allo stress termico (temperature operative di circa 500°C) il ricevitore è stato trattato con fluoruro nella faccia esterna in acciaio inossidabile ed è fatto in Nickel lungo le superfici laterali. Il calore di scarto viene assorbito dal sistema di raffreddamento tramite una miscela di acqua e anticongelante, mentre la conversione elettrica è affidata ad un generatore sincrono lineare funzionante a 50 Hz con un output da 230V.

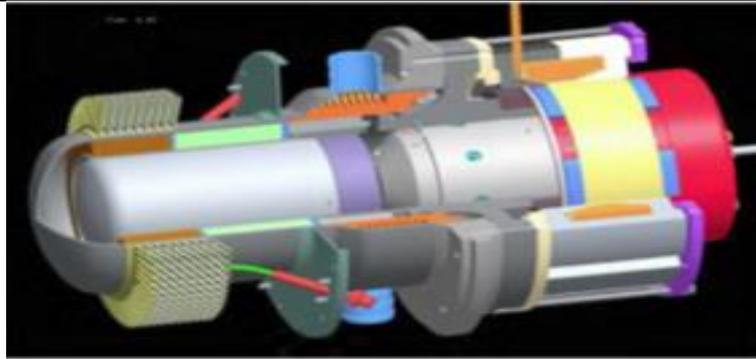


Fig. 29 FPSE progettato per Trinum

3.2.5 SISTEMA IDRAULICO

Il sistema di raffreddamento è costituito da una centralina idraulica di controllo HCU con i suoi sensori e valvole, che permette il controllo e la corretta gestione del sistema di valvole necessario, del fluido di raffreddamento, della pompa idraulica, della vasca di espansione, della ventola termodissipatrice e della pompa ausiliaria se necessario.

Per avere le temperature corrette nelle diverse parti del sistema è necessario utilizzare scambiatori di calore tra il circuito primario solare ed il secondario dell'utenza termica.

Lo scopo principale è quello di mantenere il fuoco freddo del motore a temperature adeguate per il corretto funzionamento del ciclo Stirling. In figura 30 si mostra il sistema di raffreddamento e le sue parti principali.

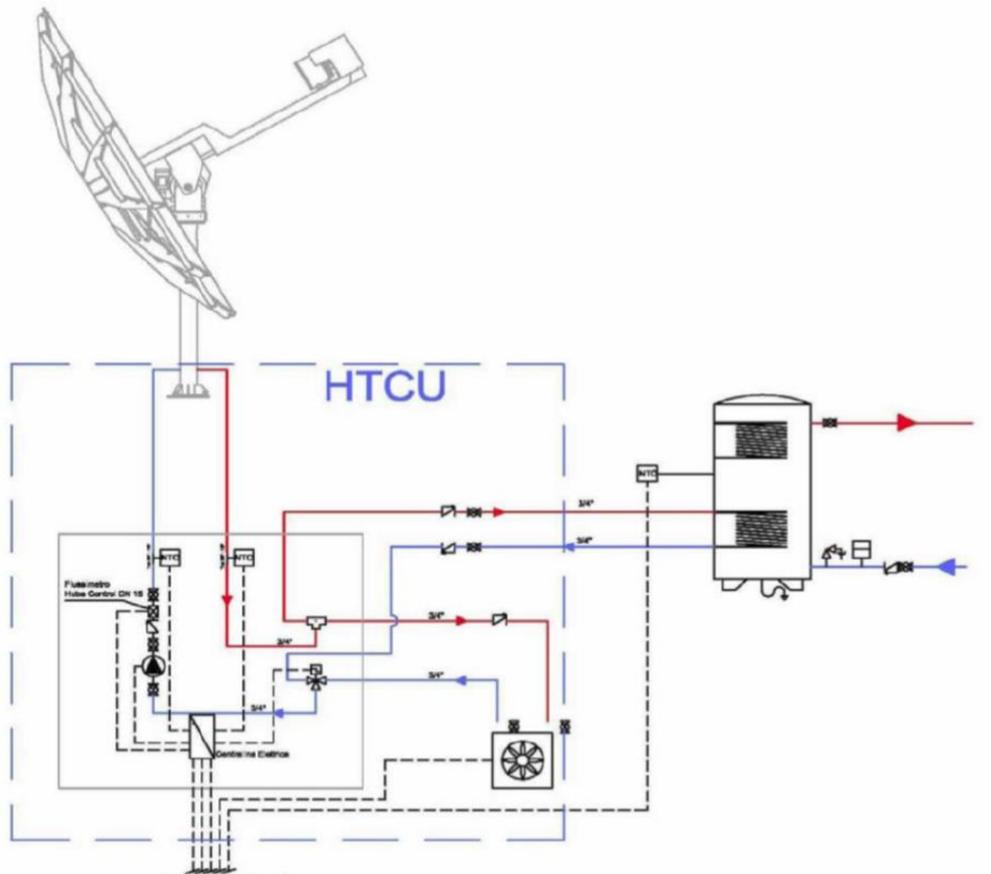


Fig. 30 Schema sistema idraulico

SISTEMA IDRAULICO: CIRCUITO IDRAULICO SOLARE

Tutte le condotte sono state prodotte in rame dal diametro di $\frac{3}{4}$ " (21mm circa). Le connessioni tra tubature, valvole ed altri accessori sono realizzate con saldature o filettature. La lunghezza totale della linea è di 142m, valore notevole, malgrado lo studio di minimizzazione del disegno, al fine di ridurre le perdite termiche e di carico; per quest'ultime in particolare le condotte sono state fissate ogni 50 cm, con un inclinazione del percorso del 1%, oltre che minimizzate la presenza di angoli e di curvature brusche. Tutta la linea sarà coibentata per mezzo di un isolante che ne assicuri anche la durabilità a fronte delle condizioni meteo più svantaggiose. Dallo studio dello spessore minimo di rivestimento risulta necessario uno strato di 25mm per le parti più interne e

Analisi sperimentale di un sistema microcogenerativo Dish Stirling

di 35mm per le linee più esposte e per i vari accessori. Il materiale selezionato per la coibentazione è un copolimero di poliolefina bianca.

SISTEMA IDRAULICO: IL RADIATORE

Nel caso di sistema cogenerativo, il radiatore svolge solo una funzione ausiliaria di dissipazione di energia termica all'ambiente qualora venisse prodotta senza la possibilità di accumularla, ovvero in caso di guasti o sovraccarico del sistema. In particolare l'HCU attiverà la ventola ogni qual volta che la temperatura del fluido di raffreddamento dovesse superare il 70°C. Cautelativamente si è deciso di sovradimensionare tale componente fino ad una dissipazione massima di 3.5kWth a fronte di una potenza termica massima producibile di 3kWth, così da assicurare il raffreddamento del sistema a fronte di qualunque contingency. Quando azionata, la ventola assorbe fino a 80We costituendo la massima voce di carico parassita del sistema.

SISTEMA IDRAULICO: COOLING FLUID

Il fluido termovettore del circuito primario non presenta grandi problematiche in sede di progettazione date le condizioni operative richieste, quali temperature comprese tra i 6°C e i 60°C (con picchi massimi ammessi di 90°C qualora il radiatore non dovesse attivarsi a 70°C). Pertanto i criteri di selezione sono:

- Ottime proprietà di scambio termico, che agevolino lo scambiatore.
- La non tossicità, per rientrare nelle normative vigenti senza aggravio di costi e difficoltà progettuali.
- La stabilità in fase liquida.

Si opta per una miscela di acqua e glicole propilenico anticongelante. La proporzione di miscela ottimale, al 29% di propilenico, è stata ricavata da uno studio delle proprietà termofisiche della miscela stessa, assumendo come

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

condizione limite operativa un temperatura esterna di -10°C, minimo storico registrato a Barcellona negli ultimi 20 anni.

SISTEMA IDRAULICO: SOLAR TANK

Il sistema è costituito da un accumulatore di ACS interna Exchange contenente una serpentina di scambio termico tramite il quale il fluido termovettore trasferisce il calore all'acqua di rete. Il tank cilindrico di diametro 770mm e altezza 1690mm contiene un volume d'acqua di 500L con una superficie interna di scambio termico di 2m². I parametri operativi sono:

- 25 bar di pressione massima al primario e 10 bar al secondario
- Temperatura massima ammessa al primario di 200°C, 90°C al secondario

Per garantire la salubrità dell'ACS, il tank è internamente rivestito di acciaio vetrificato mentre la coibentazione è realizzata tramite una schiuma rigida di poliuretano ottenuto per stampaggio contenete CFC (clorofluorocarburi).

Si fornisce il tank di un controllo visuale per mezzo di manometri di pressione e termometri per entrambi i circuiti. La protezione catodica è assicurata tramite un anodo sacrificale in magnesio. Per semplificare gli interventi di manutenzione si innesta un sistema di svuotamento composto da tubi di rame non coibentati, una valvola sferica in ottone ed una valvola di ritenzione.

SISTEMA IDRAULICO AUSILIARIO

Il fluido termovettore circola in condizione operative ad una porta di circa 15L/min per un lunghezza delle condotte di 142m con una ampiezza di ¾" richiedendo l'installazione di una pompa di circolazione da 70We per vincere le perdite di carico. Per adempiere alle normative europee, la pompa sarà alimentata elettricamente e regolata tramite inverter. Si preferisce collocarla nella zona più fredda del circuito per cautelarsi da qualunque problema di

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

cavitazione. Si provvede il sistema di una pompa ausiliaria al fine di garantire la raffreddamento. Entrambe hanno asse di rotazione orizzontale. In caso di surriscaldamento del fluido termovettore, il sistema prevede un volume di espansione di 8L all'interno di una vasca preposta, che mantiene la pressione del circuito tra i 3bar e i 7bar. Si è preferito porla presso l'aspirazione della pompa di circolazione.

3.2.6 SISTEMA DI CONTROLLO

Il sistema di controllo incluso nel *DSS* comprende l'unità di controllo elettronico ECU e l'unità di controllo idraulico HCU. L'ECU è costituito da una scheda madre capace di associare tutti i dati provenienti dai diversi sensori disposti nel *DSS* e trasmetterli al server remoto di controllo tramite protocollo Modbus RTU. Inoltre si occupa del tracciamento solare imponendo l'orientazione del collettore dettata dall'algoritmo basato su un orologio astronomico e sulla posizione GPS nota.

Costituendo il fulcro di trasmissione dei sensori è responsabile della sicurezza interna *DSS*, comandando automaticamente la chiusura in modo sicurezza del disco (e se necessario l'avvio dei sistemi di raffreddamento ausiliare) qualora sia rilevato qualunque errore di lettura, velocità del vento o temperature di fuoco caldo o di cooling fluido prossime ai valori critici.

Di seguito si elencano i componenti necessari per lo svolgimento di questa funzione:

- *DSS* control board di supervisione.
- Display.
- Antenna GPRS.
- Controllo tracking.
- Batteria d'emergenza.
- Messa a terra di tutti i componenti.

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

- Relay per l'attivazione degli interruttori di emergenza.
- Fusibili tipo C da 0.5A.
- Interruttori differenziali.
- Trasformatori.
- Capacitori di compensazione della potenza reattiva.
- Resistenze di dissipazione d'emergenza.

L'HCU, unità di controllo idraulico, gestore della potenza termica prodotta si occupa in particolare del controllo automatico di valvole a tre vie motorizzate in base ad un algoritmo di ottimizzazione del funzionamento che prende in input le letture del flussimetro e dei termometri del sistema idraulico. Esattamente come l'ECU, viene collocato di fronte al disco a 2m di distanza per evitare qualunque ostacolo al movimento dello stesso.

Tutte le connessioni necessarie sono garantite da cavi da tipo 1p+1n+pe monofase di 4mm^2 di spessore. Trattandosi di un sistema di autoconsumo non si è sottoposti ai protocolli di immissione di energia elettrica nella rete. Ad ogni modo bisognerà garantire l'accesso al distributore di BT ai sistemi di verifica installati al nodo tra il DSS e la rete monofase dell'edificio. La protezione del personale da elettrocuzione deve essere garantita da sigilli di un ente di revisione riconosciuto. L'ultimo sistema di sicurezza interna previene sovraccarichi da fulmini o da connessione alla rete per mezzo di *gas arrester*, *varistors* ad ossido di zinco, diodi e scintillatori ad impulso, oltre ad affidarsi al sistema parafulmine dell'edificio stesso.

3.2.6 SISTEMA DI MONITORAGGIO

Il net manager implementato tramite Modbus RS-485 permette di ottenere un monitoraggio in tempo reale di tutte le letture disponibili, senza installare software di interfaccia tra il server ed il DSS, costantemente, agevolando la supervisione dei sistemi di sicurezza e la trasmissione dati agli

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

enti pubblici di competenza. Inoltre è capace di invertire il senso di comunicazione per rispondere con tempismo a qualunque anomalia della rete elettrica. Di seguito la figura 31 riporta uno schema complessivo del sistema di monitoraggio.

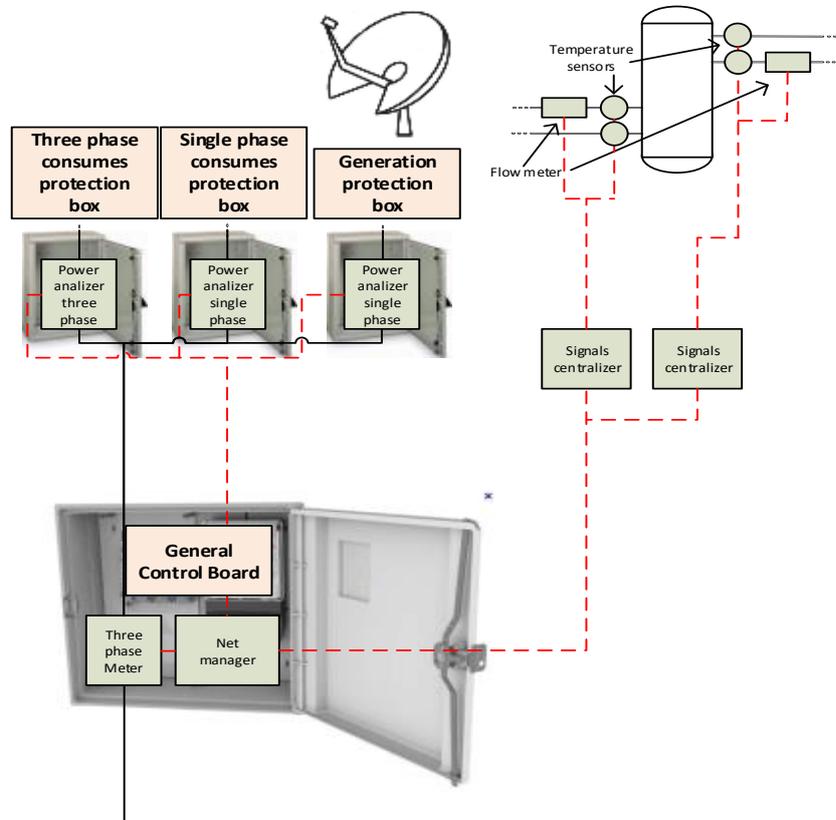


Fig. 31 Schema sistema di monitoraggio

3.2.7 SENSORI

Si riporta un elenco dei sensori installati per il monitoraggio del *DSS*:

- Power analyzer monofase.

Uno per ogni misura di potenza richiesta. Lavora fino a 32A ed ha un display LCD con sistema a rotating screen che permette la visualizzazione di 24 variabili elettriche istantanee massime e minime. Implementato in un'unica camera con un modulo DIN da 18mm, è possibile inserirlo in qualunque pannello elettrico. Il protocollo Modbus RTU RS-485 è compatibile con il software di gestione energetica del *DSS*.

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

- Misuratore elettrico.

Comunicante tramite RS-485, lavora alle tensioni e correnti operative del *DSS*. Robusto ed efficiente, adempie a tutte le restrizioni normative più recenti (European Directive MID, EN50470 sulla metrologia elettrica).

- Centralina dei segnali analogici.

In 4 moduli DIN, entrano 4 segnali analogici, riportando in output 2 segnali digitali tramite protocollo Modbus.

- Termometri.

I sensori di temperatura sono dei termoresistori PT100 e PT1000 che associano una temperatura alla variazione di resistenza dedotta dalla lettura analogica della corrente di controllo circolante. Fanno eccezione le misure di temperatura del ricevitore fornite da termocoppie e dai termometri per la temperatura ambiente, sulle quali non si perviene alcuna documentazione specifica.

- Flussimetro elettronico.
- Anemometro.
- Oscilloscopio di frequenza elettrica.
- Amperometro e voltmetro al nodo di connessione alla rete.

3.3 DATI OUTPUT DEL DISH STIRLING SYSTEM

Il complesso delle apparecchiature documentate in dettaglio fornisce costantemente informazioni sul suo funzionamento al server di monitoraggio centrale installato nel dipartimento. Il dato perviene sotto forma di una serie di stringhe, ognuna delle quali riporta i valori medi su un intervallo di 5 minuti dei seguenti parametri

- Data
- Ora locale

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

- Velocità del vento [km/h]
- Temperatura del ricevitore TH [°C]
- Setpoint di TH [°C]
- Temperatura del termovettore in uscita dal solar tank [°C]
- Temperatura del termovettore in ingresso al solar tank [°C]
- Portata di termovettore [l/min.]
 - Potenza termica espressa P_{th} [Wth]
- Temperatura Solar Tank [°C]
- Tensione ai nodi [V]
- Intensità di corrente iniettata in rete [43]
- Angolo di fase [°]
 - Potenza elettrica espressa [We]
- Frequenza della corrente [Hz]
- Error code
- Azimut imposto al collettore γ_s [°]
- Elevazione imposta al collettore α_s [°]

4 METODOLOGIA E ANALISI

Si riporta di seguito la procedura adoperata per giungere ad una analisi del funzionamento del *DSS* in sperimentazione alla quale segue un confronto di redditività rispetto ad un sistema ibrido tradizionale fotovoltaico (*PV*) per la generazione elettrica ed un collettore solare (*CS*) per la termica, entrambi con angolo di inclinazione fisso opportunamente scelto.

4.1 INPUT

L'analisi si basa su input di tipo meteorologico (descritti nel paragrafo successivo), statistico sulla disponibilità di radiazione attesa e, certamente, sperimentale derivato dal sistema centralizzato di controllo del *DSS*.

4.1.1 DATI SPERIMENTALI

Alla luce della descrizione dettagliata del sistema di monitoraggio del capitolo precedente ci si limita ad elencare le misure disponibili.

- d & h Data ed ora locale del campionamento.
- $TH[^\circ C]$ Temperatura del ricevitore, tramite lettura della apposita termocoppia.
- $\gamma_c[^\circ]$ Angolo di azimut imposto al collettore dal sistema tracking
- $\alpha_c[^\circ]$ Angolo di elevazione imposto al collettore dal sistema tracking.
- $v_{vento} [km/h]$ Velocità del vento misurata dall'anemometro di sicurezza.

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

- \dot{Q}_{CF} [L/min] Portata del fluido termovettore circolante nel sistema di raffreddamento, misurato tramite il flussimetro di sistema.
- $T_{CF,IN}$ [°C] Temperatura del fluido termovettore all'ingresso del solar tank.
- $T_{CF,OUT}$ [°C] Temperatura del fluido termovettore all'uscita del solar tank.
- P_{th} [W_{th}] Potenza termica accumulata nel solar tank. Trattasi di una misura indiretta derivante da un calcolo operato automaticamente dal software di controllo. In particolare:

$$P_{th} = \dot{Q}_{CF} * C_{CF} * (T_{CF,IN} - T_{CF,OUT})$$

dove C_{CF} è il valore di calore specifico del fluido termovettore, pari a 4.1796 J/cm³K.

- P_e [W_e] Potenza elettrica espressa al nodo della rete monofase dell'edificio, al netto dei carichi parassita interni al sistema.
- **FEEDBACK**. La voce FEEDBACK restituisce valore unitario ogni qual volta i controlli interni al sistema di monitoraggio possano garantire l'affidabilità di ogni singolo dato riportato nell'intervallo in questione.

Particolare attenzione va rivolta a quest'ultima voce, in quanto la vera problematica riscontrata nell'analisi del *DSS* è la scarsa affidabilità dei misuratori, con feedback raramente positivi, che ha determinato la dismissione temporanea del sistema dopo solo 48 giorni di sperimentazione, quando è venuta a mancare l'attendibilità della misura più critica ed indispensabile, quella di *TH*, in quanto disattivare la modalità di sicurezza senza letture della termocoppia comporterebbe un sicuro surriscaldamento della macchina nelle ore più calde del giorno.

Per garantire l'affidabilità dei risultati desunti si restringe l'analisi ai giorni di sperimentazione nei quali non si è verificato nessun errore di lettura, ossia

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

con feedback ininterrottamente positivo. Ne consegue un campione di 2117 dati a feedback positivo che documentano l'andamento delle variabili nei seguenti giorni:

- 21/04/2015
- 23/04/2015
- 30/04/2015
- 12/05/2015
- 18/05/2015
- 22/05/2015
- 23/05/2015

4.1.2 DATI METEOROLOGICI

Con l'obiettivo di valutare le prestazioni del sistema si è fatta richiesta di accesso al database sulle condizioni meteo raccolte dalla stazione automatica del servizio meteorologico di Catalunya più prossima all'installazione. Fortunatamente ce ne è una a meno di 1km dalla facoltà, per l'appunto la stazione meteo di Zona Universitaria in figura 32.



Fig. 32 Piranometro della stazione meteo di zona universitaria

Tali stazioni misurano la radiazione globale incidente sul piano orizzontale (*GHI*) tramite piranometri termoelettrici, i quali associano il valore di radiazione incidente al differenza di temperatura ai capi della termocoppia

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

interna, letta in funzione della differenza di potenziale generata per effetto Seebeck [43]. Le altre misure ricavate dalla stazione sono

- *HR* umidità relativa ambientale
- *Tamb* Temperatura ambiente [°C]
- *Pamb* Pressione atmosferica [hPa]

Per poter associare ognuno di questi input agli output del sistema di monitoraggio automatico del *DSS*, si discretizzano anche i parametri meteo in valori medi di intervalli di 5 minuti.

4.1.3 PREVISIONI SU BASE STATISTICA

La casa fornitrice assicura una vita utile di 15 anni, nella quale ogni eventuale malfunzionamento è coperto da una garanzia full-service prevista da contratto. Pertanto lo studio della redditività di entrambe le alternative deve avere almeno il medesimo orizzonte temporale e tener conto di tutti i costi relativi all'installazione, gestione e manutenzione. Essendo tuttora al principio della sperimentazione del sistema, si necessita una estrapolazione dei dati di produzione annuale previsti sulla base delle performance sperimentalmente osservate, nel caso del *DSS*, e previste dal fornitore, nel caso di sistema tradizionale.

Gli input di tipo meteorologico sono stati ricavati dalla piattaforma PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), una base di dati di libero accesso nata in seno all'istituto per l'energia e il trasporto (IET) del Joint Research Centre della comunità europea, con lo scopo di fornire un inventario maps-based della risorsa solare disponibile in qualunque località d'Europa, Nord Africa e Medio Oriente per la proliferazione dei sistemi di produzione da fonte solare [44]. I database adoperati per l'estrapolazione sono essenzialmente *Monthly Radiation* e *Daily Radiation*.

MONTHLY RADIATION

L'interfaccia richiede inizialmente le esatte coordinate GPS del sistema della località prescelta. Le coordinate della l'installazione in esame sono:

Latitudine = 41°23'1" Nord Longitudine = 2°6'57" Est

Il server restituisce valori tipici della località, costanti e/o riferite ad una giornata standard di ogni mese dell'anno, come riassunte di seguito:

Angolo di inclinazione ottimale per una superficie di captazione fissa.

Nel caso assume valore $I_{opt,annuale} = 37^\circ$.

Deficit di irraggiamento annuale percentuale atteso. Grazie agli studi previ all'installazione condotti dal dipartimento, ha valore nullo.

H_h [Wh/m² day] Radianza solare globale giornaliera attesa sul piano orizzontale. Pertanto riferita al totale disponibile a valle della giornata tipo del mese in esame.

$I_{opt,mese}$ [°] Inclinazione ottimale nel mese in esame. È disponibile anche il grafico dell'andamento di I_{opt} in funzione del mese dell'anno (figura 35).

H_{opt} [Wh/m² day] Radianza solare globale giornaliera attesa sul piano di inclinazione $I_{opt,mese}$

D/G Rapporto tra la componente diffusa e globale di radianza solare giornaliera attesa sul piano normale alla radiazione.

T_D [°C] Temperatura media giornaliera

Le informazioni rivelanti tratte dalla piattaforma *Monthly Radiation* sono essenzialmente il valore di inclinazione ottimale fissa $I_{opt,annuale} = 37^\circ$, al quale fissare l'elevazione dei pannelli fotovoltaici e dei collettori solari, e l'andamento del rapporto *D/G* che si propone come una possibile scomposizione tipica attendibile della radiazione globale misurata al fine di ottenere un valore istantaneo di *DNI*; in particolare l'andamento in figura 34.

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling
 risulta essere poco variabile, in un range compreso tra 0.26 e 0.4, con valor medio $\overline{D/G} = 0.388$.

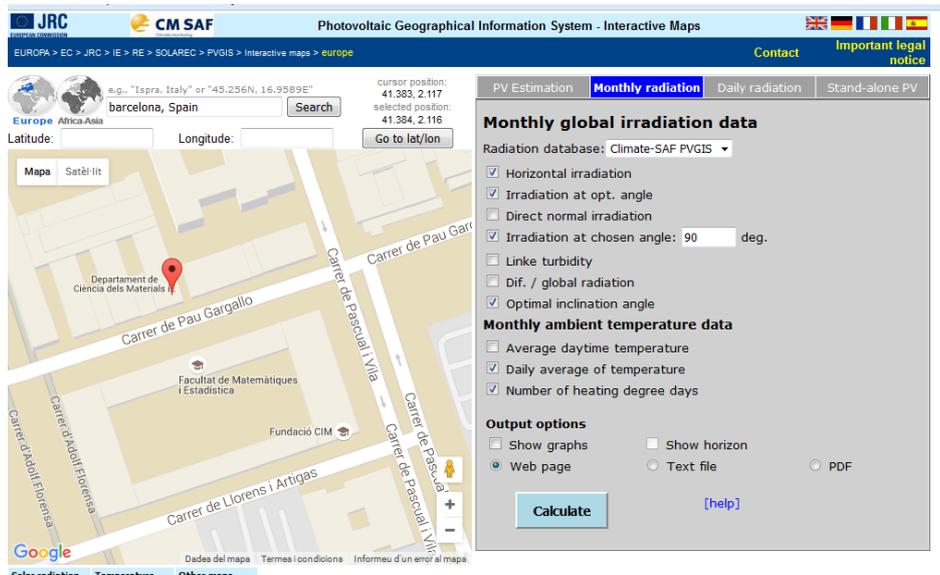


Fig. 33 Interfaccia PVGIS Monthly Radiation

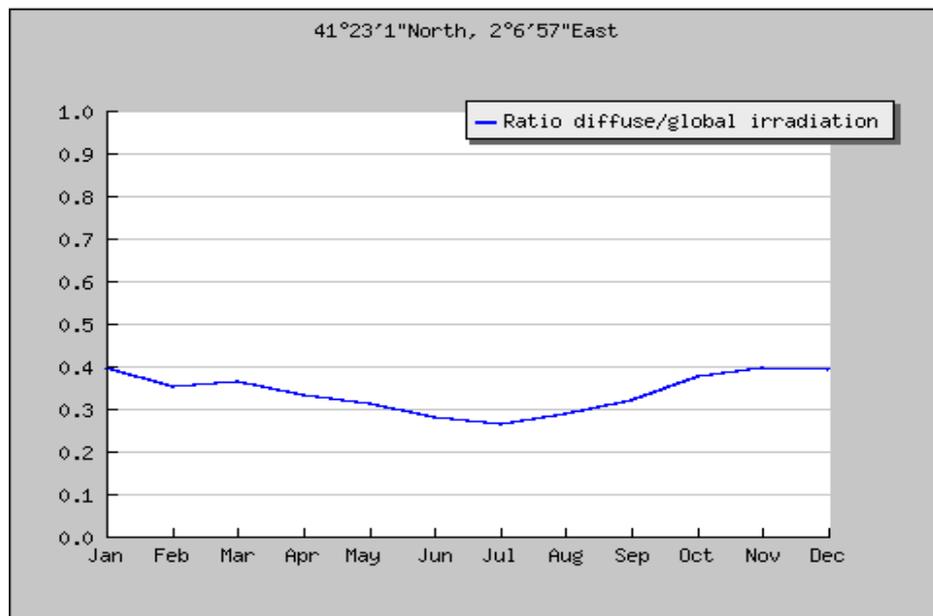


Fig. 34 Andamento del rapporto D/G nei mesi dell'anno

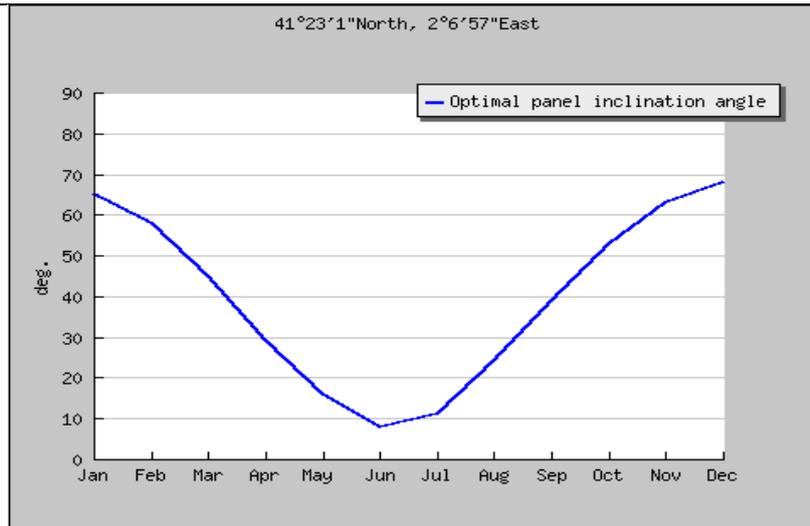


Fig. 35 Andamento dell'angolo di incidenza ottimale I_{opt} nell'anno

DAILY RADIATION

L'interfaccia è pressoché identica. Per ogni mese dell'anno, si ottiene a display l'andamento delle grandezze radiometriche e termometriche di interesse durante la giornata modello del mese in esame. I dati sono forniti in valor medio nell'intervallo di misura da 15 minuti, dalle ore 05:22 alle 19:07, arco temporale comune costante per ogni mese dell'anno, opportunamente scelto per escludere tutte e sole le ore a radiazione nulla indipendentemente dal mese in esame. I parametri riportati sono:

- $G[W/m^2]$ **Global Irradiation per inclinazione ottimale**
- $G_d[W/m^2]$ **Diffused Irradiation per inclinazione ottimale**
- $DNI[W/m^2]$ **Direct normal irradiation media**
- $T_d[°C]$ **Temperatura ambiente attesa**

Inoltre viene fornita la traiettoria solare attesa, in variabili azimut – elevazione ($\gamma_s; \alpha_s$), nella giornata modello del mese in esame, comparandola con le traiettorie limite del 21 Giugno e del 21 Dicembre, come mostrato in figura 36.

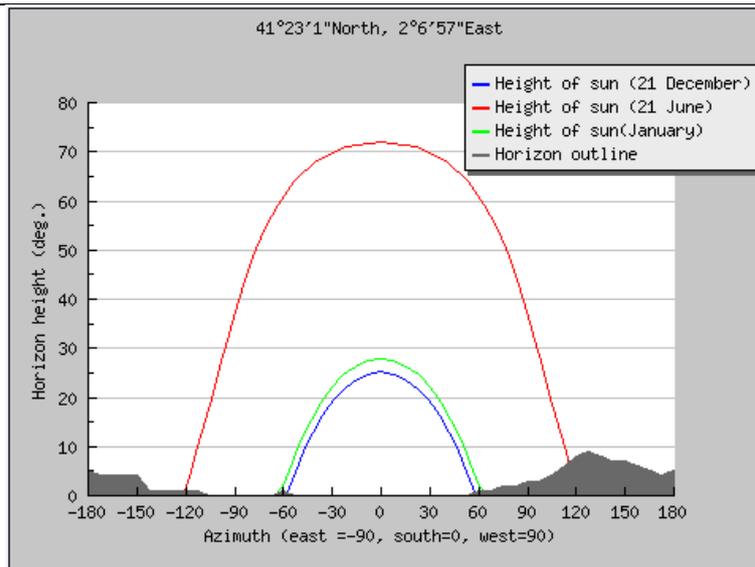


Fig. 36 Traiettoria solare prevista da PVGIS *Daily Radiation* per la giornata modello di Gennaio, confrontata con il solstizio di Gennaio e di Dicembre

4.2 CALCOLO DELLA TRAIETTORIA SOLARE

Al fine di valutare la qualità del solar tracking implementato nel *DSS*, si simulano i calcoli di previsione di traiettoria solare in variabili azimut – elevazione operati dal sistema di controllo automatico. Innanzitutto si definiscono le 2 variabili astronomiche necessarie:

Declinazione solare δ . Angolo formato dal raggio incidente e il piano dell'equatore [45]. Si calcola tramite la equazione di Cooper per il giorno dell'anno d_y

$$\delta_s = \text{declinazione solare} = 23.45^\circ \sin\left(\frac{360 * 248 + d_y}{365}\right)$$

Angolo orario ω . Angolo formato dalle proiezioni sul piano dell'equatore, del meridiano della posizione GPS in esame e della retta passante per il sole e la posizione stessa (raggio incidente) [45].

Trattasi della misura della posizione del sole nel firmamento secondo l'osservatore fisso nella località GPS di interesse. Definita nulla al mezzogiorno dell'ora solare locale H_s , aumenta di $15^\circ/h$ verso ovest; pertanto:

$$\omega = \text{angolo orario} = (H_s - 12h) * 15^\circ$$

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

Va considerata la discrepanza tra ora locale H_L e ora solare H_S

$$H_S = H_L - \varepsilon + ET + \frac{1}{15}(L_{rif} - L_{LOC})$$

Dove L_{rif} è il meridiano di riferimento, L_{LOC} quello locale mentre ε funge da correzione per l'ora legale assumendo valore -2 d'estate e -1 d'inverno. Il parametro ET è conosciuto come *equazione di tempo* e si ricava tramite la formula

$$ET = 0.0072\cos C - 0.0528\cos 2C - 0.0012\cos 3C - 0.1229\sin C \\ - 0.1565\sin 2C - 0.0041\sin 3C$$

Dove C è definito come $C = d_y * 2\pi/366$.

Pertanto la traiettoria solare viene calcolata come:

$$\alpha_s = \text{elevazione solare} = \arcsin(\sin\delta_s * \sin\varphi + \cos\varphi * \cos\omega * \cos\delta)$$

$$\gamma_s = \text{azimut solare} = \arcsin\left(\frac{\sin\omega * \cos\delta}{\cos\alpha_s}\right)$$

Si riporta tramite i diagrammi di figura 37 e 38 l'andamento delle variabili azimut ed elevazione solare confrontati con gli analoghi imposti al collettore dal sistema tracking una giornata di sperimentazione.

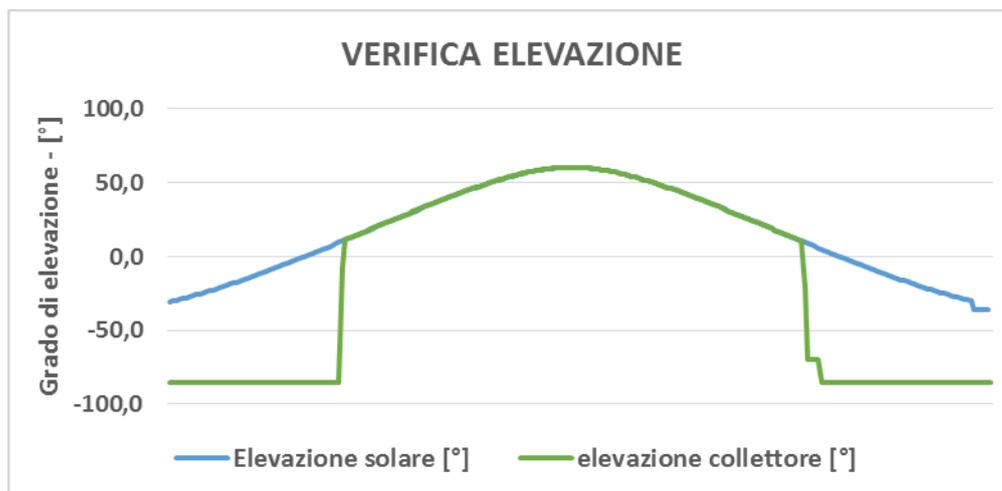


Fig. 37 confronto tra i dati sperimentali di grado di elevazione prevista ed imposta

L'andamento dell'elevazione mostra perfetta congruenza, ad eccezione di alcune sporadiche singolarità dovute ad errori nel monitoraggio. Naturalmente

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

il parametro elevazione solare ha sempre un andamento sinusoidale essendo valutabile anche nelle ore notturne, mentre il grado di elevazione imposto al collettore ha un valore costante di -90° durante le ore notturne, indicativo del modo sicurezza assunto dal *DSS* nelle ore di non funzionamento.

In figura si riporta l'analogo diagramma per il confronto degli angoli di azimut. E' evidente un'incongruenza intermittente del sistema di tracking, in particolar modo si evince una forte correlazione tra i picchi di temperatura al ricevitore e gli scostamenti. Tale correlazione suggeriscono che tale fenomeno non sia attribuibile all'azionamento discreto dei motori d'inseguimento, ma al protocollo automatico di protezione contro i sovraccarichi termici.

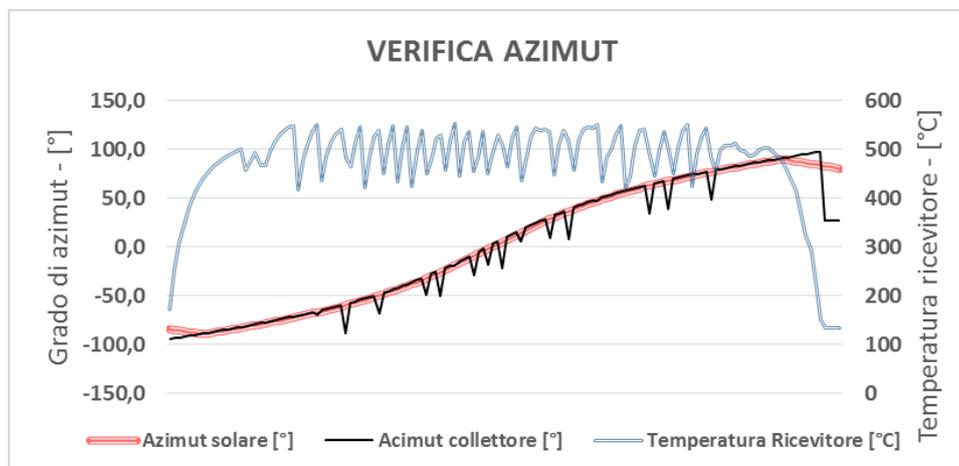


Fig. 38 Confronto tra i dati sperimentali di angolo di azimut previsto e imposto con l'andamento della temperature di ricevitore

In particolare si nota che, come previsto dal software di regolazione e controllo, in prossimità delle temperature di ricevitore *TH* critiche (550°C circa) il sistema di protezione defocalizza volontariamente il collettore lungo l'asse azimutale per non rischiare sovratemperature. Ne consegue una perdita di captazione radiativa che nelle condizioni nominali del fornitore non era considerata. Dall'osservazione delle potenze espresse si desume che l'inerzia termica e meccanica del motore, noto per i suoi tempi di risposta lenti, non è sufficiente ad attenuare l'oscillazione perfettamente riscontrata nella potenza

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

elettrica; meno in quella termica che, essendo valutata all'ingresso del solar tank, risente dell'inerzia termica del sistema idraulico. La figura 39 mostra le evidenti ripercussioni della defocalizzazione sull'andamento di TH e delle potenze espresse durante un giorno di sperimentazione.

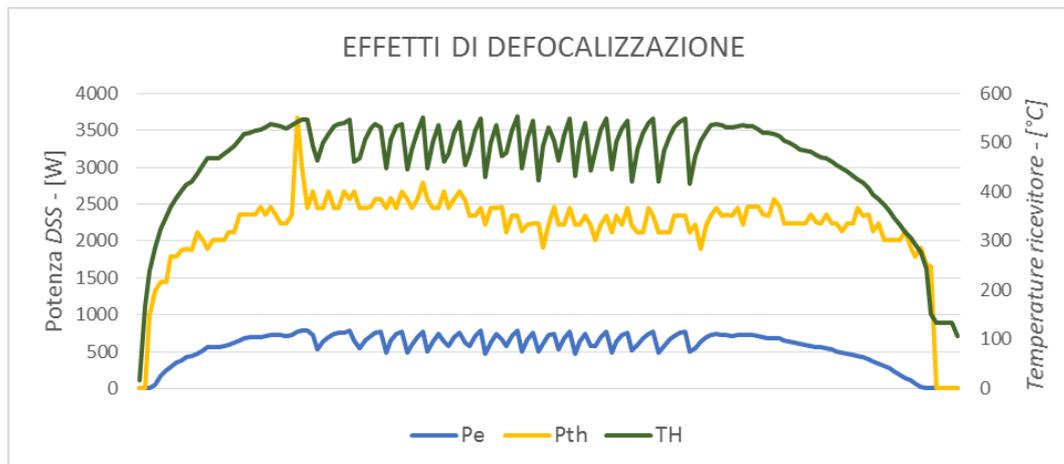


Fig. 39 Prospetto degli effetti della defocalizzazione automatica

4.3 CALCOLO DELLA RADIAZIONE DIRETTA

Il maggior limite nella realizzazione dell'analisi di funzionamento del *DSS* risiede nella mancanza di misure dirette della radiazione normale diretta DNI, potenza in ingresso al sistema. Ciò è dovuto al costo elevato delle apparecchiature di misurazione che rendono impensabile un loro acquisto in funzione di una più certa analisi del funzionamento della macchina. Si ripiega su altre metodologie che ne permettono la desunzione indiretta tramite informazioni di tipo statistico, fornite da enti governativi che dispongono degli strumenti adatti, o da correlazioni semi-empiriche.

Di quest'ultimi, la buona pratica prescrive l'utilizzo del metodo ClearSky che si basa su informazioni di torbidità atmosferica e caratteristiche legate alle variabili climatiche ed astronomiche tipiche della località. In mancanza di valori di input affidabili, tale calcolo complesso risulta essere instabile fornendo output oscillanti con singolarità inverosimili che ne invalidano l'utilizzo.

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

Dovendo ripiegare su dati di tipo statistico, si fa riferimento alle informazioni fornite gratuitamente dalla piattaforma PVGIS. In particolare i dati utili disponibili utili sono:

1. I valori di proporzione tra radiazione diffusa e globale totali misurate per ogni mese dell'anno disponibili su *Monthly Radiation* sotto la voce **D/G**.

2. I valori di radiazione diffusa attesa in ogni intervallo daytime della piattaforma *Daily Radiation* riportati sotto la voce **G_d**.

OPZIONE 1

La procedura basata sul rapporto diffusa su globale *D/G* proposta da *Monthly Radiation* prevede di assumere tale proporzione come costante e pari al valor medio dei valori mensili attesi

$$Diff.HI/GHI = \overline{D/G}_{monthly} = 0.388$$

Da cui, per definizione di radiazione diretta

$$DHI = GHI * (1 - 0.388)$$

Ed infine si risale al valore di radiazione diretta dalla componente incidente su piano orizzontale, tramite una semplice formula trigonometrica

$$DNI = DHI / \cos(\theta)$$

Dove θ è l'angolo di incidenza rispetto al piano orizzontale, quindi complementare dell'elevazione solare, calcolato tramite la formula

$$\theta = 90^\circ - \alpha_s$$

OPZIONE 2

La previsione basata sui dati *Daily Radiation*, invece, prevede di imporre la componente diffusa pari alla media dei valori riportati negli intervalli daytime delle giornate modello di tutti i mesi dell'anno. Pertanto analogamente all'opzione 1, la metodologia risulta essere:

$$Diff.HI = \overline{G_d} = 115.9W/m^2$$

$$DHI = GHI - Diff.HI$$

$$DNI = DHI/\cos(\theta)$$

SCelta DELLA RADIAZIONE DIFFUSA

Gli output delle due metodologie sono riportati in figura 40 e 41

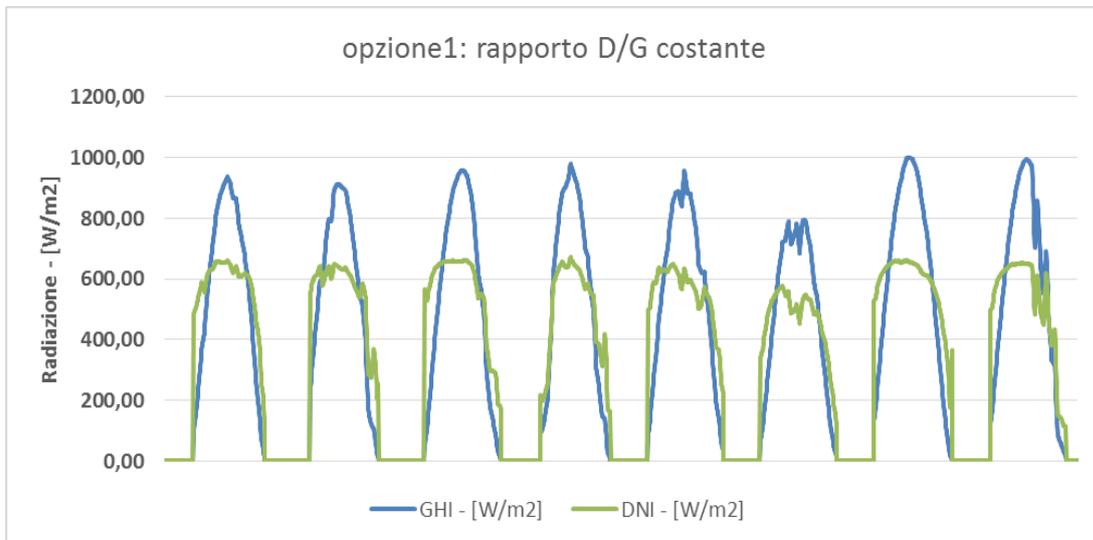


Fig. 40 Output del modello di calcolo della DNI: opzione a rapporto D/G costante

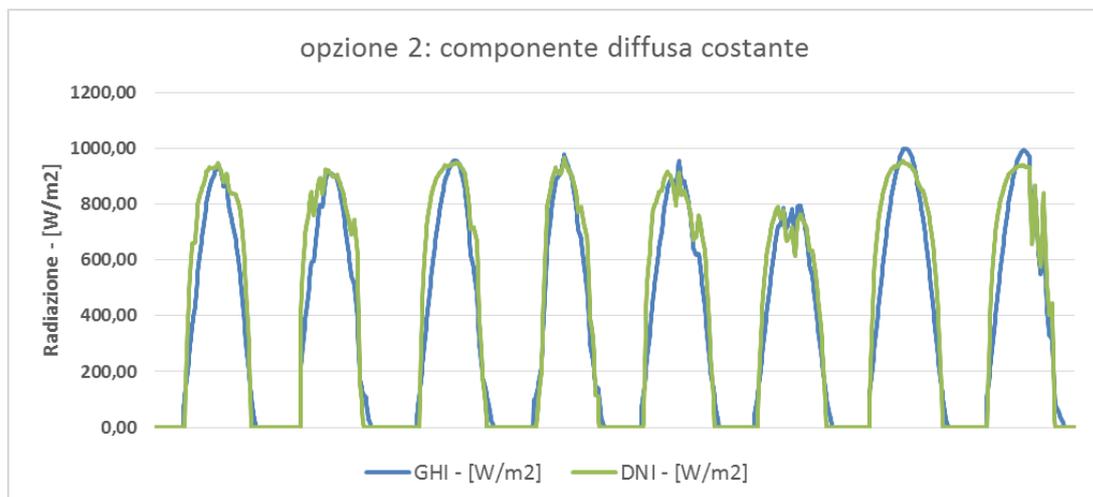


Fig. 41 Output del modello di calcolo della DNI: opzione a componente diffusa costante

L'opzione 1, oltre a fornire un output più stabile, si basa su una semplificazione di gran lunga più ammissibile, considerato che assumere la proporzione D/G pari ad una costante comporta un errore molto minore, come si osserva dagli andamenti di D/G e G_d riportati di seguito.

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

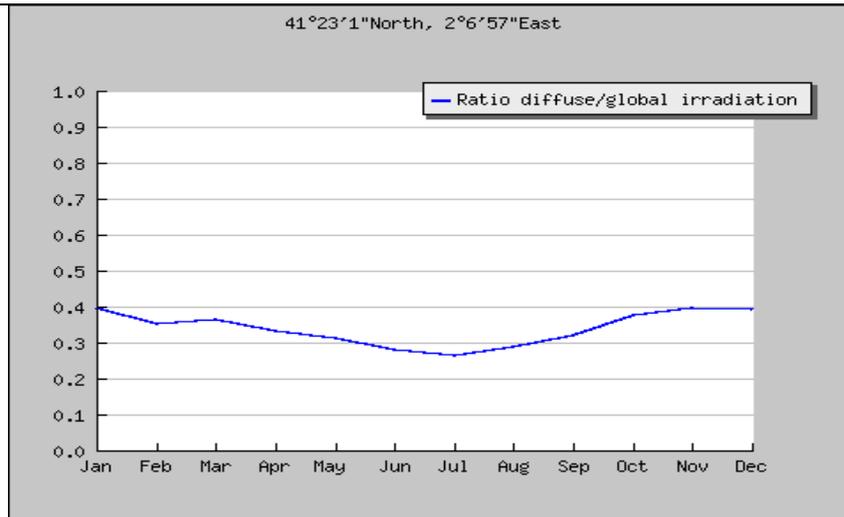


Fig. 42 Andamento del rapporto D/G nei mesi dell'anno secondo *Monthly Radiation*

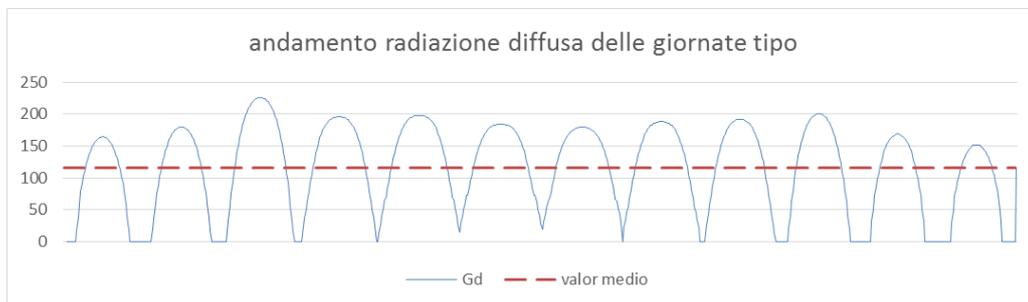


FIG. 43 ANDAMENTO DELLA RADIAZIONE DIFFUSA SECONDO *DAILY RADIATION*

4.4 STUDIO DELLE SOGLIE DI ATTIVAZIONE

Per un'analisi attendibile va tenuto conto del fatto che, per sua natura, il *DSS* non converte tutta la radiazione captata se non dopo un transitorio di avvio indispensabile al raggiungimento della soglia di attivazione. Qualora questa non dovesse essere raggiunta nell'arco dell'intera giornata, il sistema non produrrà alcuna potenza di uscita. La scheda tecnica non fornisce informazioni sul tempo di attivazione medio atteso ($t_{ATTIVAZIONE}$), temperatura di disattivazione ($T_{SPEGNIMENTO}$), ma soprattutto mancano informazioni sull'energia di attivazione ($E_{ATTIVAZIONE}$), dato indispensabile per l'analisi delle performance del sistema.

Al momento di valutare le soglie, va tenuto conto dei limiti dell'indagine, in quanto si adopereranno letture approssimative di misuratori

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

di sicurezza installati dalla casa produttrice con ben altri scopi (come la termocoppia del ricevitore per il controllo delle sovratemperature o anemometro per il monitoraggio delle velocità del vento critiche).

In particolar modo si noti che tali letture condensano tutte le instabilità e associati valori inverosimili nelle ore di attivazione e spegnimento, avvantaggiando lo studio di performance in funzionamento nominale, ma contaminando le soglie osservate, che in teoria dovrebbero presentare valori pressoché costanti.

Per la valutazione delle temperature di attivazione e spegnimento bisognerà riportare semplicemente la misura termometrica del primo ed ultimo intervallo di produzione di ogni giornata disponibile nel registro dati sperimentali ottenendo i risultati di figura 44.

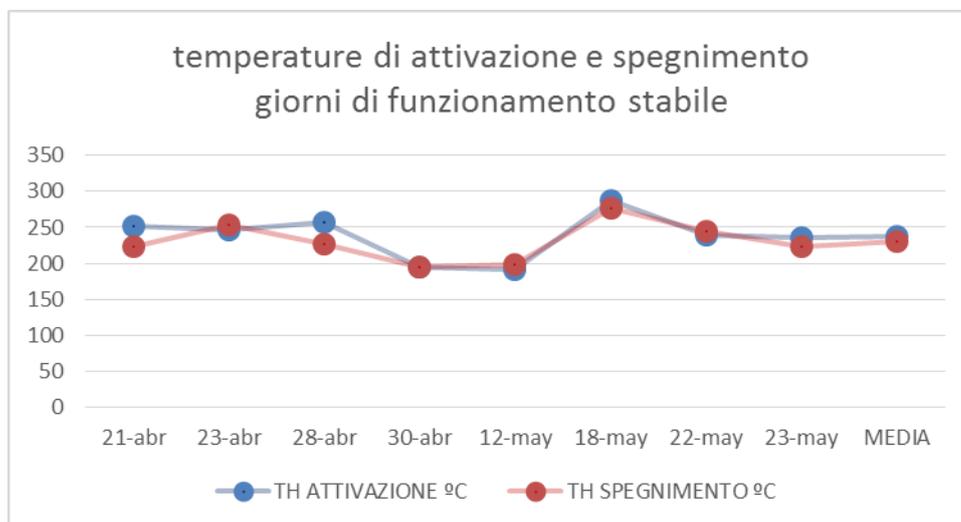


Fig. 44 Output sperimentale temperature d'attivazione

Il tempo di attivazione $t_{ATTIVAZIONE}$ viene, invece, calcolato moltiplicando per la durata dell'intervallo di campionamento (5 minuti) il numero di intervalli a DNI positivo antecedenti la prima produzione termica e/o elettrica, quindi assunti come transitorio di attivazione, secondo la formula

$$t_{ATTIVAZIONE} = 5min * n$$

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

Dove n è il numero di intervalli di campionamento del transitorio.

Infine l'energia di attivazione $E_{ATTIVAZIONE}$ si valuta come

$$E_{ATTIVAZIONE} = \sum_{i=1}^n Q_i$$

$$Q_i = DNI_i * A_{CN} * 5min$$

Dove A_{CN} è l'area di captazione netta dei collettori solari di valore $9.58m^2$.

L'andamento delle soglie di attivazione osservate è riportato in figura 45.

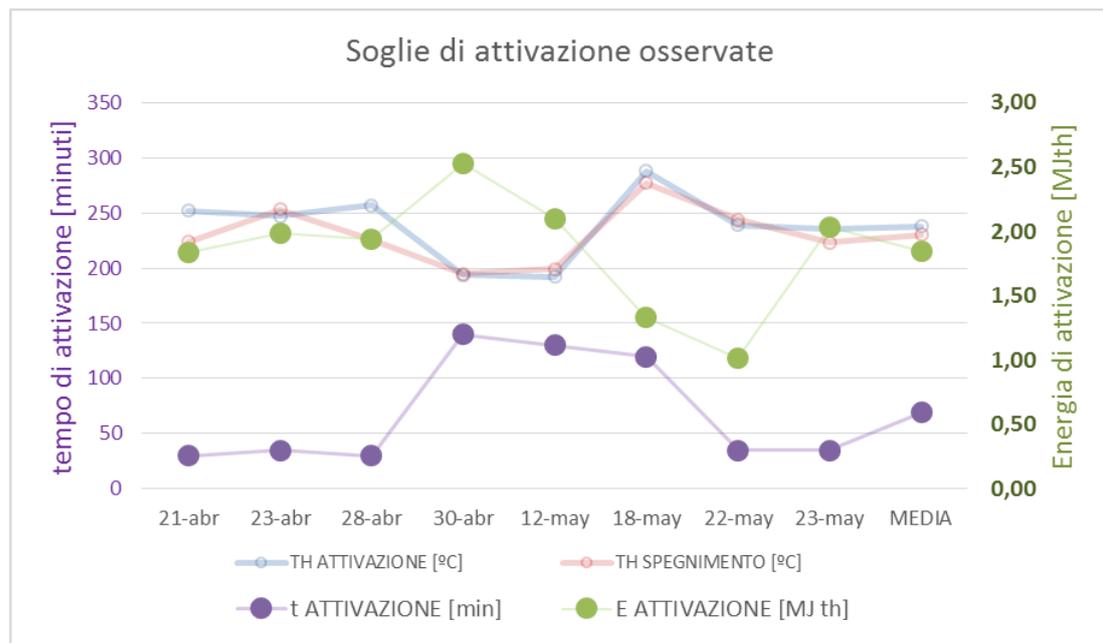


Fig. 45 Prospetto soglie d'attivazione osservate

Si osserva una maggiore variabilità dell'osservazione per tempi ed energie di attivazione, in particolare presentano valori più elevati nei medesimi giorni in cui le temperature di soglia sono lievemente inferiori.

Un'indagine riguardo le cause di tale variabilità, peraltro correlata, prescrive di tenere in conto che una parte, variabile anch'essa per l'appunto, dell'energia captata durante il transitorio di avvio viene dissipata per perdite termiche di tipo convettivo, fondamentalmente localizzate nel ricevitore. Si procede quindi con la valutazione della componente di perdita termica adoperando le letture dei misuratori di controllo già impiantati nel DSS. In questo risiede una grande

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

limitazione della nostra ricerca, che richiederebbe misuratori accurati disegnati ad hoc per una più accurata analisi del parametro in questione. D'altro canto, una qualunque manomissione degli strumenti presenti del sistema comporterebbe l'immediata invalidazione della garanzia full-service stipulata all'acquisto con il fornitore, pertanto la ricerca resta limitata alle letture riportate ad inizio di questo capitolo.

STUDIO DELLE PERDITE CONVETTIVE

Data la geometria del sistema risulta ovvio che la dissipazione di energia captata localizzata nel ricevitore sia fundamentalmente convettiva, scambiando per conduzione praticamente solo con il fluido di lavoro come da progetto e non potendo scambiare per irraggiamento se non con gli specchi del collettore. La geometria a cavità permette un miglior contenimento delle perdite per convezione forzata ma le elevate temperature operative impongono di tener conto anche le perdite per convezione naturale. Il valore della perdita per convezione nell'intervallo generico i è:

$$Q_{loss,i} = 5min * A_r * (TH - T_{amb}) * h_{conv}$$

Dove l'area del ricevitore viene calcolata come

$$A_r = (0.1m)^2 * \pi/4 = 0.00785m^2$$

Il coefficiente di scambio termico convettivo h_{conv} globale dipende dalle componenti di convezione forzata e convezione naturale secondo la formula

$$h_{conv} = \sqrt[3]{h_f^3 + h_n^3}$$

Dagli studi condotti dal dipartimento, la correlazione più adatta per valutare il coefficiente di convezione forzata è la seguente

$$h_f = 7.605 \frac{Wm^{-2}K^{-1}}{m/s} * v_{vento}$$

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

Mentre per ricavare il coefficiente di convezione naturale, la bibliografia prescrive differenti correlazioni a seconda del valore del numero di Rayleigh [46], definito come:

$$Ra_L = \frac{g\beta L^3}{\nu\alpha} * (T_w - T_\infty)$$

Dove g è la costante d'accelerazione gravitazionale ($9.822m/s^2$); L è la lunghezza caratteristica della superficie che nel caso di geometria circolare come nel nostro caso si valuta con la seguente formula [46]

$$L = A_r/p_r = 0.025m$$

T_w e T_∞ sono rispettivamente la temperatura della superficie TH e la temperatura ambiente T_{amb} ; i fattori β, α e ν sono invece parametri termofisici dell'aria, ossia coefficiente volumetrico di dilatazione termica, diffusività termica e viscosità cinematica [46]. Tali parametri sono tabulati e, a pressione atmosferica approssimata ad $1bar$, dipendono dalla temperatura del fluido termovettore in questione [47]. In mancanza di una base di dati che permetta l'accesso automatico ai valori termofisici dell'aria da parte del calcolatore per ogni intervallo di campionamento, si assumono valori medi nell'intervallo di temperature di interesse. In particolare si assuma una temperatura media dell'aria in prossimità del ricevitore caldo di $200^\circ C$ circa. L'approssimazione è lecita data la scarsa variabilità dei parametri in questo range di temperature [47].

Si assumano valori medi pari a

$$\beta = 2,15 * 10^{-3} K^{-1},$$

$$\alpha = 503 * 10^{-6} m^2/s$$

$$\nu = 354 * 10^{-6} m^2/s.$$

Si osservano valori del numero di Rayleigh di massimo $953'451$, ben al di sotto della soglia critica dei $Ra_L = 2 * 10^8$, pertanto la bibliografia prescrive la correlazione di Fuji-Imura per flusso uniforme su pareti orizzontali [47].

$$Nu_m = 0.13(Ra_L)^{\frac{1}{3}}$$

Dove il valore del numero di Nusselt medio equivale per definizione a

$$Nu_m = \frac{h_n L}{k_A}$$

Con k_A definita come la conduttività termica dell'aria che, analogamente ai precedenti parametri, da tabella termofisica mostra essere poco variabile nel range di quindi assunta costante pari ad un valore medio di

$$k_A = 37,9 * 10^{-3} W/mK.$$

Una volta desunto il valore di h_n e, di seguito, h_{CONV} e $Q_{loss,i}$, l'energia di attivazione corretta viene calcolata come

$$E_{ATTIVAZIONE,CORR} = \sum_{i=1}^{n^{\circ}} [(Q_i - Q_{loss,i}) * 5min * A_{CN}]$$

Dai risultati riportati in figura 46 e 47, si denota un andamento coerente con i valori non corretti qualora questi fossero già più che attendibili. Nelle giornate in cui le prime valutazioni di tempo ed energia di attivazione riportavano valori anomali, la correzione comporta risultati del tutto inattendibili suggerendo problematiche nelle letture dei misuratori in tali giorni, invalidando di fatto l'applicazione della correzione per scambio convettivo.

Si opta pertanto per l'ammettere una variabilità delle soglie, dovute per lo più alle incertezze di misurazione, senza applicare correzioni che non comportano alcun miglioramento alle tendenze ottenute.

Pertanto le soglie di funzionamento ricercate vengono assunte pari a

- $T_{ATTIVAZIONE} = 238 \text{ }^{\circ}C$
- $T_{SPEGNIMENTO} = 230 \text{ }^{\circ}C$
- $t_{ATTIVAZIONE} = 70 \text{ min}$
- $E_{ATTIVAZIONE} = 1,84 \text{ MJ}_{th} = 0,51 \text{ kWh}_{th}$

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

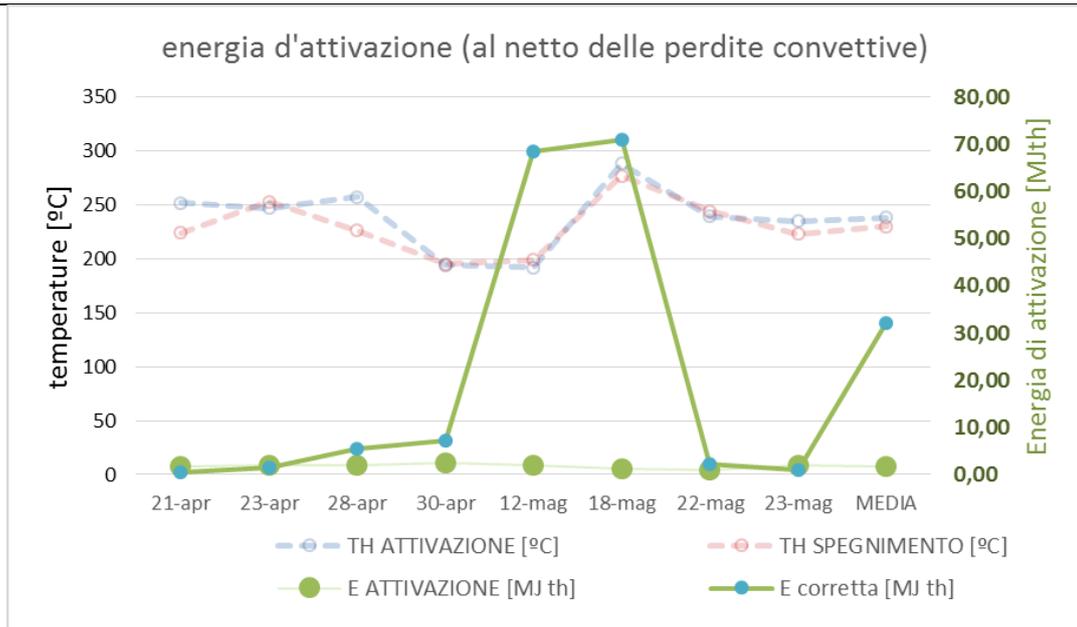


Fig. 46 Prospetto soglie d'attivazione al netto delle perdite convettive

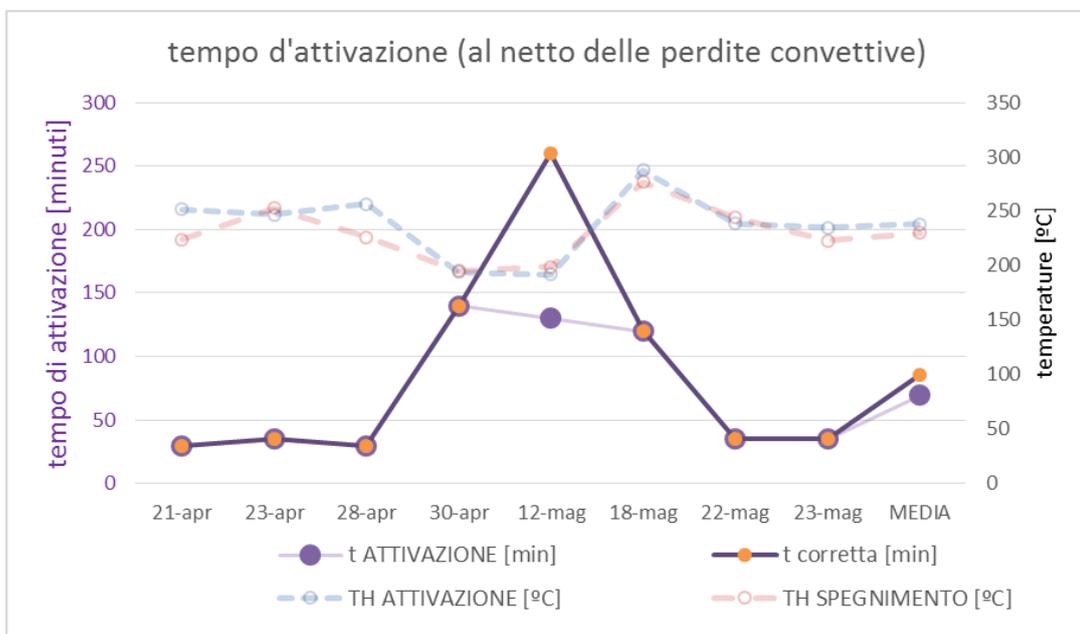


Fig. 47 Prospetto tempo di attivazione al netto delle perdite convettive

4.5 VALUTAZIONE DELLE PERFORMACE

Per ottenere un valore quanto più veritiero possibile di rendimento in funzionamento nominale, termico ed elettrico, si prendono in esame tutti e soli i punti di funzionamento nominale registrati, filtrandone gli sporadici intervalli outlier che riportino valori anomali di rendimento istantaneo. In

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

particolare si ignorano i dati con rendimenti termici e/o elettrici inferiori a 1%; fortunatamente, questi si condensano negli intervalli di attivazione e spegnimento, potendoli considerare errori di lettura o margini dei transistori di accensione e spegnimento.

La metodologia per ricavare rendimento elettrico e termico prevede l'intavolazione di regressioni lineari delle dispersioni di punti $P_e = f(Q)$ e $P_{th} = f(Q)$ riportate nelle figura 48 e 49.

I rendimenti overall ottenuti dalla ricerca, indicativi delle differenti condizioni di carico ma sempre in funzionamento nominale, sono:

$$\eta_{elettrico} = 11\%$$

$$\eta_{termico} = 37\%$$

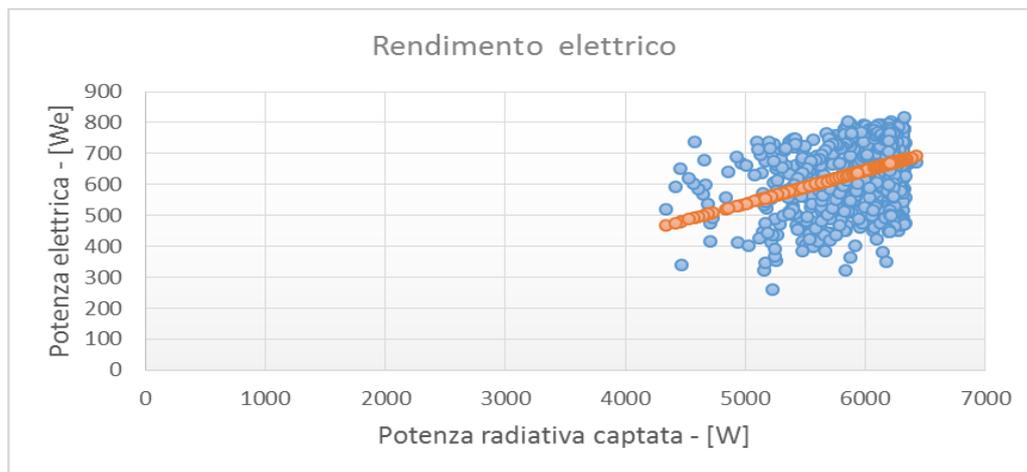


Fig. 48 Regressione lineare per il rendimento elettrico

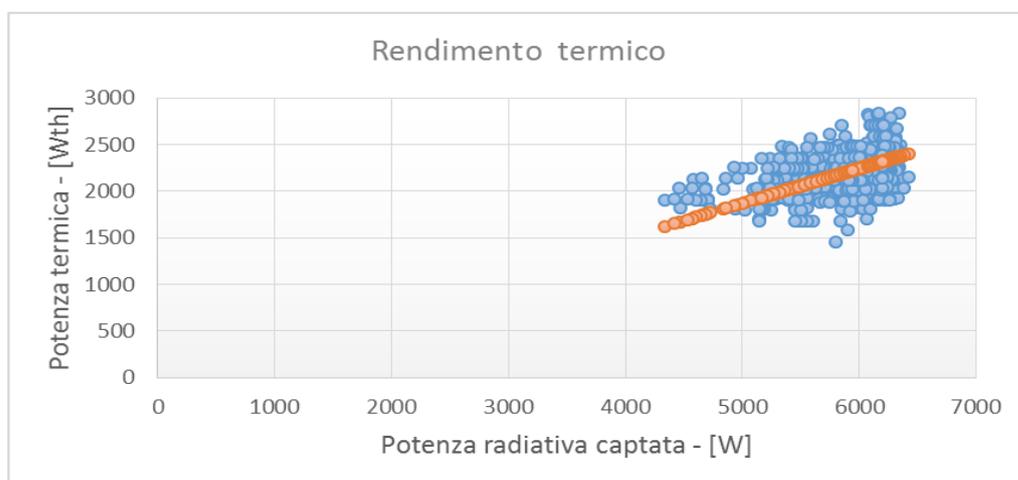


Fig. 49 Regressione lineare per il rendimento termico

Analisi sperimentale di un sistema microcogenerativo Dish Stirling

il valore di controllo di regressione assume valori pressoché ottimali

$$R_{Adj,elettrico}^2 = 97,19\% \qquad R_{Adjusted,termico}^2 = 98,95\%$$

Osserviamo valori inferiori ai rendimenti certificati dalla casa produttrice, costituendo un primo importante risultato dell'analisi sperimentale operata. Avendo escluso qualunque punto di funzionamento che non fosse ottimale si è inoltre prevenuta l'inferenza di effetti di contorno, potendo pertanto certificare che alla luce della breve sperimentazione disponibile, le performance del sistema *DSS* sono inferiori alle previsioni anche in funzionamento ottimale. Si rimanda ad ulteriori campagne dati di comprovare tale risultato, sulla base di una database di maggiore estensione che permetta di valutare l'efficienza con maggiore affidabilità.

I successivi paragrafi di previsione di produzione e redditività economica assumeranno come dato i risultati ad ora ottenuti.

4.6 PRESENTAZIONE DELL'ALTERNATIVA TRADIZIONALE

Per una valutazione di produzione e redditività più significativa, si opta per una comparativa con la soluzione di microcogenerazione solare tradizionale tipicamente adoperata. Trattasi di un sistema ibrido composto da pannelli fotovoltaici d'ultima generazione combinati con collettori solari dotati di accumulatore solar tank.

Data la vastissima offerta disponibile, si è ritenuto opportuno ottenere informazioni e schede tecniche dei componenti interpellando direttamente le imprese leader nel mercato, ottenendo un vero preventivo disponibile a chiunque operi nel settore o valuti un possibile investimento. La scelta tra le varie concorrenti è ricaduta sulla *Sunpower*, multinazionale statunitense fondata dall'1985 dal Dott.Swanson, leader mondiale nei sistemi di generazione solare. Il sistema proposto dalla succursale locale *Sud Energies*

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

renovables è riportato in dettaglio nelle schede tecniche in appendice 2. Data la modularità dei sistemi in questione è stato possibile progettare una soluzione ad hoc per il carico richiesto cercando, nei limiti delle disponibilità commerciali, di equiparare l'alternativa tradizionale ai carichi nominali del *DSS*, richiedendo potenze di picco di $1kW_e$ e $3kW_{th}$.

Data la vastità della documentazione e della esperienza pregressa in tema di dispositivi tradizionali, si assumono come affidabili i dati forniti dalle case produttrici.

COLLETTORE SOLARE

Per la previsione il complesso prevede l'installazione di 3 collettori solari del tipo *SKR500* prodotti dalla *Sonnenkraft* riportato in figura 50.



Fig. 50 Collettore solare termico Sonnenkraft SKR500

La scheda tecnica descrive un collettore piano di misura $1,24m \times 2,079m$, per una superficie captativa effettiva di $2,26m^2$ con potenza di picco di $1057W_{th}$, per un totale di $3,171kW_{th}$ installati con area di captazione complessiva di $6,78m^2$. Altro dato fondamentale fornito dalla produttrice è l'andamento delle performance del collettore, prevedibili per mezzo della formula

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

$$\eta_c = \eta_c^o - A1 * \frac{T_m - T_{amb}}{G} - A2 * \frac{(T_m - T_{amb})^2}{G}$$

Dove η_c^o è il rendimento ottico in condizioni nominali STC di 25°C, 1000W/m² e distribuzione spettrale di 1,5, mentre le costanti A1 e A2 sono coefficienti empirici per la correzione del rendimento per generici valori di temperatura ambientale T_{amb} e radiazione globale G , rispettivamente di valori

$$A1 = 3,821W/m^2K \qquad A2 = 0,0108W/m^2K^2$$

Infine T_m è la temperatura media del fluido all'interno del collettore. Chiaramente tale valore manca in una sperimentazione virtuale come quella operata per l'alternativa tradizionale. Si ovvia all'inconveniente assumendola costante e pari al valor medio della temperatura media riportata dal fluido termovettore in ingresso ed uscita dal solar tank.

$$T_m = 40^\circ C$$

Il valore di rendimento ottico riportato nella scheda tecnica $\eta_c^o = 0,82$ è stato valutato senza considerare il fattore correttivo dell'angolo d'incidenza IAM (Incidence Angle Modificator) che nella documentazione disponibile assume un valore $IAM_{50^\circ} = 0,96$ valutato per un angolo di incidenza $\theta = 50^\circ$. Tenendo conto del fattore IAM il vero rendimento ottico del collettore si calcola come:

$$\eta_c = 0,82 * IAM_{(\theta)}$$

Dove il valore di $IAM_{(\theta)}$ variabile in funzione dell'angolo di incidenza si valuta tramite la funzione interpolante:

$$IAM_{(\theta)} = 1 - IAM_{0^\circ} * \frac{1}{\cos(\theta) - 1}$$

Imponendo un valore di $IAM = 0,96$ per un angolo di incidenza $\theta = 50^\circ$ si ottiene il corrispettivo valore a 0° : $IAM_{0^\circ} = -0,0143$.

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

In conclusione sarà necessario valutare il rendimento del collettore per ogni intervallo di tempo daytime offerto dalla previsione *Daily Radiation* secondo la formula:

$$\eta_c = \eta_c^0 * IAM_{(\theta)} - A1 * \frac{T_m - T_{amb}}{G * \cos(\theta)} - A2 * \frac{(T_m - T_{amb})^2}{G * \cos(\theta)}$$

L'angolo di incidenza θ rispetto ad una superficie fissa inclinata di un angolo χ rispetto all'orizzontale, che nel nostro caso $\chi = I_{opt} = 37^\circ$, e di generica orientazione azimutale ψ_s si calcola secondo la seguente formula trigonometrica [48]

$$\cos\theta = \cos\alpha_s * \cos\gamma_s * \sin\chi + \sin\alpha_s * \cos\chi$$

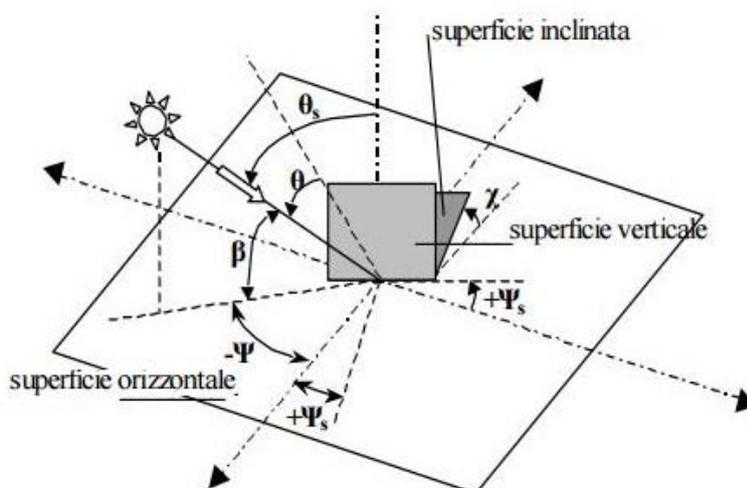


Fig. 51 Schema geometrico per il calcolo dell'angolo di incidenza θ

PANNELLO FOTOVOLTAICO

Per la generazione elettrica si propone un array di 3 pannelli tipo X21 - 335 PANEL prodotti dalla stessa Sunpower dalla potenza nominale di picco in condizione STC pari a $P_e^{nom} = 335W_e$ per un totale di $3 * 335 = 1,005kW_e$ installati con un area complessiva di $3 * (1,049m * 1,559m) = 4,906m^2$. Per i pannelli fotovoltaici non sono disponibili curve di funzionamento, ma solo un rendimento overall garantito di $\eta_{PV} = 21,5\%$. La fornitrice prevede che tale rendimento resti invariato per i primi dieci anni di funzionamento dopo i

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

quali riporterà un decadimento dello 0,8% annuo. In appendice 2 si riporta la scheda tecnica del pannello, riportato in figura 52.



Fig. 52 Array di pannelli fotovoltaici SunPower X21-335

4.7 PREVISIONE DELLE PRODUZIONI ANNUALI

In primis si riassumono le costanti, bibliografiche e/o sperimentali, adoperate nel modello:

- *Rendimento elettrico DSS (in funzionamento)* $\eta_e = 11\%$
- *Rendimento termico DSS (in funzionamento)* $\eta_{th} = 37\%$
- *Energia di attivazione* $E_{ATTIVAZ.} = 0,51 kWh_{th}$
- *Area di captazione netta* $A_{CN} = 9,85 m^2$

- *Rendimento overall fotovoltaici* $\eta_{PV} = 21,5\%$
- *Area di captazione PV* $A_{PV} = 4,906 m^2$

- *Rendimento ottico del CS* $\eta^{\circ}_c = 82\%$
- *Area di captazione CS* $A_{CS} = 6,78 m^2$
- *Temperatura media fluido termovettore* $T_m = 40^{\circ}C$

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

Come preannunciato, la previsione annuale di produzione si avvale dei profili *Daytime* delle giornate modello di ogni mese dell'anno fornite dalla piattaforma *Daily Radiation*. In particolare per ogni intervallo da 15 minuti dalle 05:22 alle 19:07 si riportano dati di:

- Intervallo di tempo
- $G [W/m^2]$ Radiazione globale sul piano inclinato fisso
- $DNI [W/m^2]$ Radiazione normale diretta
- $T_{amb} [^{\circ}C]$ Temperatura ambiente attesa

Per ognun intervallo sarà calcolato l'angolo d'incidenza solare θ (come riportato nel paragrafo precedente) e, quindi, il rendimento del collettore a temperatura ambiente data.

A valle di ognuna delle dodici giornate modello è quindi possibile valutare:

- Energia termica da collettore solare

E' sommatoria delle produzioni termiche previste in ogni intervallo

$$E_{CS} = \sum E_{CS,i}$$
$$E_{CS,i} = t * A_{CS} * G_i * \eta_{C,i}$$

Dove $t = 1/4 h$ è la durata dell'intervallo di tempo, mentre il rendimento del collettore $\eta_{C,i}$ viene calcolato per ogni intervallo generico i secondo le formule del paragrafo precedente.

- Energia elettrica da pannello fotovoltaico

$$E_{PV} = A_{PV} * \eta_{PV} * t * \sum G_i$$

- Energia elettrica e termica da DSS

$$E_e = \eta_e * Q_{utile}$$

$$E_{th} = \eta_{th} * Q_{utile}$$

Dove il valore di radianza diretta utile si valuta come

$$Q_{utile} = \sum (DNI_i * A_{CN} * t) - E_{ATTIVAZIONE}$$

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

Moltiplicando ogni risultato per i giorni del mese in questione si ottiene un prospetto della produzione annuale attesa.

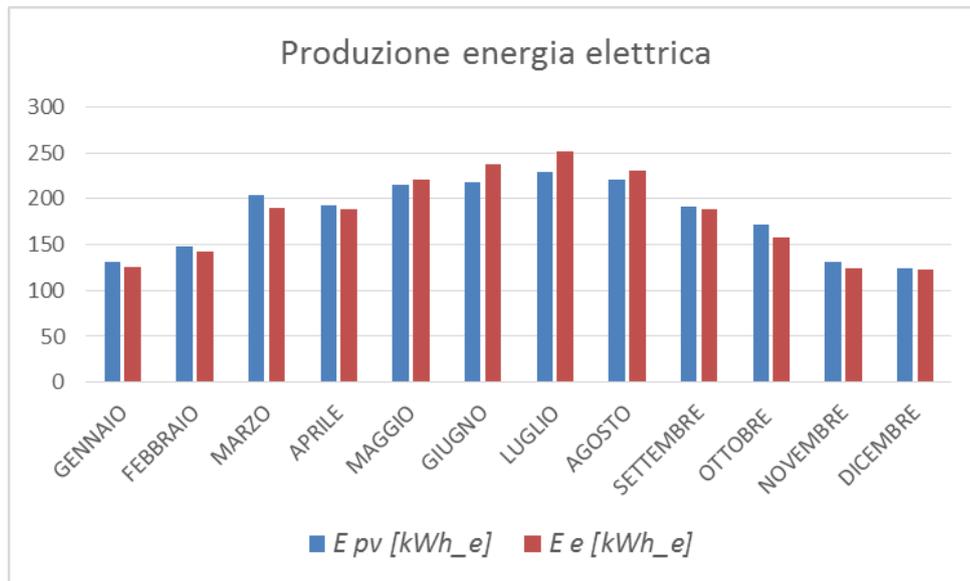


Fig. 53 Prospetto di produzione elettrica annuale attesa

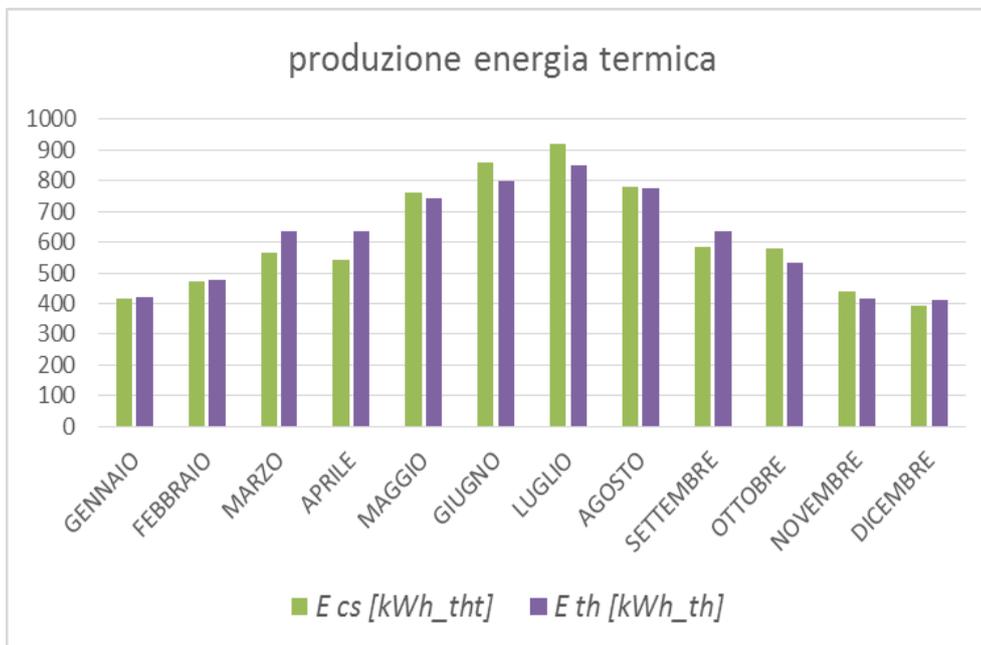


Fig. 54 Prospetto di produzione termica annuale attesa

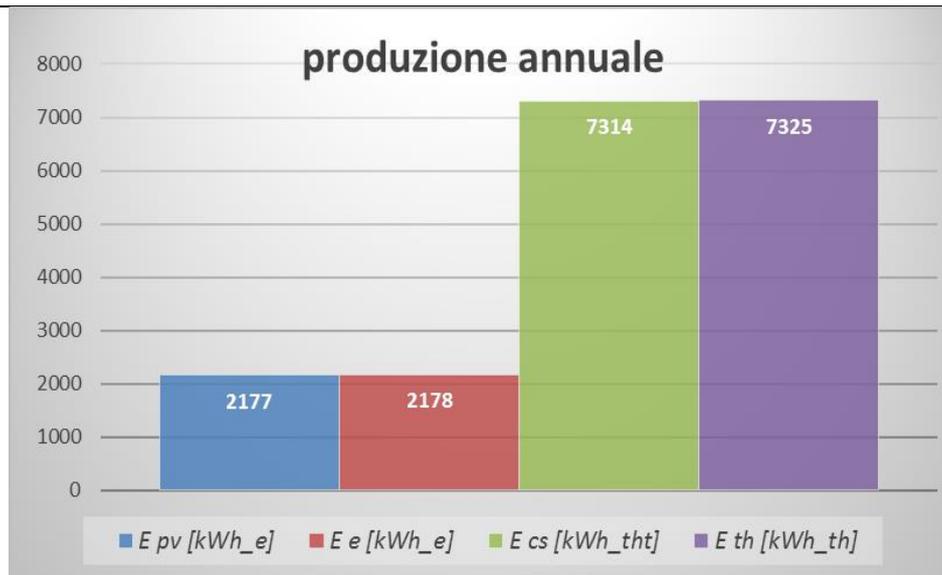


Fig. 55 Produzione annuale attesa per le differenti tecnologie

4.8 ANALISI DI REDDITIVITA'

Una analisi comparativa completa della redditività degli investimenti prevede la valutazione di NPV, TIR e prezzo dell'energia per ottenere un pareggio a termine della vita utile stimata di 15 anni.

All'estrapolare tale previsione nel corso dell'orizzonte temporale di 15 anni, conformemente a quanto previsto dalla *SunPower*, ci si attende un calo della produzione da fotovoltaico dell'8% annuo dopo l'anno 10.

Per procedere con i conti economici, si assumono valori di investimento iniziale e manutenzione come riportati nei preventivi delle imprese, per il sistema tradizionale, e nel report di progetto operativo per il *DSS*.

- Capitale di investimento iniziale del *DSS*, comprensivo di sistemi ausiliari di controllo, gestione e sicurezza ammonta $I_{DSS} = 43'580\text{€}$
- Costo di manutenzione *DSS*, inteso come servizio di pulizia e monitoraggio di funzionalità non inclusi nel contratto full-service stipulato con la fornitrice, ammonta a $M_{DSS} = 484\text{€/anno}$

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

- Investimento iniziale per il sistema tradizionale fotovoltaico - solare termico comprensivo di installazione, ausiliari e contratto di manutenzione (tipologia chiavi in mano, da pagare all'anno zero) risulta complessivamente di $(I + M)_{CS+PV} = 29'458€$

Le altre costanti necessarie per eseguire l'analisi sono il prezzo dell'energia elettrica, il prezzo dell'energia termica e il tasso di attualizzazione. Si assumono valori classici tratti dalla bibliografia, tipici per il settore. In particolare

- Prezzo dell'energia elettrica $p_{z_e} = 0,12€/kWh_e$ [50]
- Prezzo dell'energia termica $p_{z_{th}} = 0,10€/kWh_{th}$ [51]
- Tasso di attualizzazione $k = 3,28%$ [49]

Infine vanno segnalate altre assunzioni necessarie per la procedura, come:

- Tutta la potenza generata viene consumata, senza esuberi che comporterebbero un mancato risparmio in bolletta.
- L'IVA non è in alcun modo recuperabile, trattandosi di un istituto universitario.
- Si trascurano i costi associati all'allacciamento alla rete.
- Per un'analisi preliminare, si trascurano voci di tassazione
- Come base di interesse risk-free si assume un valore $k_{risk-free} = 1,64%$, pari al tasso dei titoli di stato decennali emessi dal governo spagnolo nel maggio 2015 [52]. Per giungere al valore di tasso di attualizzazione si considera un componente da rischio k_{risk} pari al 100% di $k_{risk-free}$

Si definisce NPV , o valore attualizzato netto, la somma dei cash flow annuali CF_i attualizzati con tasso k a valle della vita utile VU al netto dell'investimento iniziale I_0

$$NPV = -I_0 + \sum_{i=1}^{VU} \frac{CF_i}{(1+k)^i}$$

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

Si riporta l'andamento del *NPV* al variare dell'anno *i* per una *VU* imposta a 15 anni.

$$NPV_{DSS} = -37,74 \text{ €}$$

$$NPV_{CS+PV} = -18,19 \text{ €}$$

Si osserva che, sotto le assunzioni elencate ad inizio paragrafo, nessuno dei due investimenti giunge a pareggio nell'arco di 15 anni. Di fatto entrambi i sistemi sono progettati per un vita utile ben più lunga, in particolare 25 anni garantiti per il sistema tradizionale mentre i sistemi *DSS* implementati in altre sperimentazioni hanno raggiunto fino a 35 anni di produzione (come i vari *Eurodish & Distal I* documentato nel capitolo 2).

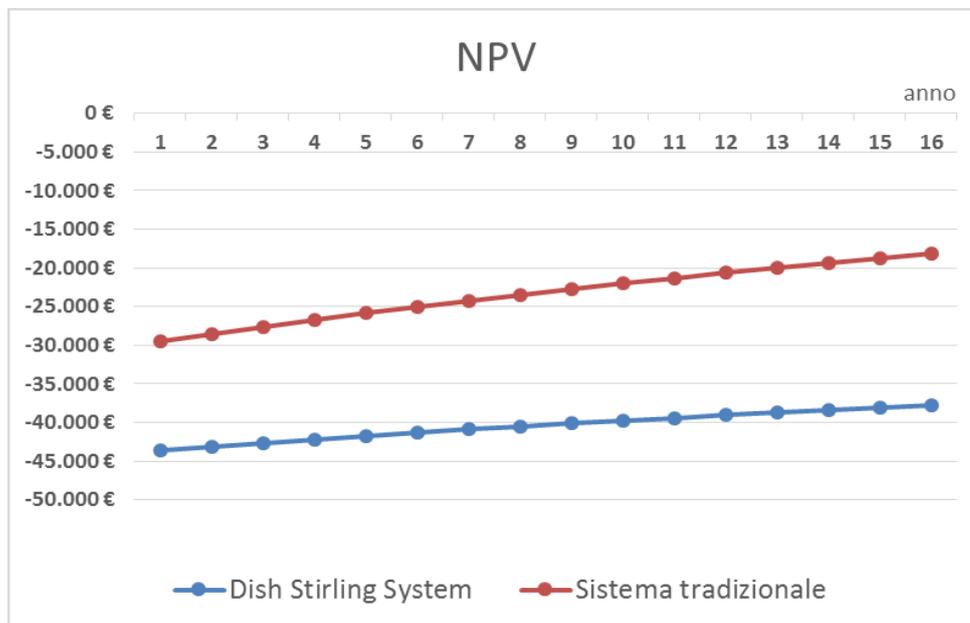


Fig. 56 Net Present Value delle due tecnologie a confronto (VU 15 anni)

Si noti che, generalmente, un *PayBackTime* di 25 anni è la soglia oltre alla quale un investimento di questo tipo incontra forti difficoltà di nella ricerca di finanziamento, come accadde per i differenti tentativi fallimentari di implementazione industriale di *DSS*.

I rendimenti valutati sperimentalmente, inoltre, sono inferiori ai valori garantiti dalla casa produttrice ossia 42% di rendimento termico e 13%, contro i 11% e 37%, secondo i quali il trend di *NPV* sarebbe

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

$$NPV_{DSS,INNOVA} = -35.541 \text{ €}$$

Tale divergenza può essere imputata alle difficoltà di misurazione ed attendibilità dello studio, come commentato nei paragrafi precedenti, ma anche alla ristretta finestra d'osservazione non essendo disponibili dati sul comportamento reale della macchina nell'arco di 12 mesi.

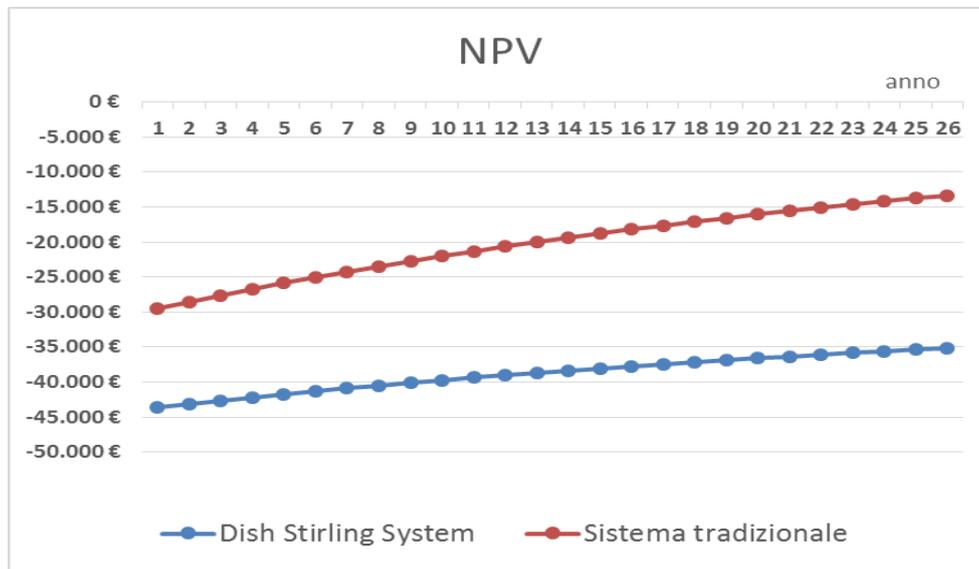


Fig. 57 Net Present Value delle due tecnologie a confronto (VU 25 anni)

L'insuccesso del sistema tradizionale, che ad oggi risulta essere una realtà industriale molto diffusa, sottolinea la strettezza delle ipotesi assunte in principio di analisi di redditività, riguardanti il tasso d'attualizzazione, la reale remunerazione di energia da fonte solare, ignorando qualunque sistema di inventivo governativo. Tale analisi pertanto resta strettamente legata ad un ambito tecnico da cui successivamente desumere gli strumenti economici per vincere l'iniziale difficoltà allo sviluppo di una tecnologia innovativa, qualora dovesse essere giudicata promettente, come nel caso del *DSS*.

Un ulteriore strumento adoperato per l'analisi di redditività degli investimenti è il *tasso interno di rendimento* definito come il tasso di attualizzazione tale per cui l'*NPV* risulta nullo. Tramite strumenti numerici di ottimizzazione di sistemi non lineari, si ottiene il valore

Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

$$TIR_{DSS} = -16,74\%$$

Valori negativi di TIR , concordi con l' NPV , esprimono il medesimo output di non redditività dell'investimento date le condizioni al contorno imposte. Risulta comunque avere la sua utilità, essendo alla base della stima delle misure di incentivo necessarie a promuovere la tecnologia.

L'intervento da regolatore più diffuso nel campo dell'energie alternative è la remunerazione del kWh_e prodotto a prezzo fissato, garantito dalla legislazione per un arco temporale ben definito. Riadoperando i medesimi sistemi di ricerca operativa si desume il "prezzo di indifferenza" dell'energia elettrica tale per cui l'investimento in DSS riporta NPV nullo è

$$pz_{e,indiff.}^{(15anni)} = 1,60 \text{ €/}kWh_e$$

Valore del tutto irrealistico alle condizioni di mercato vigenti, ma riferito ad una vita utile di 15 anni. Estendendo l'orizzonte temporale a 35 anni si ottiene

$$pz_{e,indiff.}^{(25anni)} = 1,07 \text{ €/}kWh_e$$

Ovvero, limitatamente a DSS che abbiano riportato funzionalità nominali per una vita utile di 25 anni (vedi cap.3), per spianare la strada alla diffusione sul larga scala, si potrebbe impiegare un extra nella remunerazione dell'energia elettrica di

$$\Delta pz_e^{25anni} = pz_{e,indiff.}^{(25anni)} - pz_e = 0,96 \text{ €/}kWh_e$$

Cifra significativa che riassume la vera difficoltà dell'ingresso nel mercato della tecnologia DSS .

CONCLUSIONI

La tecnologia *DSS* risulta molto promettente offrendo in teoria una soluzione di produzione efficiente. Purtroppo è ad oggi gravemente svantaggiata dalla componente economica.

I dischi Stirling richiedono un investimento elevato in relazione alla potenza generata; sebbene riporti rendimenti migliori di altre concorrenti, non si avranno progetti proficui finché non verranno abbattuti i costi iniziali. Questo presuppone lo sviluppo di un indotto industriale che fornisca le varie componenti a prezzi competitivi per mezzo della produzione in massa.

Come già avvenne per altre tecnologie innovative, tale traguardo verrà raggiunto per mezzo di incentivi statali che favoriscano la diffusione degli investimenti in una tecnologia pulita, efficiente, rinnovabile e scevra da qualunque concorrenza per l'utilizzo delle superfici (si ricordi che altre tecnologie richiedono superfici più ampie sottraendole ad altre attività).

Qualora enti governativi dovessero riconoscere le opportunità che si celano dietro una diffusione del *DSS*, si istituiranno strumenti di incentivo per facilitare la difficile rampa iniziale.

A tal fine saranno certamente necessari studi più approfonditi che non soffrano i limiti di ricerca di questo lavoro. Innanzitutto si prescrive una finestra temporale più ampia che non richieda l'estrapolazione delle performance lungo la durata di un intero anno, ottenendo valori di rendimento, produzione e soglie d'attivazione certi. In secondo luogo si faccia affidamento ad inventario di misuratori più completo e preciso di quello installato di serie dalla casa produttrice a meri scopi di sicurezza, primo tra tutti il misuratore di

Analisi sperimentale di un sistema microcogenerativo Dish Stirling

radiazione diretta che metta luce sulle incertezze riguardo l'input DNI, base fondante dello studio.

Si riconosce che, nell'intervallo di confidenza dei valori ottenuti, le curve di funzionamento proposte dalla *INNOVA* risultano realistici e non si ha alcuna evidenza di sovrastime da parte della casa.

Si spero che il lavoro sia di aiuto a future ricerche più approfondite nel campo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] International Energy Agency, . Energy Technology Perspectives 2010: Scenarios & Strategies to 2050. 1a ed. Paris: Soregraph, 2010. 710 p. ISBN: 978-92-64-08597-8.
- [2] Masters, Jeff. “El comportamiento anómalo de la corriente en chorro”. Investigación y Ciencia. 2015, núm. 461, p. 52–59.
- [3] Casals, Martí Rosas y Garreta, Jaime Cendra. Energia Solar Tèrmica. 3a ed. Edicions UPC, 2013. ISBN: 978-8-476539-78-1.
- [4] Mitjá, Albert y Batalla, Enric. *Manual de radiación solar: Tablas para catalunya*. Volume I. 1a ed. Barcelona: Prensa XXI S.A., 1982. ISBN: 84-86052-00-9.
- [5] Prieto García, Jesús Ignacio. Fundamentos y aplicaciones de la energía solar térmica. 2a ed. Oviedo: Universidad de Oviedo. Servicio de Publicaciones, 1998. ISBN: 84-7468-966-X.
- [6] Aguiar, R, Collares Pereira, M et al.. Solar energy: The state of the art: ISES position papers. Gordon, Jeffrey1a ed. London: James & James (Science publishers), 2001. ISBN: 1-902916-23-9.
- [7] M. Ibáñez, Plana, Rosell Polo, J.R y Rosell Urutia, J.I. Tecnología solar. 1a ed. Madrid: Mundi-Prensa, 2005. ISBN: 84-8476-199-1.
- [7] Kearney, A. T y Estela, . Solar thermal electricity 2025. 2010. .
- [9] Nocera, Daniel G y Lewis, Nathan S. “Powering the planet: Chemical challenges in solar energy utilization”. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2007, vol 104, núm. 42, .
- [10] EASAC, . Concentrating solar power: its potential contribution to a sustainable energy future. 2011. .

- [11] IEA, . Technology roadmap concentrating solar power. 2010. .
- [12] International, Greenpeace, SolarPACES, y ESTELA, . Concentrating solar power global outlook 09. 2009. .
- [13] Deign, Jason. What happened to Tessera Solar’s projects. 2011. Disponible online: «<http://social.csptoday.com/markets/whathappened-tessera-solars-projects>»
- [14] Hashem, Heba. Dish Stirling for Dubai. 2014. Disponible online: «<http://social.csptoday.com/markets/dish-Stirling-dubai>» [Consultato in data: 2015-02-23].
- [15] Shendage, D. J, Kedare, S. B y Bapat, S. L. Design Issues of 1.5 kWe Solar Dish Stirling Engine. Bombay: .
- [16] Plataforma Solar de Almería - Objetivos. Disponible online: «<http://www.psa.es/webesp/gen/objetivos.php>» [Consultato in data: 2015-04-01].
- [17] Plataforma Solar de Almería: DISCOS PARABÓLICOS Disponible online: «<https://www.psa.es/webesp/instalaciones/discos.php>» [Consultato in data: 2015-04-01].
- [18] Schlaich Bergermann & Partner GbR, . EuroDish - Stirling System Description. Stuttgart: 2001. 1–9 p. .
- [19] Zweibel, Ken, Mason, James y Fthenakis, Vasilis. “Solar Grand Plan”. Scientific American. 2008, vol 30, núm. 1, p. 64–73.
- [20] Stancich, Rikki y Guidetti, Francesco. Innova’s dish Stirling solution to make market debut in Italy. 2011. Disponible online: «<http://social.csptoday.com/markets/innovas-dish-Stirlingsolution-make-market-debut-italy>» [Consultato in data: 2015-02-23].
- [21] Smil, Vaclav. “El lento ascenso de las renovables”. Investigación y Ciencia. 2014, núm. 450, p. 66–71.
- [22] Electric Scotland: Robert Stirling . Disponible online: «http://www.electricscotland.com/history/men/Stirling_robert.htm» [Consultato in data: 2015-03-17].

[23] Senft, James R. Mechanical efficiency of heat engines. 1a ed. New York: Cambridge University Press, 2007. ISBN: 978-0-521-86880-8

[24] Organ, "The Regenerator and the Stirling Engine", p.7

[25] Jakob, M. (1957) Heat TransFER II John Wiley, New York, USA and Chapman and Hall, London, UK

[26] Urieli, Rallis, Berchowitz, Computer simulation of Stirling cycle machines. Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 12th, Washington, D.C., August 28-September 2, 1977, Proceedings. Volume 2. (A77-48701 23-44) La Grange Park, Ill., American Nuclear Society, Inc., 1977, p. 1512-1521 01/1977

[27] Ohio University Stirling Cycle Machine Analysis (updated 03/30/2013) .
Disponibile online:
«<http://www.ohio.edu/mechanical/Stirling/engines/engines.html>»
[Consultato in data: 2015-05-11].

[29] Álvarez Flórez, Jesús Andrés, Callejón Agramunt, Ismael et al.. Máquinas térmicas motoras - 2. Álvarez Flórez, Jesús Andrés y Callejón Agramunt, Ismael 1a ed. Barcelona: Edicions UPC, 2002. ISBN: 84-8301-645-1.

[28] Martini, William R.. Stirling Engine Design Manual. 2a ed. Washington: NASA, 1983. ISBN: NASA CR-135382.

[30] Fraser, P. Stirling Dish System Performance Prediction Model. 2008. University of Wisconsin-Madison.

[31] Stine, W. B y Diver, R. B. A compendium of solar dish/Stirling technology. Albuquerque, NM, y Livermore, CA (EE.UU.): 1994. .

[32] DeMeo, E. A y Galdo, J. F. Renewable Energy Technology Characterizations. TR-109496 Topical Report, U.S. DOE-Washington y EPRI, 1997.

[33] Meinel, Aden B y Meinel, Marjorie P. Aplicaciones de la energía solar. Aguilar Peris, José y de la Rubia Pacheco, Juan 1a ed. Barcelona: Reverté, 1982. ISBN: 84-291-4199-5.

- [34] SunEarthTools . Disponibile online:
«http://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es»
[Consultato in data: 2015-03-30].
- [35] Rodríguez Bravo, Yolanda. Análisis y perspectivas de desarrollo de un sistema avanzado de generación energética de disco Stirling / Yolanda Bravo Rodríguez. 2014. Universidad de Zaragoza
- [36] Ruiz Hernández, V, Silvia Pérez, M. A y Lillo Bravo, I. La electricidad solar térmica, tan lejos, tan cerca. Fundación Gas Natural, 2009. ISBN: 978-84-613-0406-6.
- [37] Mundet, Anna. Energia Solar Tèrmica (Col·lecció Quadern pràctic 3). 2011.
- [38] “Presentación INNOVA”. INNOVA. 2014,
- [40] “Trinum technical report”. INNOVA. .
- [41] “Trinium Assembly Manual”. INNOVA. 2012, .
- [43] *meteo.cat Mesura de la radiació solar global* [online]. Disponibile online:
«<http://www.meteo.cat/wpweb/divulgacio/estacionsmeteorologiques-automatiques/funcionament-ema/mesura-de-laradiacio-solar-global/>» [Consultato in data: 2015-05-13].
- [44] About PVGIS. Disponibile Online :
http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/about_pvgis/about_pvgis.htm
- [45] Mitjá, Albert y Batalla, Enric. *Manual de radiación solar: Tablas para catalunya. Volumen I*. 1a ed. Barcelona: Prensa XXI S.A., 1982. ISBN: 84-86052-00-9.
- [46] Beatrice Pulvirenti. Convezione naturale. Seconda Facoltà di Ingegneria Corsi di Laurea in Ingegneria Meccanica ed Ingegneria Aerospaziale. Alma Mater Studiorum - Università di Bologna. 24 Maggio 2007. Disponibile online presso: http://dienca.ing.unibo.it/Pulvirenti/allegati/Lezioni_11_e_12.pdf
- [47] DIAGRAMMI E TABELLE. Università degli Studi di Genova.
DIPARTIMENTO DI TERMOENERGETICA E CONDIZIONAMENTO AMBIENTALE

Analisi sperimentale di un sistema microcogenerativo Dish Stirling

[48] Appunti del Corso di Fisica Tecnica – a.a. 2010/2011 - Docente: Prof. Carlo Isetti. Disponibili online presso <https://architettura.unige.it/did/did1011/l2architettura5/quarto1011/imptec/matdid/cap10.pdf>

[49] Cálculo de variaciones del Índice de Precios de Consumo (sistema IPC base 2011) [online]. Disponibile online: «<http://www.ine.es/varipc/verVariaciones.do>» [Consultato in data: 2015-06-30].

[50] Precio de la electricidad 2014 Eficiencia Energética - CNomys [online]. Disponibile online: «<http://www.cnomys.es/blog/como-fue-el-preciodela-electricidad-en-2014-y-como-empieza-2015/>» [Consultato in data: 2015-07-02].

[51] Bonifacio Sotos: Precios energía térmica en España 2014 [online]. Disponibile online: «<http://tecnologiabsotos.blogspot.com.es/2014/03/precios-energiatermica-en-espana-2014.html>» [Consultato in data: 2015-07-02].

[52] 1.2 ESPAÑA. INDICADORES FINANCIEROS. SERIES DIARIAS 30-Junio-2015 [online]. 2015. Disponibile online: «www.bde.es/webbde/es/estadis/infoest/si_1_2.pdf» [Consultato in data: 2015-06-30].

APPENDICI

APPENDICE 1 INSTALLAZIONI DSS

Company	Project	Location	Total Power	N° of units	Building year	Comments
Innova	Trinum	Monteodorisio, Italy	2 kWe	2	2011	Similar trials in other Italian cities.
Infinia		Kirtland Air Force Base, in New Mexico, USA	21 MWe	6	-	Shared with Stirling Engine Systems and Sandia National Laboratories
Infinia	Helios Power	Cyprus	50 MWe	16,920	-	This project is development
Infinia	Maximus	Greece	75 MWe	25,160	-	This project is development
United Sun Systems		Maricopa Park, Arizona, USA	1,5 MWe	60	2010	It was initially from Stirling Engine Systems
Ripasso Energy		Upington, Republic of South Africa	60 kWe	2	2012	Solar yield record: 32%.
Cleanergy		Ordos desert, Mongolia	100 kWe	10	2012	
-	Megha	India	50 MWe	-	-	This plant is in construction
-	Gujarat Solar One	India	25 MWe	-	-	This plant is in construction
-	MNRE R&D Project	India	1 MWe	-	-	This plant is in construction
-	Indian Institute of Technology CSP Project	India	3. MWe			This plant is in operation
-	ABhijeet (Corporate Ispat Alloys)	India	50 MWe	-	-	This plant is in construction
-	Godawari	India	50 MWe	-	-	This plant is in construction
-	Lanco Solar	India	100 MWe			This plant is in construction
-	Rajasthan Solar One	India	10 MWe			This plant is in construction
-	KaXu Solar One	South Africa	100 MWe	-	-	This plant is in construction
-	Bokpoort	South Africa	50 MWe	-	-	This plant is in development
-	Fort Irwin	USA	500 MWe	-	-	This plant is in development
-	Genesis Solar 1	USA	125 MWe	-	-	This plant is in construction
-	Genesis Solar 2	USA	125 MWe	-	-	This plant is in construction
-	Holaniku at Keyhole Point	USA	2 MWe	-	-	This plant is in operation

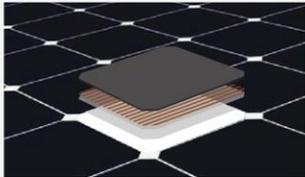
Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

Keahole Solar Power	USA	5 MWe	-	-	This plant is in construction
Martin Next Generation Solar Energy Center	USA	75 MWe	-	-	This plant is in operation
Mojave Solar Project	USA	280 MWe	-	-	This plant is in construction
Nevada Solar One	USA	64 MWe	-	-	This plant is in operation
Palmdale Hybrid Gas-solar Project	USA	50 MWe	-	-	This plant is in development
Saguaro Power Plant	USA	1.16 MWe	-	-	This plant is in operation
SEGS I	USA	14 MWe	-	-	This plant is in operation
SEGS II	USA	33 MWe	-	-	This plant is in operation
SEGS IV	USA	33 MWe	-	-	This plant is in operation
SEGS V	USA	33 MWe	-	-	This plant is in operation
SEGS VI	USA	33 MWe	-	-	This plant is in operation
SEGS VII	USA	33 MWe	-	-	This plant is in operation
SEGS VIII	USA	89 MWe	-	-	This plant is in operation
SEGS IX	USA	89 MWe	-	-	This plant is in operation
Solana	USA	280 MWe	-	-	This plant is in construction
Victorville 2 Hybrid Power Project	USA	50 MWe	-	-	This plant is in development
CSP Pilot Plant	China	10 MWe	-	-	This plant is in construction
Erdos Project	China	50 MWe	-	-	This plant is in construction
Gansu, Jinta	China	50 MWe	-	-	This plant is in development
Ningxia ISCC	China	92.5 MWe	-	-	This plant is in construction
Qinghai	China	50 MWe	-	-	This plant is in development
Ain-Beni-Mathar ISCC	Morocco	20 MWe	-	-	This plant is in operation
Ouarzazate	Morocco	160 MWe	-	-	This plant is in development
Solar Oasis	Australia	43.5 MWe	-	-	This plant is in development
PSA	Spain	56 kW	-	1992-97	This plant is in operation

APPENDICE 2 SCHEDE TECNICHE



- **21.5% efficiency**
Ideal for roofs where space is at a premium or where future expansion might be needed.
- **Maximum performance**
Designed to deliver the most energy in demanding real world conditions, in partial shade and hot rooftop temperatures.^{1,2,3}
- **Premium aesthetics**
SunPower™ sleek black X-Series panels blend harmoniously into your roof. The most elegant choice for your home.



Maxeon™ Solar Cells: Fundamentally better.
Engineered for performance, designed for durability.

Engineered for peace of mind
Designed to deliver consistent, trouble-free energy over a very long lifetime.^{4,5}

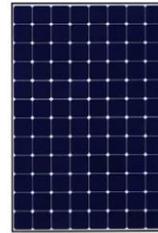
Designed for durability
The SunPower Maxeon Solar Cell is the only cell built on a solid copper foundation. Virtually impervious to the corrosion and cracking that degrade Conventional Panels.^{4,5}

Same excellent durability as E-Series panels.
#1 Ranked in Fraunhofer durability test.¹⁰
100% power maintained in Atlas 25+ comprehensive PVDI Durability test.¹¹

UNMATCHED PERFORMANCE, RELIABILITY & AESTHETICS



X21 - 335 PANEL



X21 - 345 PANEL



HIGHEST EFFICIENCY⁶

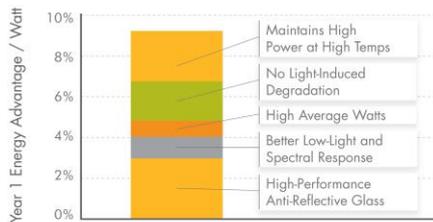
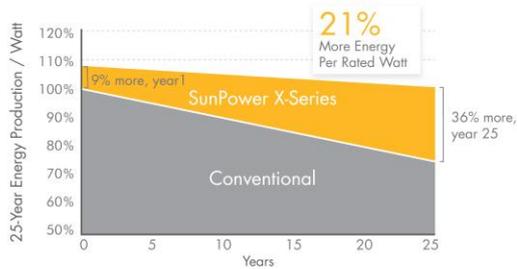
Generate more energy per square meter

X-Series residential panels convert more sunlight to electricity producing 44% more power per panel,¹ and 75% more energy per square meter over 25 years.^{3,4}

HIGHEST ENERGY PRODUCTION⁷

Produce more energy per rated watt

High year one performance delivers 8-10% more energy per rated watt.³ This advantage increases over time, producing 21% more energy over the first 25 years to meet your needs.⁴



Awarded to SunPower E-Series. X-Series delivers even more energy.⁷

sunpowercorp.com

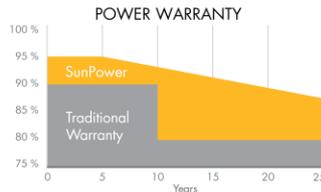
Analisi sperimentale di un sistema microgenerativo Dish Stirling

SUNPOWER

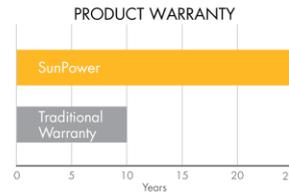
MORE ENERGY. FOR LIFE.™

X-SERIES SOLAR PANELS

SUNPOWER OFFERS THE BEST COMBINED POWER AND PRODUCT WARRANTY



More guaranteed power: 95% for first 5 years, -0.4%/yr. to year 25.⁸



Combined Power and Product defect 25 year coverage that includes panel replacement costs.⁹

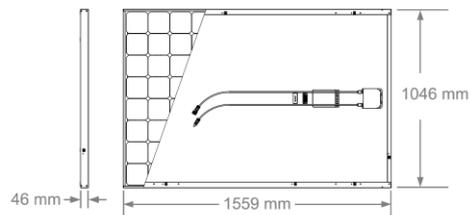
ELECTRICAL DATA		
	X21-335-BLK	X21-345
Nominal Power ¹² (P _{nom})	335 W	345 W
Power Tolerance	+5/-0%	+5/-0%
Avg. Panel Efficiency ¹³	21.1%	21.5%
Rated Voltage (V _{mpp})	57.3 V	57.3 V
Rated Current (I _{mpp})	5.85 A	6.02 A
Open-Circuit Voltage (V _{oc})	67.9 V	68.2 V
Short-Circuit Current (I _{sc})	6.23 A	6.39 A
Max. System Voltage	1000 V IEC & 600 V UL	
Maximum Series Fuse	20 A	
Power Temp Coef.	-0.30% / °C	
Voltage Temp Coef.	-167.4 mV / °C	
Current Temp Coef.	3.5 mA / °C	

OPERATING CONDITION AND MECHANICAL DATA	
Temperature	-40°C to +85°C
Max load	Wind: 2400 Pa, 245 kg/m ² front & back Snow: 5400 Pa, 550 kg/m ² front
Impact resistance	25mm diameter hail at 23 m/s
Appearance	Class A+
Solar Cells	96 Monocrystalline Moxeon Gen III
Tempered Glass	High transmission tempered Anti-Reflective
Junction Box	IP-65 Rated
Connectors	MC4
Frame	Class 1 black anodized (highest AAMA rating)
Weight	18,6 kg

TESTS AND CERTIFICATIONS	
Standard tests	IEC 61215, IEC 61730, UL1703
Quality tests	ISO 9001:2008, ISO 14001:2004
EHS Compliance	RoHS, OHSAS 18001:2007, lead free, PV Cycle
Ammonia test	IEC 62716
Salt Spray test	IEC 61701 (passed maximum severity)
PID test	Potential-Induced Degradation free: 1000V ¹⁰
Available listings	TUV, MCS, UL, CEC

REFERENCES:

- All comparisons are SPR-X21-345 vs. a representative conventional panel: 240W, approx. 1.6 m², 15% efficiency.
- PVEvolution Labs "SunPower Shading Study," Feb 2013.
- Typically 8-10% more energy per watt, BEW/DNV Engineering "SunPower Yield Report," Jan 2013, with CFV Solar Test Lab Report #12063, Jan 2013 temp. coef. calculation;
- SunPower 0.25%/yr degradation vs. 1.0%/yr conv. panel. Campeau, Z. et al. "SunPower Module Degradation Rate," SunPower white paper, Feb 2013; Jordan, Dirk "SunPower Test Report," NREL, Oct 2012.
- "SunPower Module 40-Year Useful Life" SunPower white paper, Feb 2013. Useful life is 99 out of 100 panels operating at more than 70% of rated power.
- Higher than E series which is highest of all 2600 panels listed in Photon Int'l, Feb 2012
- 1% more energy than E-Series panels, 8% more energy than the average of the top 10 panel companies tested in 2012 (151 panels, 102 companies), Photon International, March 2013.
- Compared with the top 15 manufacturers. SunPower Warranty Review, Feb 2013.
- Some exclusions apply. See warranty for details.
- X-Series same as E-Series, 5 of top 8 panel manufacturers were tested by Fraunhofer ISE, "PV Module Durability Initiative Public Report," Feb 2013.
- Compared with the non-stress-tested control panel. X-Series same as E-Series, tested in Atlas 25+ Durability test report, Feb 2013.
- Standard Test Conditions (1000 W/m² irradiance, AM 1.5, 25° C).
- Based on average of measured power values during production.



See <http://www.sunpowercorp.com/facts> for more reference information.

For more details, see extended datasheet: www.sunpowercorp.com/datasheets. Read safety and installation instructions before using this product.

©May 2013 SunPower Corporation. All rights reserved. SUNPOWER, the SUNPOWER logo, MAXEON, MORE ENERGY. FOR LIFE., and SIGNATURE are trademarks or registered trademarks of SunPower Corporation. Specifications included in this datasheet are subject to change without notice.

[sunpowercorp.com](http://www.sunpowercorp.com)

Captador solar plano SKR500

El nuevo y exclusivo captador de SONNENKRAFT® combina la última tecnología con una experiencia acreditada. El SKR500 es el primer captador con diseño sin marco y montaje ultra rápido con el sistema Plug & Flow. El sistema de fijación permite un montaje rápido con una única herramienta estándar. El SKR 500 es un captador plano, ligero y sin marco con una excelente integración en cualquier variante de instalación estándar.

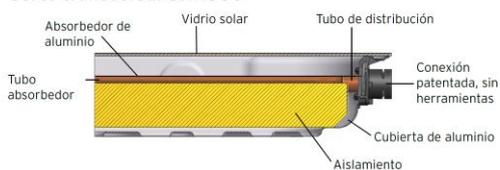
Datos técnicos SKR500

Nombre	SKR500	SKR500L
Tipo de captador	Solar plano	
Tipo de montaje	Sobre tejado	
Superficie bruta	m ²	2.57
Superficie de apertura	m ²	2.26
Superficie de absorbedor	m ²	2.30
Altura	mm	2079
Ancho	mm	1240
Profundidad	mm	95
Peso en vacío	kg	38
Capacidad del captador	l	1.45
Presión máx. de trabajo	bar	10
Temperatura de estanqueidad	°C	174
Caudal recomendado	l/m ² h	10 - 35
Conexión en serie	Máx. 12 uds. en paralelo	Máx. 10 uds. en paralelo
Inclinación mín. del captador	°	15
Inclinación máx. del captador	°	75
Conexiones	18 m cobre	
Absorbedor	Absorbedor de aluminio de superficie completa; recubrimiento al vacío altamente selectivo	
Configuración	Meandro	
Absorción (α) / Emisión (ε)	0.95 / 0.05	
Carcasa	Bandeja de aluminio embutida, resistente al ambiente marino	
Aislamiento	50 mm lana mineral	
Acristalado del captador	Vidrio solar de seguridad y bajo contenido de hierro de 3.2 mm	
Rendimiento óptico (apertura/absorción)	0.820 / 0.806	0.794 / 0.781
Factor de pérdidas a _{av} / a _{ak}	W/(m ² K) 3.821 / 3.758	3.514 / 3.456
Factor de pérdidas a _{av} / a _{ak}	W/(m ² K ²) 0.0108 / 0.0106	0.0147 / 0.0145
Modificador del ángulo de incidencia K _i (50°)	0.96	
Nº reg. Solar Keymark	011-7 51277F	011-7 51284F

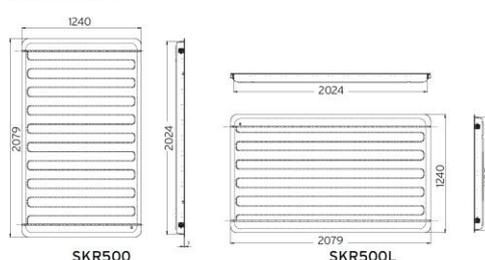
Sistemas de fijación SKR500 SKR500L



Corte transversal SKR500



Dimensiones



Ventajas del captador solar plano SKR500

- Diseño único sin marco
- Sistema específico de fijación - montaje con una única herramienta
- Rendimiento elevado
- Vaciado automático, por ello, excelente comportamiento de estancamiento
- Sistema de fijación para todo tipo de cubiertas
- Exclusivo para clientes SONNENKRAFT
- Atractivo captador con una superficie bruta de 2,57 m² y un peso de tan solo 38 kg
- Conexión hidráulica rápida, sencilla, patentada, sin herramientas
- Captador y fijación calculados estáticamente conforme a las normas EN 1991
- Disponible en formato horizontal y vertical



Salvo error tipográfico o de imprenta. Reservado el derecho a realizar modificaciones técnicas. ES-SK-0135-1203-EC

