

*High Efficiency Solar Microcogeneration
at Low Power Scale*

MICROCOGENERAZIONE SOLARE AD ALTA EFFICIENZA E PICCOLA SCALA ENERGETICA

Giulia Fresca, Carolina Toscano, Francesco Pulice, Riccardo Barberi

Dipartimento di Fisica, Università della Calabria, Via P. Bucci, Cubo 31 C - 87036, Arcavacata di Rende, Cosenza, Italia

giuliafresca@gmail.com; ing.toscanocarolina@gmail.com;

francescopulice@hotmail.com; riccardo.barberi@fis.unical.it

Abstract

This experimental work is focused on a small solar cogeneration system of about 1 kW of electric power and up to 3 kW of thermal power, designed for the decentralised and diffuse production of heat and power with high conversion efficiencies at low power scale. The presented solar system makes use as microcogenerator of an industrial Stirling engine of small size, with an electrical efficiency up to 32%, originally designed for domestic combined heat-power applications in gas boilers. The heat acceptor of the Stirling head has been completely re-engineered for the solar application, together with a solar dish concentrator moved by a suitable two axis tracking system. In one year the average electricity produced is about 185 kWh/m² and the average thermal energy is around 858 kWh/m². The resulting annual electrical efficiency is about 9%, but can be improved, and the annual thermal efficiency is about 46%. The collecting surface of the solar dish measures approximately 9.6 m², about the 50% of the collecting surface for an equivalent non-cogenerative system.

KEY WORDS: *Energy, Cogeneration, Stirling Engine, Green Energy, Solar Dish.*

1. Introduzione

Gli ambiziosi obiettivi nazionali, fissati dalla Commissione Europea per l'anno 2020, pari ad una *copertura con le energie rinnovabili al 17% degli usi finali di energia, nonché le indicazioni verso l'autoproduzione e la distribuzione locale di energia da fonti rinnovabili* indicate nella nuova proposta della Commissione Europea sulle rinnovabili, direttiva (UE) 2018/2001 del Parlamento Europeo e del Consiglio, risultano fondamentali da perseguire, ma non semplici da conseguire.

Senza dubbio, un ruolo fondamentale per il loro raggiungimento, è affidato a nuove soluzioni tecnologiche per la *green energy*, che sta acquisendo sempre più rilevanza in tutti i comparti produttivi e di consumo. In Calabria, in particolare, le tecniche innovative di energie rinnovabili applicabili, per esempio, nei processi agroindustriali, favoriscono l'efficienza energetica e il risparmio di risorse naturali del territorio. Da questa esigenza locale, che risponde ad una domanda ben più estesa, è partita l'idea di sviluppare nuove soluzioni di produzione energetica di

piccola taglia. Il sistema di micro-cogenerazione presentato si inserisce nel filone di ricerca per lo sviluppo di impianti alimentati dal Sole basati sulla concentrazione della radiazione solare e sulla simultanea produzione di energia elettrica e di energia termica, per massimizzare il rendimento complessivo di generazione solare a parità di superficie occupata.

2. Obiettivi

Fuori dell'atmosfera il Sole illumina in media la Terra con circa 1367 W/m² di radiazione su un piano perpendicolare ai raggi solari [1]. Tale valore è conosciuto come costante solare. Non tutta questa energia raggiunge la superficie della Terra a causa dell'atmosfera e dei fenomeni ad essa collegati: riflessione, rifrazione, assorbimento e diffusione.

La radiazione solare complessiva che giunge al suolo è la somma di tre contributi principali:

- la radiazione diretta, che è quella che non è assorbita

dall'atmosfera terrestre e arriva sulla superficie terrestre senza deviazioni significative dalla direzione Sole-Terra. La radiazione diretta colpisce una qualsiasi superficie con un unico e ben definito angolo di incidenza;

- la radiazione diffusa (o indiretta), che è quella parte che giunge a terra grazie alla diffusione dei raggi solari a causa dell'aria. È la luce che percepiamo, per esempio, nelle giornate nuvolose e proviene dal cielo senza una direzione ben definita, colpendo quindi una superficie al suolo, distribuendosi su moltissimi angoli di incidenza;
- la radiazione riflessa dal terreno, dall'ambiente o dagli oggetti, che anch'essa non ha in genere una direzione ben definita.

La radiazione solare diretta presenta una densità energetica bassa, che alle latitudini italiane è tipicamente di circa 1000 W/m² alle ore 12.00 solari di una giornata chiara. Col cielo sereno la radiazione diffusa è circa il 10% di quella diretta.

I sistemi solari a concentrazione intercettano la sola radiazione solare diretta. Le tecnologie a concentrazione solare, *CSP - Concentrating Solar Power*, consistono nella opportuna focalizzazione di questa componente della radiazione solare con idonei sistemi di specchi e/o di lenti per portare una larga area di radiazione solare su una superficie più piccola, al fine di aumentare la densità energetica disponibile. Il fine ultimo, nel caso in studio, è realizzare le condizioni per poter azionare un ciclo termodinamico con il più alto rendimento possibile e quindi produrre efficacemente potenza meccanica e, di conseguenza, elettrica e calorifica [2].

In termini di efficienza complessiva, l'approccio più efficace è senz'altro quello della cogenerazione, [3, 4, 5] cioè della produzione simultanea di energia elettrica e termica partendo da una singola fonte primaria, come è il Sole, mediante l'uso di un solo sistema integrato.

Questo tipo di produzione energetica presenta benefici economici per il risparmio sul costo dell'energia prodotta, in quanto, rispetto alla generazione separata di energia elettrica e termica, la cogenerazione riduce la quantità di energia primaria utilizzata. Quando la cogenerazione è applicata all'energia solare permette anche di ridurre l'area complessiva delle superfici captanti rispetto alla soluzione tradizionale dei pannelli fotovoltaici affiancati da quelli termici, incrementando, in maniera significativa, l'efficienza complessiva di conversione e ottenendo un minore consumo di suolo. Vanno infine considerati i risparmi nelle emissioni di CO₂ rispetto all'approvvigionamento energetico tradizionale.

Un impianto di cogenerazione permette, per esempio, di recuperare il calore prodotto da un motore utilizzato per produrre energia elettrica, calore che negli impianti convenzionali non cogenerativi sarebbe invece disperso nel-

l'ambiente.

Questo lavoro descrive un sistema micro-cogenerativo solare per la produzione contemporanea di energia elettrica e termica con potenze di pochi kW: un *CSP a inseguimento a due assi in cui il sistema di micro-cogenerazione è basato su un motore Stirling free piston integrato nel sistema.*

2.1. Le Tecnologie ed il Metodo Utilizzato

2.1.1. La Cogenerazione

I vantaggi della cogenerazione sono molteplici e possono essere così riassunti:

- **Vantaggi economici:** è sfruttata meglio l'energia della fonte energetica primaria, cioè a parità di energia utile prodotta si consuma meno. I costi di gestione dell'impianto sono quindi ridotti poiché le perdite sono inferiori;
- **Vantaggi ambientali:** anche se il sistema cogenerativo fa uso di fonti fossili, le quantità di combustibile necessarie sono inferiori alle soluzioni non cogenerative con la conseguente riduzione delle emissioni di CO₂ ;
- **Vantaggi tecnologici:** sono garantiti livelli di qualità di fornitura d'energia elevati. La cogenerazione permette di avere una maggiore flessibilità nella fornitura d'energia riducendo i rischi black-out;
- **Utilizzo razionale delle risorse:** la cogenerazione permette di utilizzare in maniera razionale le risorse energetiche riducendo gli sprechi;
- **Vantaggi finanziari:** la legislazione italiana, nei casi di cogenerazione energetica, prevede semplificazioni amministrative, particolari diritti di scambio sul posto, l'assegnazione di certificati bianchi, che ogni produttore di energia rinnovabile deve comunque obbligatoriamente conseguire, e vantaggi fiscali.

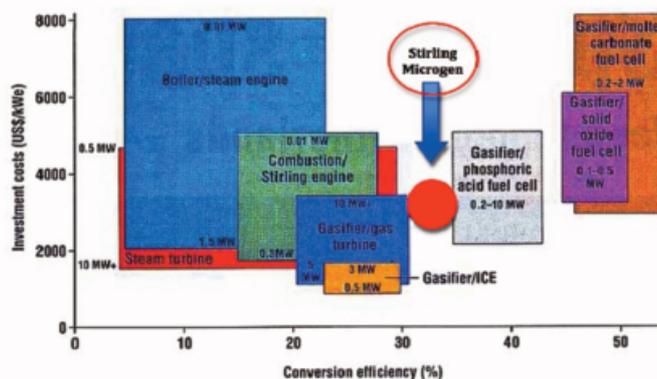


Fig. 1 - Tecnologie di conversione di energia e relative efficienze di conversione con posizionamento relativo del convertitore Stirling adottato per il prototipo di microcogeneratore solare. Sebbene si tratti di un dispositivo di piccola taglia, di potenza energetica elettrica di circa 1 kWe, esso si colloca tra i più economici per la produzione di energia [costo per kWe] e tra i più efficienti, direttamente paragonabile ai sistemi oltre il MW di potenza [Fonte: "Energia in Italia: problemi e prospettive (1990-2020)", Società Italiana di Fisica, Aprile 2008]

2.1.2. Il motore Stirling

Uno dei migliori sistemi termodinamici per la realizzazione di microcogeneratori di piccola taglia è il motore Stirling. Come mostrato nella Figura (vedi Fig. 1), esso può raggiungere efficienze molto alte, fino al 33% per la produzione elettrica diretta [6].

Lo Stirling appartiene alla categoria dei motori a combustione esterna, cioè a quella tipologia di motori in cui il combustibile è utilizzato per riscaldare dall'esterno un fluido, che permette la conversione dell'energia termica in lavoro meccanico.

Tale motore, il cui brevetto fu depositato il 27 settembre 1816, prende il nome dal suo inventore, Robert Stirling, nato a Gloag nella contea di Perthshire in Scozia. L'idea nacque dalla volontà di risolvere il problema legato alle esplosioni delle caldaie a vapore. Il suo motore infatti funziona senza caldaia ed in maniera piuttosto semplice: la combustione è esterna, il fluido di lavoro, un gas a pressione modesta, segue un semplice ciclo di riscaldamento, espansione, raffreddamento e compressione. Si tratta quindi di un motore rigenerativo a ciclo chiuso che segue due isoterme a temperature differenti, per raccogliere lavoro meccanico utile, le quali sono collegate tra loro da due trasformazioni isocore rigenerative [7, 8]. Il motore Stirling ha lo stesso rendimento teorico di un ciclo di Carnot e dipende quindi solo dalle temperature massime e minime tra cui si svolge il ciclo termodinamico.

Il motore Stirling utilizzato per il prototipo di microcogeneratore solare è prodotto da *Microgen Engine Corporation Holding* e si tratta dell'unico sistema al mondo oggi disponibile su scala industriale per piccole potenze elettriche. È un motore *free-piston*, disegnato inizialmente da *Sunpower* e destinato al riscaldamento delle grandi abitazioni. Successivamente, lo sviluppo di questo motore è stato curato dal *MEC*, un consorzio di aziende formato da *Viessmann*, *Baxi*, *Remeha* e *Sunpower* stessa e quindi affidato alla *Microgen*.

Le sue caratteristiche principali sono: produzione di corrente alternata a 220 Volt e 50 Hz, potenza elettrica fornita di 1 kW e potenza termica di 3 kW. Le sue curve di funzionamento caratteristiche sono riportate nella Figura (vedi Fig. 2).

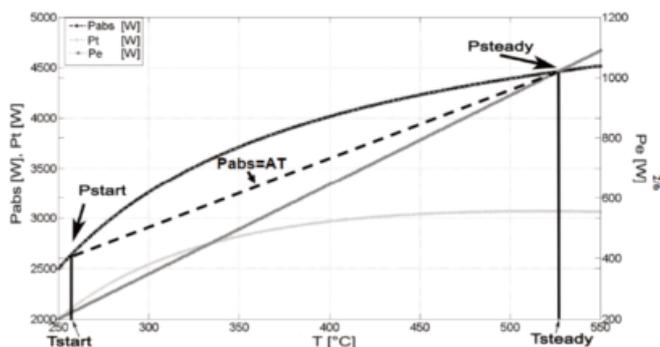


Fig. 2 - Curve caratteristiche di funzionamento del motore Stirling di Microgen
(Fonte: Propria elaborazione)

Lo Stirling di Microgen è privo di valvole e cinematismi e presenta un funzionamento silenzioso con elevati intervalli di esercizio di diversi anni senza manutenzione.

Il generatore elettrico, un alternatore di tipo lineare, è infatti inserito nel cilindro del motore e nel pistone. Il moto oscillante del pistone motore dello Stirling è così convertito direttamente in energia elettrica alternata e il sistema non richiede un inverter.

Microgen sviluppa un sistema microcogenerativo abbinato ad un bruciatore a gas la cui testa riscaldante non è compatibile con l'applicazione del concentratore solare. Questa componente del motore è stata quindi completamente ridisegnata per questa sperimentazione.

La soluzione individuata è consistita nello sviluppo e nella caratterizzazione di un assorbitore di calore, a simmetria cilindrica, di forma tronco conica, disposto sulla testa del motore Stirling, capace di trasferire il calore concentrato sulla superficie frontale e laterale dell'assorbitore verso le alette dello scambiatore di calore interno del motore stesso (vedi Fig.3). L'assorbitore di calore assolve ad una doppia funzione: da una parte serve all'avvio per il preriscaldamento del motore e dall'altra svolge la funzione di volano termico stabilizzatore. In particolare, la capacità termica, individuata tramite la risoluzione delle equazioni differenziali di bilanciamento termico, riportate nel prossimo paragrafo, presenta dei valori all'interno dell'intervallo 2800 - 3800 J/Kg $^{\circ}\text{C}$ che, se si sceglie il rame come materiale costituente, implica una massa tra 7 e 10 Kg.



Fig.3 - Motore Stirling con la testa tronco conica di assorbimento del calore montata frontalmente (in alto nell'immagine)
(Fonte: Propria elaborazione)

2.1.3. Sistema solar-dish a inseguimento a due assi: Sunny

Il funzionamento del concentratore è parametrizzato tramite l'equazione di bilanciamento energetico, che è rappresentato dall'equazione differenziale ordinaria non lineare:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P_{ric} - P_{abs}(T) - P_{loss}(T)}{C_{termico}} \quad (1)$$

dove:

- P_{ric} potenza termica entrante all'interno del ricevitore;
- P_{abs} potenza termica assorbita dal motore Stirling, le cui curve matematiche di funzionamento caratteristiche del convertitore termodinamico sono quelle della Figura (vedi Fig. 2);
- P_{loss} perdite termiche, radiative e convettive, del sistema a concentrazione solare;
- $C_{termico}$ è la capacità termica ottimizzata per l'assorbitore di calore;
- T è la temperatura di interfaccia tra l'assorbitore di calore e lo scambiatore di calore interno del motore Stirling, costituito da alette in rame che circondano interiormente la testa cilindrica;
- t è il tempo.

La soluzione di queste equazioni descrive l'evoluzione temporale dei parametri principali di funzionamento del sistema a concentrazione solare. In particolare si può modellizzare il comportamento della temperatura T di interfaccia tra l'assorbitore di calore e lo scambiatore di calore, conoscere la produzione elettrica e termica del concentratore, e quindi le efficienze elettriche e termiche. A seguito della modellazione matematica del sistema sono state definite anche le soluzioni tecnologiche applicative, sviluppando i modelli di dettaglio, realizzando i componenti ed infine testandoli sul campo. In questo modo è stato disegnato l'intero gruppo focale del sistema, che è rappresentato schematicamente insieme alla struttura portante nella figura (vedi Fig. 4).

La captazione e la focalizzazione della radiazione solare sono un problema tecnico delicato e di non facile soluzione tecnica. I fogli metallici utilizzati allo scopo soffrono, per esempio, la doppia curvatura imposta dal profilo di paraboloide di rotazione che hanno i solar dish.

Ciò comporta possibili fratture superficiali che, anche se di piccola entità, possono accelerare i processi di invecchiamento della superficie stessa.

Le deformazioni imposte devono quindi essere le minime possibili, compatibilmente con una distanza focale che permetta una buona movimentazione del solar dish.

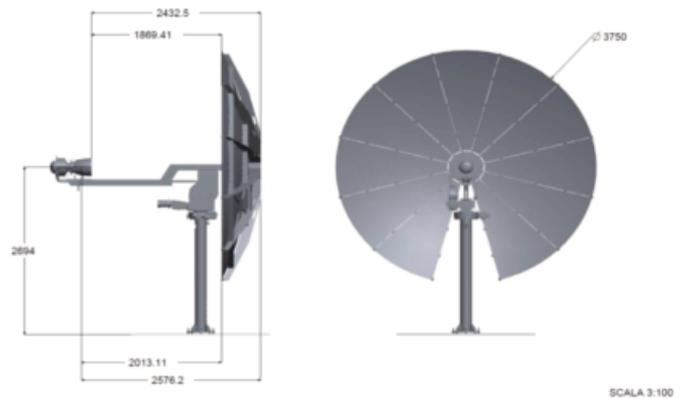


Fig. 4 - Schema del microgeneratore solare a inseguimento a due assi Sunny con ingombri
(Fonte: Propria elaborazione)

L'elemento ottico principale è un paraboloide di rotazione in alluminio riflettente, con riflettanza speculare di circa 87,8%, una superficie captante netta di circa 9,60 m², realizzato con 11 spicchi triangolari preformati di circa 0,87 m² ciascuno. Il paraboloide concentra la radiazione solare sulla testa riscaldante del motore Stirling, che è alloggiato nel fuoco del paraboloide stesso, sostenuto da un braccio portante di circa 2 m di lunghezza.

Il paraboloide è dotato di motori che permettono l'inseguimento continuo del disco solare con un movimento su due assi. Le soluzioni adottate sono state coperte con due brevetti per l'ottimizzazione dell'intero sistema concentratore-ricevitore-testa Stirling [9, 10].

Sono stati anche condotti studi specifici sul calcolo strutturale degli elementi portanti del concentratore, oltre che per le opere edili di installazione dello stesso, al fine di valutare possibili applicazioni commerciali.

La superficie riflettente del paraboloide è stata realizzata con fogli di alluminio ALLMIRR di Alucoil [11]. La superficie del ALLMIRR ha una riflettività teorica del 90%, che si riduce a 87,8%, come rilevato con misure spettroscopiche dopo la deformazione del foglio per fargli assumere la forma parabolica richiesta dalla geometria del concentratore. Si tratta quindi di uno specchio ad alta riflessione, formato da fogli di alluminio ed un nucleo di resina di plastica, che rende il prodotto auto-portante. L'ALLMIR è anche un materiale la cui superficie è trattata con tecniche nanotecnologiche che risultano autopulenti, per cui lo sporco e la polvere non vengono trattenuti.

La figura (vedi Fig. 5) è una fotografia dell'isola sperimentale presso il Dipartimento di Fisica dell'Università della Calabria con l'implementazione di due sistemi Sunny completi. La sperimentazione e la completa caratterizzazione e ottimizzazione di questi sistemi è ancora in corso.

La figura (vedi Fig. 6) riporta le misure sperimentali dell'irradiazione solare, DNI, espressa in W/m², curva rossa, e della potenza elettrica prodotta dal sistema Sunny, espressa in W, curva blu, in funzione del tempo in una giornata di ottobre a Rende (CS). Si rileva che il sistema ha prodotto energia elettrica per quasi 9 ore con-

tinuative con un picco di potenza elettrica superiore a 1150 W in presenza di un irraggiamento solare di circa 930 W/m².



Fig. 5 - Isola sperimentale presso il Dipartimento di Fisica dell'Università della Calabria con due sistemi Sunny
(Fonte: Propria elaborazione)

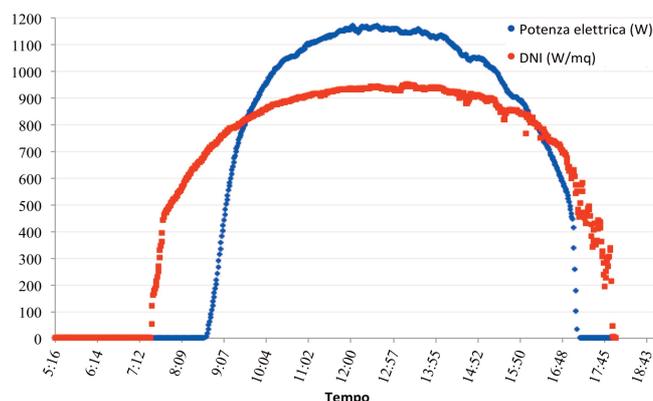


Fig. 6 - Misure sperimentali dell'irradiazione solare, DNI, espressa in W/m², curva rossa, e della potenza elettrica prodotta dal sistema Sunny, espressa in W, curva blu, in funzione del tempo in un giorno di Ottobre a Rende (CS)
(Fonte: Propria elaborazione)

La figura (vedi Fig. 7) riporta due grafici simili a quelli di figura 6 e relativi alle osservazioni sperimentali di un giorno molto particolare, il 20 Marzo 2015, nel quale si è verificata un'eclissi parziale di Sole facilmente rilevabile dalla riduzione della DNI tra le 9:30 e le 11:30. Dai grafici della figura (vedi Fig. 7) si rileva il comportamento del sistema

di cogenerazione nel periodo dell'eclissi.

Quando la DNI diminuisce da circa 850 W/m² verso le 9:26 a circa 500W/m² intorno alle 10:30, momento di massima eclisse, il sistema passa da una produzione di circa 1 kW elettrico a circa 450 W. All'aumentare della DNI, nella parte finale dell'eclisse, la produzione del sistema aumenta raggiungendo il picco massimo di circa 1.2 kW elettrici per poi defocalizzare la radiazione concentrata per motivi di sicurezza intorno alle 11:30 e poi riprendere la produzione normale dopo circa 15 minuti. Gli andamenti della figura (vedi Fig. 7) sono interessanti perché mostrano direttamente l'inerzia termica che presenta il sistema di accumulo del calore: le curve della produzione elettrica e della DNI risultano sfasate con un ritardo tipico di 13 minuti. Infatti, la DNI raggiunge un picco alle 9:26 con 846 W/m²; mentre la potenza elettrica raggiunge il picco alle 9:39 con 1000 W, con appunto 13 minuti di differenza.

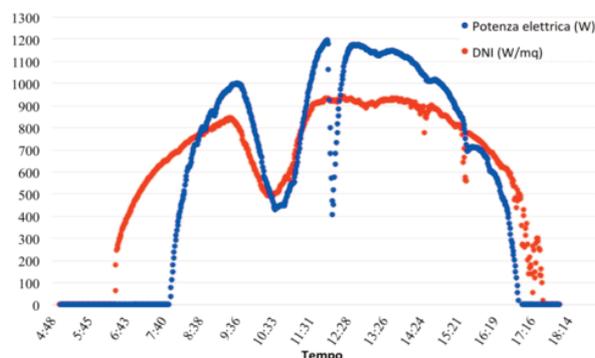


Fig. 7 - Misure sperimentali dell'irradiazione solare, DNI, espressa in W/m², curva rossa, e della potenza elettrica prodotta dal sistema Sunny, espressa in W, curva blu, in funzione del tempo il giorno 20 Marzo 2015, in presenza di una eclissi solare.
(Fonte: Propria elaborazione)

La Tabella (vedi Tab. 1) riporta i valori medi mensili dell'energia elettrica e di quella termica prodotta in un anno a Rende (CS). Con la superficie captante per l'energia solare di circa 9,6 m², l'energia elettrica media prodotta in un anno risulta circa 185 kWh/m² e l'energia termica media prodotta in un anno a 858 kWh/m². Il rendimento elettrico medio annuale risulta di circa il 9%, certamente migliorabile, mentre quello termico raggiunge il 46%.

	Radiazione solare su piano normale DNI (kWh/m ²)	Energia termica prodotta (kWh)	Energia Elettrica prodotta (kWh)
Gennaio	124	565	83
Febbraio	118	543	80
Marzo	160	700	139
Aprile	182	805	160
Maggio	193	890	147
Giugno	215	930	216
Luglio	225	1.020	193
Agosto	221	980	205
Settembre	202	856	215
Ottobre	177	771	161
Novembre	134	611	94
Dicembre	131	596	86
Totale	2082	9267	1779

Tab. 1 - Valori medi mensili dell'energia elettrica e dell'energia termica prodotta in un anno a Rende (CS) (Fonte: Propria elaborazione)

3. Conclusioni

Il sistema cogenerativo presentato ha prodotto in un anno 9267 kWh di energia termica e 1779 kWh di energia elettrica utilizzando una superficie captante di 9,60 m² per la radiazione solare. Se si considera un sistema tradizionale non cogenerativo composto da pannelli fotovoltaici col 18% di rendimento e pannelli termici [12, 13] utilizzati in zona climatica C, come è il caso del Comune di Rende, composti da collettori solari piani, vetrati, inclinati verso sud a 39° rispetto al piano orizzontale, per compensare la latitudine locale, ed efficienza ottica di circa 0,80, per produrre la stessa quantità di energia termica ed elettrica del sistema Sunny i pannelli fotovoltaici dovranno occupare 4,6 m² mentre i pannelli termici ulteriori 14,38 m². In totale il sistema non cogenerativo necessita di una superficie captante di quasi 19 m², contro i 9,60 m² del sistema cogenerativo. La superficie captante del sistema Sunny è quindi circa la metà di quella del sistema non cogenerativo, con un'importante riduzione del 50%. La principale criticità per l'implementazione industriale del sistema cogenerativo sviluppato è data dall'alto costo dei micro-cogeneratori Stirling che, su scala mondiale, sono forniti solo da Microgen, e la cui limitata produzione, qualche decina di migliaia all'anno, determina costi di produzione troppo elevati per applicazioni diffuse, limitandone l'uso pratico a soluzioni di nicchia, quali sistemi per la gestione delle emergenze o per la produzione remota di energia elettrica e termica combinata. L'allargamento di questo mercato, anche grazie al nuovo dispositivo proposto, e la conseguente attesa riduzione dei costi di queste componenti potrebbe però cambiare positivamente lo scenario. La ricerca è ora rivolta a una migliore ottimizzazione del sistema, che ha un rendimento elettrico medio annuale di circa il 9%, non competitivo con altre soluzioni alternative, come il fotovoltaico ad alta efficienza. Questo parametro è però migliorabile con un nuovo design della parte ottica di concentrazione della radiazione solare e l'introduzione di un collettore ottico secondario, che riduca anche le perdite radiative dal collettore termico sulla testa del motore Stirling. Il sistema dovrebbe così poter ottenere un rendimento elettrico medio annuale complessivo di almeno il 12%. Le filiere locali di autoproduzione possono trarre importanti benefici da un impianto cogenerativo di piccole dimensioni, che, anche se con potenze di solo qualche kW, presenti alti rendimenti energetici. Il sistema proposto rappresenta un'innovazione incrementale nel mercato energetico ed è indicato in casi in cui sia prioritaria l'autosostenibilità energetica locale in un contesto di produzione decentralizzata e diffusa di elettricità e calore. Esso è inoltre adatto anche a zone remote e offre una oc-

cupazione di suolo molto ridotta rispetto alle soluzioni tradizionali non cogenerative.

Acknowledgement

Questa ricerca è stata supportata dal programma Micro-Perla, Pon01_01840, "Programma di Energie Rinnovabili e Micro-Cogenerazione per l'Agroindustria", finanziato nell'ambito del PON Ricerca e Competitività 2007 - 2013. La ricerca è stata condotta in collaborazione con l'Università della Calabria, il CNR-IPCF, l'ENEA di Trisaia e Innova Solar Energy srl, con la consulenza di Calpark SCpA, il Parco Scientifico e Tecnologico della Calabria, dell'azienda spinoff DeltaE srl e di ICEA, l'Istituto per la certificazione etica e ambientale. Si ringrazia il dott. Giuseppe Lombardo del CNR-IPCF per il contributo al modello teorico del microcogeneratore solare.

Bibliografia

- [1] Solar Radiation Resource Information database, presente in Renewable Resource Data Center (RReDC). Informazioni su: <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/renewable-resource-data.html>
- [2] Müller-Steinhagen H., Trieb F., *Concentrating Solar Power: a review of the technology*. Ingenia, Issue 18, February/March 2004
- [3] Gestore dei servizi Energetici - GSE, Guida alla Cogenerazione ad Alto Rendimento CAR, Marzo 2012
- [4] ENEA, Ricerca Sistema Elettrico, Le tecnologie innovative ed efficienti nei sistemi di generazione in assetto co-trigenerativo e nei sistemi integrati con unità a pompa di calore nelle applicazioni industriali e del terziario, Report/RSE/2009/18
- [5] Confindustria, AIMB, Guida alla micro-cogenerazione: efficienza energetica e benefici ambientali con la produzione elettrica distribuita. Informazioni su: www.confindustriaiaixi.it
- [6] Energia in Italia: problemi e prospettive (1990 - 2020), Società Italiana di Fisica, Aprile 2008
- [7] NASA, Stirling Engine Design Manual, NASA-CR-158088, Gennaio 1983
- [8] Naso V., *La macchina di Stirling*, ESA, Milano, 1991
- [9] Abate S., Barberi R., Desiderio G., Lombardo G., *Solar radiation heat absorber for a Stirling motor*, Brevetto Pub. No. WO/2012/016873, International Application No. PCT/EP2011/062744, Publication Date: 09.02.2012, International Filing Date: 25.07.2011, Proprietà di Innova Solar Energy srl, 2012
- [10] Lombardo G., Abate S., Desiderio G., Barberi R., *Metodo di dimensionamento di un generatore solare direttamente esposto alla radiazione solare e generatore solare ottenuto*. Brevetto RM2011A000 181, proprietà di Delta E srl, 2011
- [11] Informazioni su: <https://alucoil.com/northamerica/products/solar-energy/solar-energy-almirr-aluminium-mirror>
- [12] Planning and Installing Solar Thermal Systems - A guide for installers, architects and engineers, Earthscan, Second Edition, 2010
- [13] Duffie J.A., Beckman W.A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, Wiley, Fourth Edition, 2013

