

## CONFRONTO TECNICO-ECONOMICO TRA SISTEMI DI CAPTAZIONE E CONCENTRAZIONE DELL'ENERGIA SOLARE

Franco Cotana<sup>1</sup>, Federico Rossi<sup>1</sup>, Mirko Filipponi<sup>1</sup>, Roberto Rossi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Università degli Studi di Perugia – Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Via G. Duranti, 67 – 06125 Perugia

### SOMMARIO

A seguito delle politiche di incentivazione delle risorse rinnovabili messe in atto negli ultimi anni dai governi di tutto il mondo, lo scenario della produzione di energia da fonti rinnovabili sta diventando sempre più variegato. Vengono proposte continuamente nuove tecnologie che sfruttano i più svariati fenomeni fisici oppure rifioriscono vecchie tecniche che grazie ad aggiornamenti tecnologici assumono nuova competitività. Così l'energia solare, la più immediata forma di energia disponibile, sta progressivamente riacquistando un ruolo di prim'ordine per la produzione diretta di energia elettrica grazie all'accoppiamento con sistemi di captazione e dispositivi di conversione energetica sempre più raffinati. Nel presente articolo vengono descritte le principali tecnologie di conversione dell'energia solare attualmente impiegate o in fase di studio, con particolare attenzione agli aspetti tecnico-economici distintivi di ciascuna tecnologia. Vengono in particolare valutati i vantaggi offerti dall'utilizzo del motore Stirling in accoppiamento con sistemi di captazione a concentrazione quale tecnologia per la conversione in energia elettrica dell'energia solare.

### 1 INTRODUZIONE

Negli ultimi anni alcune tipologie di sistemi solari, tra i quali i sistemi di captazione e concentrazione dell'energia solare diretta, denominati solare termodinamico a concentrazione (CSP - Concentrating Solar Power), sono stati oggetto di profonde innovazioni tecnologiche che hanno consentito di migliorarne sensibilmente sia le prestazioni che l'affidabilità.

L'obiettivo degli impianti solari termici a concentrazione è quello di utilizzare la radiazione solare per produrre energia termica ad alta temperatura in modo da convertirla convenientemente in energia di prima specie; in accordo con Carnot maggiore è la temperatura alla quale è disponibile il calore maggiore è il rendimento di conversione.

Il calore solare viene convertito in energia di prima specie attraverso l'impiego di cicli termodinamici tradizionali (Rankine, Stirling, ecc.) che tuttavia spesso vengono realizzati impiegando particolari fluidi (vedi Ciclo Rankine organico-ORC) o adottando specifici accorgimenti (impiego di Sali fusi come fluido termovettore) in modo da renderli idonei allo sfruttamento dell'energia solare che per sua natura è discontinua e non direttamente accumulabile.

Una delle problematiche principali di taluni impianti riguarda proprio il sistema di concentrazione il cui rendimento e affidabilità ne possono determinare la resa energetica e la convenienza economica. A tale proposito si possono distinguere due tipologie principali di sistemi a concentrazione: lineari o puntuali. I sistemi lineari sono più semplici ma, a causa della minore concentrazione della radiazione, raggiungono temperature di funzionamento più basse mentre quelli puntuali raggiungono temperature elevate rendendo possibile l'impiego di tecnologie di conversione energetica tradizionale, di contro sono caratterizzati da

maggiori perdite di energia. In base alla geometria ed alla disposizione del sistema di concentrazione rispetto al ricevitore, si possono invece distinguere tre principali tecnologie di impianto: la torre solare, anche nella variante a ventilazione, il collettore parabolico lineare e il sistema a disco parabolico. In aggiunta consideriamo anche la tecnologia fotovoltaica associata anch'essa con sistemi a concentrazione. Nel presente lavoro si opera un confronto tecnico economico fra le diverse tipologie di sistemi a concentrazione discutendone vantaggi e limiti ed opportunità applicative. Il confronto viene effettuato prendendo a riferimento il fotovoltaico piano che ad oggi costituisce la tecnologia per lo sfruttamento e la conversione dell'energia solare più diffusa e matura.

### 2 IMPIANTI FOTOVOLTAICI

La tecnologia fotovoltaica consente di trasformare direttamente la luce solare in energia elettrica senza necessità dell'utilizzo di organi in movimento. Essa sfrutta l'effetto fotovoltaico che è basato sulle proprietà di alcuni materiali semiconduttori di generare elettricità quando sottoposti ad energia raggianti. Il fotovoltaico costituisce una tecnologia che ad oggi è già matura ed affidabile tuttavia la sua convenienza economica è garantita solamente dai meccanismi di incentivazione introdotti dai vari Paesi [1]; basti pensare che il prezzo di un impianto fotovoltaico è quotato indicativamente circa 3.000/3.500 €/kW<sub>p</sub> [2], con costo di produzione dell'energia paria a circa 27 c€/kWh<sub>e</sub>, non ancora competitivo quindi con le fonti di energia tradizionale (vedi Tabella 1).

Tabella 1 - costi di produzione dell'energia elettrica [3].

Tecnologia		Costo di produzione (€/MWh)				
		Costo del capitale	Costo O&M	Costo combustibile	Costo rete trasmissione	Costo totale
Carbone	Convenzionale	47.0	2.6	16.2	2.4	68.3
	Avanzato	55.2	3.6	13.9	2.4	75.1
	Avanzato con CCS	63.0	4.3	17.9	2.7	87.9
Gas naturale	Ciclo Combinato (CC)	15.6	1.2	37.3	2.4	56.5
	CC avanzato	15.2	1.1	35.2	2.4	53.9
	CC avanzato con CCS	29.8	1.8	42.8	2.6	77.0
	Ciclo Aperto	27.9	3.2	56.4	7.3	94.8
	Ciclo avanzato Aperto	26.2	2.8	47.6	7.3	84.0
Nucleare		64.5	8.0	6.4	2.0	80.9
Eolico	Onshore	88.7	7.1	0.0	5.7	101.5
	Offshore	108.7	16.2	0.0	5.0	129.9
Solare	Fotovoltaico	256.2	4.4	0.0	8.8	269.3
	Termico	152.6	14.8	0.0	7.1	174.5
Geotermico		59.8	15.6	0.0	3.3	78.7
Biomassa		49.8	6.2	16.9	2.6	75.5
Idro		70.5	2.4	4.8	3.9	81.5

### 3 SISTEMI A CONCENTRAZIONE

I sistemi a concentrazione promettono di ridurre il costo di produzione del kWh in maniera sensibile fino a 0,06-0,07 €/kWh<sub>e</sub> in modo eventualmente da raggiungere le cosiddette condizioni di "grid parity".

In generale, il rendimento globale di conversione di un impianto a concentrazione può essere calcolato come prodotto dei rendimenti dei principali componenti dell'impianto:

$$\eta_{TOT} = \eta_{CAPT} \cdot \eta_{RADTERM} \cdot \eta_{ACC} \cdot \eta_{CONV} \cdot \eta_{SERV} \quad (1)$$

Assegnando cautelativamente alle suddette efficienze i valori più bassi che queste possono assumere sperimentalmente [4]:

- $\eta_{CAPT} \approx 0,85 - 0,95$
- $\eta_{RADTERM} \approx 0,6 - 0,7$
- $\eta_{ACC} \approx 0,70 - 0,80$  (se presente)
- $\eta_{CONV} \approx 0,25 - 0,35$
- $\eta_{SERV} \approx 0,97 - 0,99$

si ottiene che in assenza di sistema di accumulo  $\eta_{TOT}$  è compreso tra 0,10 e 0,23.

#### 3.1 Torre solare

I sistemi a torre solare utilizzano un insieme di grandi specchi riflettenti o eliostati, che seguono il movimento del sole e concentrano la luce solare su un ricevitore posto sulla sommità di una torre posta in posizione sopraelevata e baricentrica rispetto agli eliostati. Gli eliostati, di grandi dimensioni (oltre 100 m<sup>2</sup>), sono disposti in genere a cerchio o a emiciclo intorno alla torre (Figura 1).

Il loro funzionamento si basa su un ricevitore (caldaia) all'interno del quale un fluido termovettore (aria, acqua o sali fusi) viene portato ad alte temperature (600 °C), per produrre il vapore necessario ad alimentare una turbina per la produzione di energia elettrica.

Il costo di realizzazione di tali sistemi è piuttosto alto, variabile tra i 2.700 ed i 5.600 €/kW.



Figura 1 - torre solare.

Complessa risulta inoltre anche la gestione dell'impianto che comporta costi di esercizio mediante superiori agli altri sistemi di captazione della radiazione solare. Per un impianto di taglia pari a 15 MW il costo di produzione dell'energia risulta pari a 8 – 12 c€/kWh in funzione della latitudine di installazione.

Nel corso dei primi anni 80, venne realizzato nel deserto californiano il primo impianto dimostrativo a torre centrale con potenza nominale elettrica di 10 MW. Successivamente, l'impianto venne ripensato e modificato in molti aspetti, rimanendo poi in attività fino al 1999.

E' proprio sulla scia di questi primi incoraggianti esperimenti, che ora in molte parti del mondo (Spagna, Stati Uniti, ecc.) diversi impianti a torre sono in fase di progettazione o di realizzazione, come quello di Siviglia composta da 1.255 eliostati, ognuno di 1.290 m<sup>2</sup>, per un totale di superficie captante di 1,6 km<sup>2</sup> e torre alta 160 m per una potenza complessiva di picco pari a 20 MW [5].

A parità di area occupata, la produttività di tali sistemi è in genere inferiore a quella del fotovoltaico a causa dei seguenti motivi:

- minor rendimento a causa delle perdite termiche;
- minor tempo di esercizio utile poiché la produzione è praticamente nulla in condizioni di sola radiazione diffusa.

#### 3.2 Torre solare a ventilazione

La torre solare a ventilazione [6] (Figura 2) è una tipologia d'impianto di nuova concezione che prevede l'impiego di un'enorme torre per convogliare aria riscaldata dal sole mediante una grande serra alla sua base, verso la cima, attraversando decine di turbine eoliche poste nella parte inferiore della torre e/o all'interno del camino. All'interno della serra, che può estendersi anche per decine di kmq, vi è inoltre la possibilità di realizzare coltivazioni di molteplici specie vegetali, impossibili da immaginare magari in zone desertiche, grazie al particolare microclima che si viene a creare.

Le torri producono energia grazie alla luce del sole che riscalda l'aria (circa 70°C) all'interno della serra trasparente alla base del camino (Figura 3).

Quando l'aria sale trasferisce alle turbine eoliche la sua energia cinetica che viene trasformata in energia elettrica.

Come detto, la struttura della serra alla base fornisce un ambiente perfetto per la coltivazione di numerose colture, e questo permette all'impianto di produrre energia anche dopo che il sole sia tramontato.

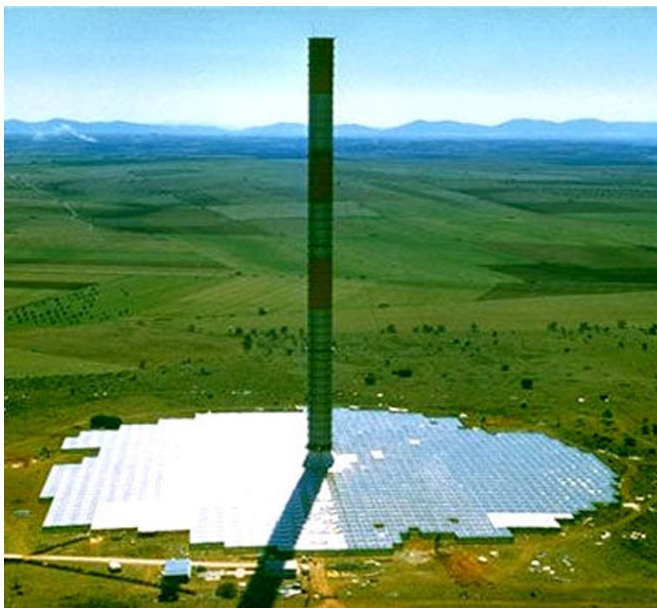


Figura 2 - prototipo di torre solare a ventilazione.

L'acqua utilizzata per le colture, infatti, viene riscaldata naturalmente durante il giorno trasferendo questa energia poi alla torre di notte.

Le torri solari a ventilazione sono ancora nella fase progettuale, tuttavia le previsioni stimano un costo di realizzazione compreso tra i 1.700 - 2.000 €/kW<sub>e</sub>.

A parità di area occupata, si prevede che la produttività di tali sistemi possa essere minore di quella del fotovoltaico poiché, nonostante il funzionamento ininterrotto sulle 24 ore, il rendimento di conversione risulta molto basso (2 - 3%). Il progetto di un'opera da realizzarsi nel deserto australiano prevede un costo dell'impianto pari a circa 500 M€ per una potenza di 200 MW, con una superficie totale coperta di 40 km<sup>2</sup>. Quindi il costo per unità di superficie risulta intorno a 15 €/m<sup>2</sup> [7].

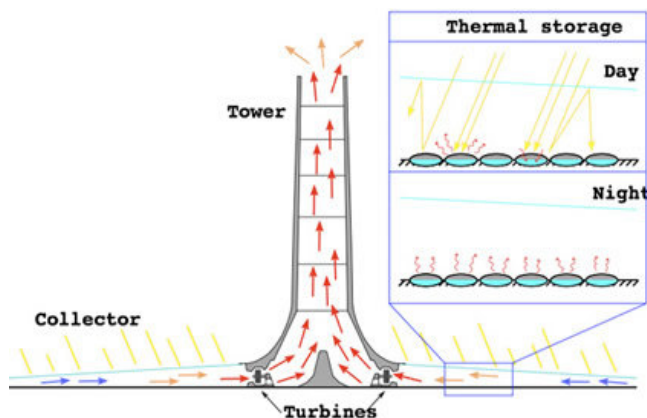


Figura 3 - funzionamento di torre solare a ventilazione.

### 3.3 Sistemi a collettore parabolico lineare

Questi sistemi sono attualmente i più maturi dal punto di vista della tecnologia del solare termodinamico. Il loro funzionamento si basa su una struttura modulare costituita da collettori parabolici collegati in serie, disposti in file parallele anche molto lunghe (Figura 4). L'unità minima è realizzata mediante uno specchio di vetro ad alta riflettività a forma di cilindro parabolico, la cui apertura è generalmente compresa tra 5 e 6 metri, che concentra i raggi solari su un tubo ricevitore posizionato sul fuoco del profilo parabolico.

Il tubo ricevitore, di forma cilindrica, in genere contiene in posizione coassiale un secondo tubo cilindrico, entrambi di vetro, tra i quali è realizzato il vuoto. Un fluido termovettore, tipicamente olio minerale diatermico ma anche miscele di sali fusi (NaNO<sub>3</sub> e KNO<sub>3</sub>), viene pompato attraverso i tubi ricevitori e alimenta una stazione di potenza localizzata al centro del campo solare. Il calore così prodotto viene trasformato in vapore allo scopo di alimentare un gruppo turbo-generatore elettrico. La temperatura tipica di funzionamento varia da i 390°C impianti ad olio diatermico, fino ai 550°C degli impianti a sali fusi.



Figura 4 - collettore parabolico lineare.

L'insieme dei collettori è fissato ad una struttura di supporto che ne consente la rotazione attorno ad un solo asse permettendo così al sistema di adeguarsi alla traiettoria del sole. L'efficienza di questa tecnologia dipende dal rendimento ottico del concentratore (accuratezza della struttura e caratteristiche dei pannelli riflettenti) ma soprattutto dal rendimento di conversione del tubo ricevitore, che deve assorbire la massima energia solare concentrata e avere le minime dispersioni termiche.

Nell'impianto può essere presente un sistema d'accumulo che consenta di immagazzinare il calore per renderlo disponibile in assenza di soleggiamento diretto.

I costi di realizzazione per impianti di taglia intorno a 50MW oscillano tra i 2.500 ed i 4.800 €/kW<sub>e</sub>. Il costo di produzione dell'energia elettrica è funzione dell'intensità della radiazione solare sul sito di installazione dell'impianto: per valori di 2.100 - 2.600 kWh/m<sup>2</sup> anno il costo del kWh su 25 anni è stimabile in 8 - 12 c€. Il rendimento medio annuo netto di conversione è dell'ordine del 12 - 13%.

A parità di area occupata, la produttività di tali sistemi è in genere inferiore di quella del fotovoltaico a causa dei seguenti motivi:

- potenza persa per servizi ausiliari, pompaggio sali fusi, ecc.;

- minor tempo di esercizio utile poiché la produzione è praticamente nulla in condizioni di sola luce diffusa;
- perdite di calore nel circuito del fluido vettore.

Un'evoluzione del collettore parabolico lineare, ancora in fase di sperimentazione, è rappresentato dal *collettore lineare Fresnel*, che utilizza segmenti di specchi parabolici disposti secondo il principio della lente Fresnel. In questo caso il tubo ricevitore è posizionato nel punto focale ed è fisso, e la movimentazione riguarda esclusivamente il concentratore. Ciò rappresenta un vantaggio in quanto, per far circolare il fluido termovettore, si evita l'utilizzo di tubi flessibili nel collegamento tra i singoli collettori e tra questi e le tubazioni della rete di distribuzione. Inoltre, non essendo presente l'effetto ombra tra concentratori vicini, non è necessario distanziare le file di collettori e quindi si ha un miglior sfruttamento della radiazione che arriva sul terreno. Normalmente questo tipo di impianti impiega l'acqua come fluido termovettore, con produzione diretta di vapore all'interno del tubo ricevitore.

### 3.4 Sistema a disco parabolico

Questo sistema utilizza pannelli riflettenti di forma parabolica che inseguono il sole, con un movimento di rotazione attorno a due assi ortogonali, e concentrano la radiazione solare su un ricevitore montato nel punto focale (Figura 5). Il calore ad alta temperatura viene normalmente trasferito ad un fluido ed utilizzato in un motore, posizionato al di sopra del ricevitore, dove viene prodotta direttamente energia meccanica ed elettrica.

Per ragioni economiche, la dimensione del concentratore non va oltre i 15 m di diametro, limitando quindi la sua potenza massima a circa 25 - 30 kW<sub>e</sub>. La tecnologia è comunque di tipo modulare e permette la realizzazione di centrali di produzione di piccola potenza per utenze isolate.

Sono stati studiati diversi cicli termodinamici e differenti fluidi di lavoro ma le attuali applicazioni industriali si stanno indirizzando sull'impiego dei motori *Stirling* (dish-Stirling).



Figura 5 - sistema a disco parabolico.

Nella quasi totalità delle realizzazioni lo scambiatore ad alta temperatura del motore Stirling viene posizionato direttamente nel fuoco del concentratore parabolico; questa soluzione consente di convertire l'energia solare in elettricità con maggiore efficienza e con costi notevolmente più bassi

rispetto all'impiego di turbine a vapore.

A parità di superficie captante, la produttività dei sistemi a disco parabolico è in genere maggiore di quella del fotovoltaico poiché i motori Stirling attualmente impiegati in questi impianti presentano rendimenti di conversione dell'energia solare in energia elettrica superiori al 30%.

Il costo di produzione dell'energia elettrica è stimato in 15 - 25 c€/kWh<sub>e</sub>, valore interessante per la generazione distribuita e competitivo con il piccolo fotovoltaico.

Con la costruzione in serie si prevede che il costo possa diminuire fino a diventare equivalente a quello dei grandi impianti solari termodinamici. Il rendimento medio annuo netto di questi sistemi è dell'ordine del 18%, con punte del 23-24% in aree con elevato soleggiamento.

### 3.5 Impianti fotovoltaici a concentrazione

Il fotovoltaico a concentrazione rappresenta una delle strade più promettenti per la riduzione dei costi di produzione dell'energia elettrica con celle fotovoltaiche. Concentrare la luce solare su una piccola zona di celle ad alta efficienza permette infatti a parità di potenza installata di ridurre sensibilmente la quantità di materiale semiconduttore impiegato che costituisce la voce di costo più importante di un impianto fotovoltaico. La potenza radiante raccolta mediante concentrazione risulta molto più alta rispetto alla quella relativa alla tecnologia tradizionale. (Figura 6) [8].

In ogni caso, considerando le alte temperature raggiungibili dal ricevitore fotovoltaico, è necessario provvedere ad un efficace sistema di raffreddamento in grado di mantenere la temperatura delle celle fotovoltaiche sotto i 90°C.

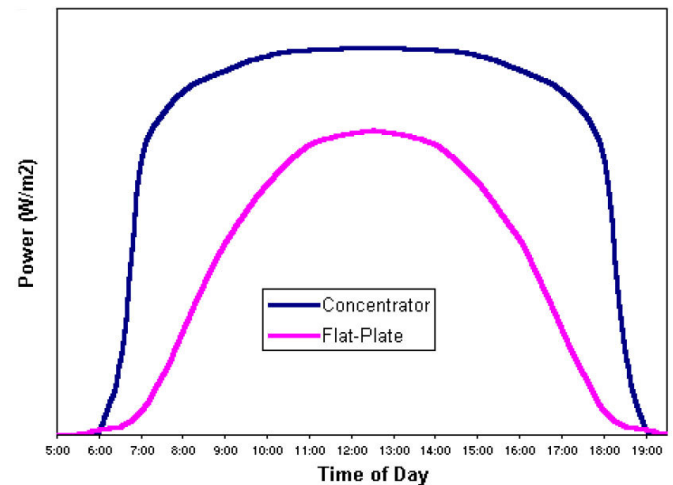


Figura 6 - confronto sulla potenza raccolta tra sistema fotovoltaico tradizionale (*Flat - Plate*) ed a concentrazione.

In tabella 2 sono riportati i costi di realizzazione e di produzione dell'energia elettrica (*LEC - Levelized Energy Cost*) per le differenti tecnologie di conversione dell'energia solare.

I costi sono desunti da dati relativi all'esercizio di impianti esistenti e da valutazioni previsionali di esercizio (torre solare a ventilazione).

Tabella 2 - costi di produzione dell'energia elettrica (*LEC*) per le principali tecnologie di conversione dell'energia solare.

	COSTO IMPIANTO (€/kW)	TAGLIA D'IMPIANTO (kW)	RENDIMENTO CONVERSIONE (%)	LEC (€/kWh)
TORRE SOLARE	2.700-5.600	>1000	13-15	0,08-0,11
TORRE SOLARE A VENTILAZIONE	1.700-2.000	>1000	2-3	0,06-0,07
COLLETTORI PARABOLICI LINEARI	2.500-4.800	>100	13-14	0,08-0,12
DISH STIRLING	10.000-12.000	<100	18-24	0,15-0,25
FOTOVOLTAICO	3.500	<10	13-17	0,25-0,28
FOTOVOLTAICO A CONCENTRAZIONE	2.500	<10	20-22	0,14

## 4 MOTORE STIRLING

### 4.1 I principi generali

La principale caratteristica del ciclo Stirling è la modalità di funzionamento a ciclo chiuso che ne consente l'alimentazione con qualsiasi fonte di calore per cui, ad esempio, può essere sfruttata l'energia solare durante i periodi di massimo soleggiamento ed eventualmente altre fonti di energia termica per i restanti periodi in modo da assicurare una produzione continua.

Per la generazione solare elettrica nella gamma di 1–100 kW<sub>e</sub>, il motore Stirling sembra essere la migliore soluzione tecnologica disponibile [9]. Nonostante infatti la sua limitata efficienza (fino ad un massimo del 40%), il motore Stirling presenta un'affidabilità molto elevata e costi di realizzazione contenuti.

### 4.2 Dish-Stirling

I motori Stirling impiegati con sistemi a concentrazione solare (dish-Stirling) sono caratterizzati da alte pressioni (200 bar) ed alte temperature di funzionamento (700°C); i fluidi di lavoro maggiormente utilizzati sono elio ed idrogeno. Il ricevitore, realizzato in ceramica ad alta conducibilità termica, è composto da tubi paralleli di piccolo diametro e pareti sottili nei quali passa il fluido di lavoro spinto dai pistoni. La temperatura del ricevitore viene regolata aumentando o diminuendo la quantità di fluido di lavoro al suo interno. Il rigeneratore è costituito da un materiale poroso realizzato con sottili aghi metallici molto fitti posizionati longitudinalmente o trasversalmente alla direzione di propagazione del gas.

Il motore Stirling viene generalmente accoppiato con un generatore asincrono che può essere sfruttato per l'avviamento iniziale del sistema. Il transitorio di avviamento, infatti, è un momento delicato in quanto il motore per poter erogare potenza deve attendere che l'irraggiamento solare assuma un valore compreso tra i 300 ed i 400 W/m<sup>2</sup>. Le parti meccaniche del motore devono quindi essere portate a regime prima che il paraboloide venga posto nella posizione di massima captazione per evitare danni alla macchina dovuti alle alte temperature che il ricevitore raggiungerebbe in assenza di scambio termico con il gas di lavoro.

Generalmente il fattore di concentrazione del disco parabolico è di circa 1.500 soli. Con un disco di 10 m di diametro può essere installato un motore Stirling con potenza elettrica di circa 25 kW.

## 5 CONFRONTO ECONOMICO

Il confronto sulla convenienza economica dei vari sistemi con tecnologia solare termodinamica a concentrazione (CSP – Concentrating Solar Power) è stato effettuato in base al *LEC* che tiene conto di tutti i costi (realizzazione, gestione e manutenzione dell'impianto, ecc.) che incidono sul prezzo di generazione dell'energia elettrica.

Al fine di operare un confronto omogeneo tra i costi di produzione dell'energia elettrica delle tecnologie prese in esame, il *LEC* è stato stimato mediante la relazione seguente [10] che tiene conto dei costi di realizzazione e gestione dell'impianto, del periodo di vita e della taglia dello stesso nonché dell'intensità della radiazione solare sul sito di realizzazione:

$$LEC = \frac{(C_I + C_M) \cdot (r + \delta)}{\eta_{TOT} \cdot \beta \cdot (1 - e^{-(r+\delta)T})} \quad (3)$$

Il confronto tra i valori teorici così ottenuti ed i dati disponibili in letteratura relativi ad impianti già in esercizio (Tabella 2) mostra una buona corrispondenza tra i valori di *LEC* stimato (Tabella 3) ed il costo reale di produzione dell'energia elettrica per tutte le tecnologie esaminate.

Tabella 3 - valori previsti del *LEC* per le principali tecnologie di conversione dell'energia solare per  $\beta$  pari a 2.000 kWh/anno ed  $r$  pari al 5%.

	$C_I$ (€/m <sup>2</sup> )	$C_M$ (€/m <sup>2</sup> )	$T$ (anni)	$\delta$ (%)	$\eta_{TOT}$ (%)	LEC (€/kWh <sub>e</sub> )
TORRE SOLARE	200	150	40	-	13	0,09
TORRE SOLARE A VENTILAZIONE	16	15	40	1	2	0,05
COLLETTORI PARABOLICI LINEARI	450	100	30	-	14	0,12
DISH STIRLING	1.600	150	30	-	24	0,23
FOTOVOLTAICO	600	10	20	2	11	0,26
FOTOVOLTAICO A CONCENTRAZIONE	400	50	20	4	21	0,11

In Fig. 12 viene riportato l'andamento del *LEC* delle varie tecnologie al variare del soleggiamento. Il grafico mostra come che la tecnologia più conveniente è quella della torre solare a ventilazione (5 c€/kWh<sub>e</sub>).

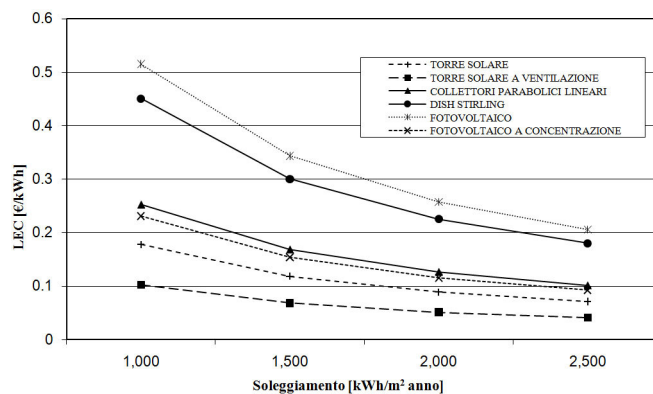


Figura 12 - andamento del *LEC* al variare del soleggiamento  $\beta$ .

Tra le tecnologie che già trovano applicazione quella più conveniente risulta invece la torre solare con 9 c€/kWh<sub>e</sub>, seguita dal fotovoltaico a concentrazione (11 c€/kWh<sub>e</sub>) e dai collettori parabolici lineari (12 c€/kWh<sub>e</sub>).

La tecnologia del dish-Stirling con 23 c€/kWh, sebbene risulti più conveniente rispetto al fotovoltaico tradizionale, presenta tuttavia i costi di produzione dell'energia elettrica più elevati tra tutte le tecnologie emergenti indagate.

In figura 13 sono riportati gli andamenti del LEC delle tecnologie CSP e delle tecnologie che impiegano di fonti di origine fossile, previsti per i prossimi anni.

L'analisi della previsione mostra che nel 2020 si potrebbe avere l'equivalenza economica delle due fonti energetiche in virtù sia della diminuzione dei costi di realizzazione di impianti CSP che dell'incremento progressivo dei costi di estrazione delle risorse fossili.

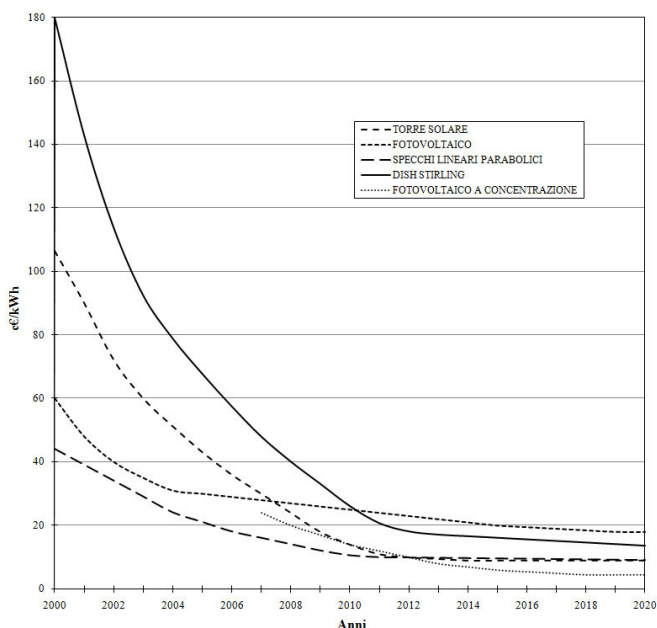


Figura 13 - previsione dell'andamento del LEC dei vari sistemi solari.

La valutazione sulla convenienza economica di un impianto solare non può comunque prescindere anche dalle politiche di incentivazione presenti in molte nazioni per periodi variabili.

In Italia dal 2008 sono ammessi incentivi connessi al *Conto Energia* anche per lo sviluppo di tutte le tecnologie a solare termodinamico, la cui superficie captante superi i 2.500 m<sup>2</sup>. In particolare viene erogata, per un periodo di 25 anni, la tariffa incentivante che va da 0,22 a 0,28 € in funzione del tipo di impianto.

Tabella 4 - tempo di ritorno dell'investimento per le principali tecnologie di conversione dell'energia solare.

	TORRE SOLARE	COLLETTORI PARABOLICI LINEARI	DISH STIRLING	FOTOVOLTAICO	FOTOVOLTAICO A CONCENTRAZIONE
Tempo di ritorno (anni)	5,5	14,0	18,0	7,0	5,0

A titolo di esempio in tabella 4 si riporta il tempo di ritorno

economico di ciascuna delle tecnologie prese in esame, calcolato mediante il metodo del Valore Attuale Netto (VAN).

## 6 CONCLUSIONI

Alcune stime cautelative indicano che nel 2050 tra il 20 e il 25% della produzione globale di elettricità potrà venire dall'energia solare, con una riduzione di sei miliardi di tonnellate l'anno delle emissioni di anidride carbonica [11].

I bassi rendimenti di conversione costituiscono attualmente il limite principale alla diffusione delle tecnologie solari. Occorre inoltre considerare che, anche se in alcune zone (ad es. aree desertiche) può essere ritenuto trascurabile l'impatto ambientale dovuto alla presenza di grandi superfici captanti, nella gran parte delle aree occidentali l'applicazione in maniera estensiva di queste tecnologie non è ancora oggi realizzabile.

Allo stato attuale risulta difficile prevedere quali saranno le applicazioni che prenderanno il sopravvento sulle altre; dalle valutazioni effettuate risulta che le tecnologie che promettono i maggiori rendimenti di conversione sono i sistemi dish-Stirling ed il fotovoltaico a concentrazione. Queste presentano l'ulteriore vantaggio di essere modulari (anche di piccola taglia) e scalabili, cosa molto importante per la produzione elettrica in aree ad alta concentrazione umana e con superficie disponibile per la captazione distribuita a macchia di leopardo.

Sulla base del costo di produzione del kWh<sub>e</sub>, invece, gli impianti di grande taglia, come le torri solari, possono realizzare i migliori risultati anche se i vincoli ed i costi realizzativi assumono un'importanza talmente rilevante da rientrare in programmi energetici di nazioni o di società multinazionali operanti del settore di produzioni energetiche su grande scala. In questo caso le tecnologie con cui si troverebbero a competere direttamente sono quella nucleare e quella di grandi impianti a combustibili fossili.

Una alternativa intermedia, per taglie da qualche centinaio di kW<sub>e</sub> a qualche decina di MW<sub>e</sub>, è rappresentata dai collettori parabolici lineari che permettono la realizzazione di impianti dai costi importanti ma non proibitivi, anche se vengono catalogati come tecnologia ormai matura e difficilmente migliorabile.

## SIMBOLI

- $\beta$  irradiazione media annua [kWh/(m<sup>2</sup>·anno)]
- $\delta$  decadimento annuo dell'efficienza di conversione
- $\eta_{CAPT}$  efficienza del sistema ottico di captazione della radiazione solare diretta
- $\eta_{CONV}$  efficienza di conversione termodinamica del calore in energia meccanica o elettrica
- $\eta_{RAD}$  efficienza del sistema di conversione termica della radiazione concentrata
- $\eta_{SERV}$  perdite di elettricità dovute all'alimentazione dei servizi della centrale
- $\eta_{TOT}$  efficienza totale di conversione
- $C_I$  costo dell'impianto per m<sup>2</sup> captante [€/m<sup>2</sup>]
- $C_M$  costo globale di conduzione e manutenzione per tutta la vita tecnica dell'impianto per m<sup>2</sup> captante [€/m<sup>2</sup>]
- $f$  frequenza di ciclo [Hz]

$P$	potenza meccanica [W]
$P_m$	pressione di ciclo medio [bar]
$r$	tasso d'interesse annuo
$V_p$	volume spazzato dal pistone di potenza [cm <sup>3</sup> ]
$T$	periodo di vita tecnica dell'impianto [anni]

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Ministero dello Sviluppo Economico, Criteri e modalità per incentivare la produzione di energia elettrica mediante conversione fotovoltaica della fonte solare, in attuazione dell'articolo 7 del decreto legislativo 29 dicembre 2003, n. 387, 2007.
2. U.S. Department of Energy, 2008 Solar Technologies Market Report, 2010.
3. DOE/EIA - Energy Information Administration, Annual Energy Outlook 2010, 2009.
4. D. Coiante, Sistemi solari termoelettrici. Alcune considerazioni tecniche per l'applicazione in Italia, <http://www.aspoitalia.it>, 2005.
5. <http://www.treehugger.com>, World's Largest Solar Tower Now Powers 10,000 Homes, 2009.
6. J. Schlaich, R. Bergemann, W. Schiel, G. Weinrebe Design of commercial solar tower systems - Utilization of solar induced convective flows for power generation, Proceedings of International Solar Energy Conference, 2003.
7. E. Gruenstein, Solar Tower Technology, <http://www.brynmawr.edu/geology/206/gruenstein2.htm>, 2008.
8. Descrizione Sistemi Fotovoltaici a Concentrazione, <http://www.scienzaegoverno.org>, 2004.

9. B. Kongtragool, S. Wongwises, A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 7, pp. 131-154, 2003.
10. D. L. Brito, J. Rosellon, Energy and Nanotechnology: Prospects for Solar Energy in the 21st Century, James A. Baker III Institute for Public Policy of Rice University, 2004.
11. IEA - International Energy Agency, Solar photovoltaic energy - Technology Roadmap, 2010.

## SUMMARY

As a result of policies encouraging renewable resources that have been carried out in recent years by governments around the world, the scenario of energy production from renewable sources is becoming increasingly diversified. New technologies are continuously proposed that exploit the various physical phenomena, or old techniques that gain new competitiveness by technology upgrades. Thus solar energy, the most immediate form of available energy, is gradually regaining a leading role for the direct production of electricity due to coupling with collection systems and energy conversion devices increasingly refined.

The present article describes the technologies currently used or under development for conversion of solar energy, with emphasis on technical and economic aspects of each technology badges. Are particularly valued the advantages of using the Stirling engine coupled with collection of current concentration as technology to convert solar energy into electricity.