

*Solare Termodinamico e sue
applicazioni per l'alta, media e
bassa temperatura*

Cos'è il Solare Termodinamico?

l'insieme delle tecnologie finalizzate a produrre energia elettrica per via termodinamica mediante la concentrazione della radiazione solare

... perché il Solare Termodinamico?

per quattro motivi:

- 1) il ST è competitivo con le altre tecnologie solari
- 2) il ST permette di costruire impianti da decine di MWe
- 3) il ST può controllare la potenza erogata
- 4) il ST è una opportunità di sviluppo per più settori

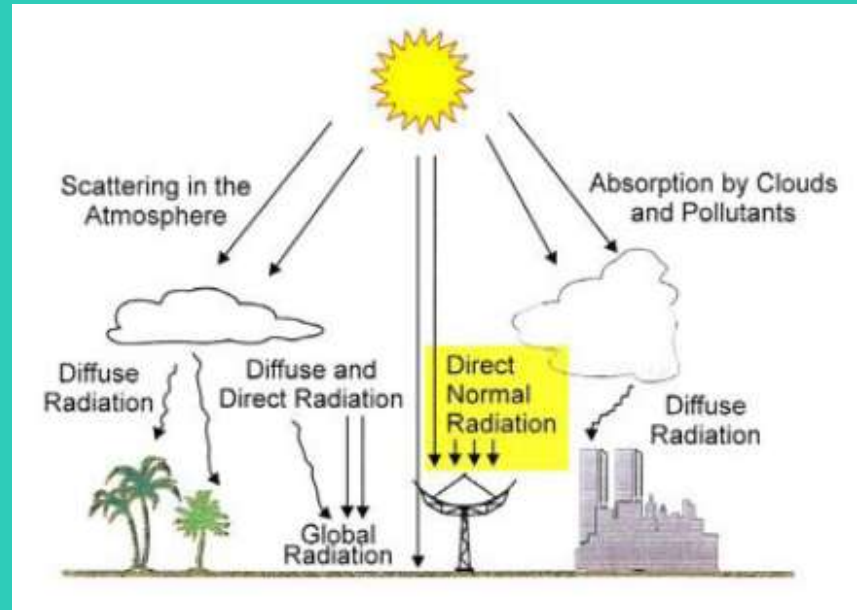
Il solare termodinamico è oggi la via più economica per la conversione dell'energia solare in energia elettrica a grande scala

La radiazione solare per il ST

Il ST sfrutta la
Radiazione
Solare Diretta

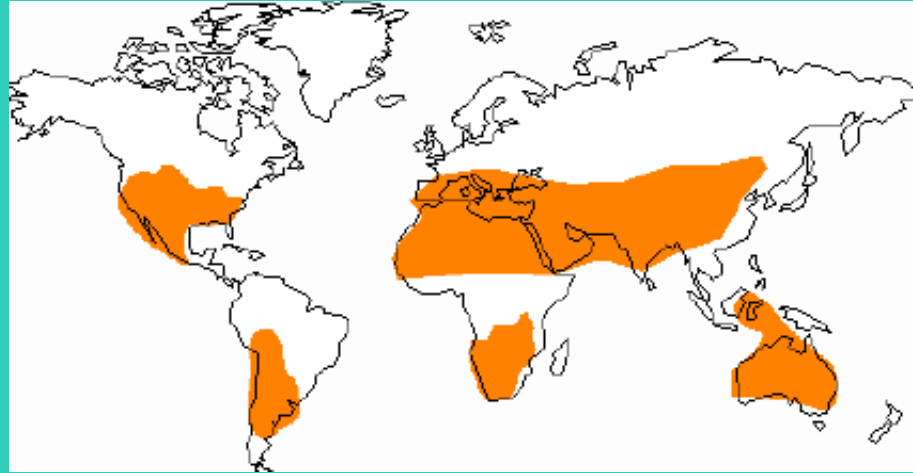
La radiazione
proveniente solo dal
disco solare

0 – 1100 W/m²



Il solare termodinamico utilizza esclusivamente la radiazione solare concentrabile che proviene dal disco solare per raggi quasi paralleli

Disponibilità della radiazione solare nel mondo



Zone con alti valori di radiazione

L'integrale annuo di energia dipende da: clima, latitudine, altezza, inquinamento, l'intensità è maggiore nei climi desertici

Esempi di integrale annuo di DNI:

Barstow clima desertico 2600kWh/m².y

Almeria clima arido mediterraneo 2100kWh/m².y

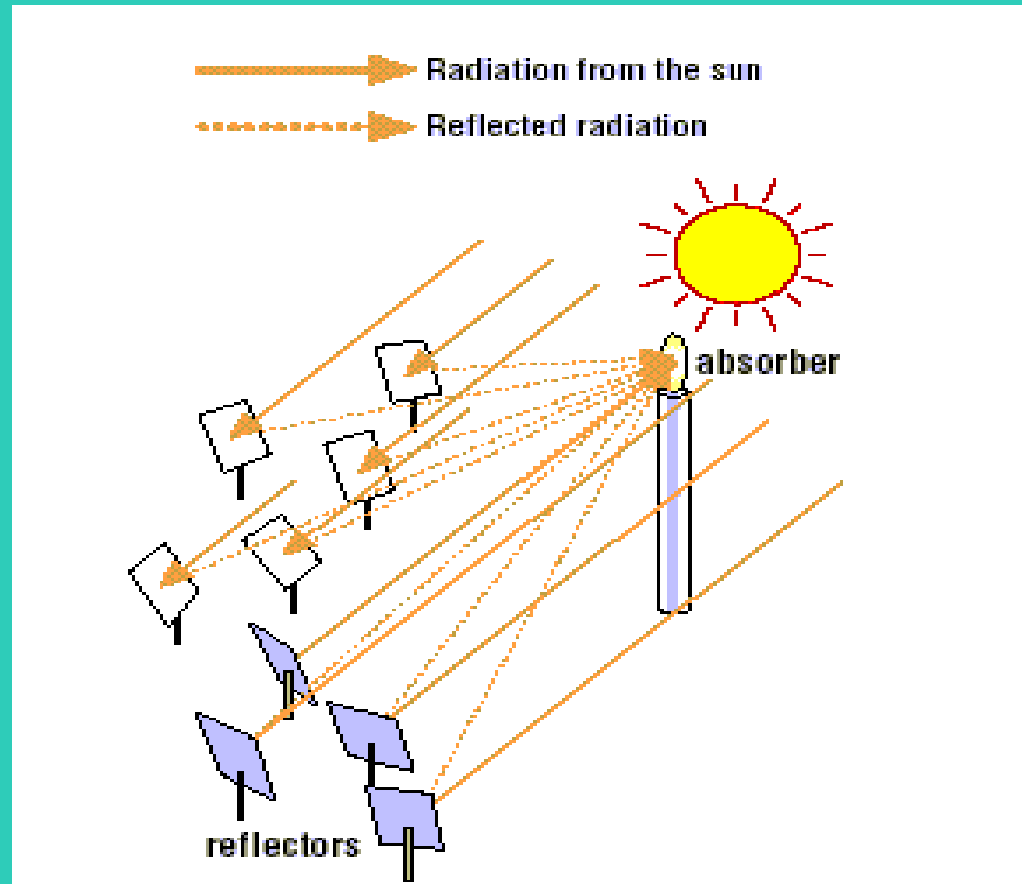
Giordania clima desertico 2700kWh/m².y

Catania clima mediterraneo 1900kWh/m².y

Impianti a Torre Centrale

Tower Power Systems

Un impianto a torre centrale consiste in un ricevitore fisso montato su una torre circondata da un grande numero di eliostati. Gli eliostati inseguono il Sole e concentrano i raggi solari sul ricevitore, il quale ne assorbe l'energia termica. All'interno del ricevitore, un fluido (acqua, aria, o sali fusi) assorbe il calore e lo trasferisce ad un generatore di vapore. Il vapore aziona un turboalternatore.



Gli eliostati

Sono grandi specchi, 120 m², leggermente concavi in grado di concentrare da 5 a 30 volte la radiazione solare a grande distanza, fino a 800 -1000 m. L'eliostato si muove in modo da riflettere sempre la radiazione solare sul ricevitore della torre durante il movimento del Sole. È dotato di un sistema di movimento a due assi, orizzontale e verticale, può essere autonomo o controllato e alimentato centralmente.



PS 10

Nuovo Impianto commerciale Tower Power a vapore



Sito: Siviglia

Potenza nominale : 11 MWe

Campo eliostati: $624 \times 121 \text{ m}^2 = 7.5 \text{ ha}$

Torre 100 m, area impianto 60 ha

Ricevitore a vapore diretto 250°C , 40 bar

Storage termico : $\frac{1}{2}$ h

Energia annua: 23 GWhe, 2100 h

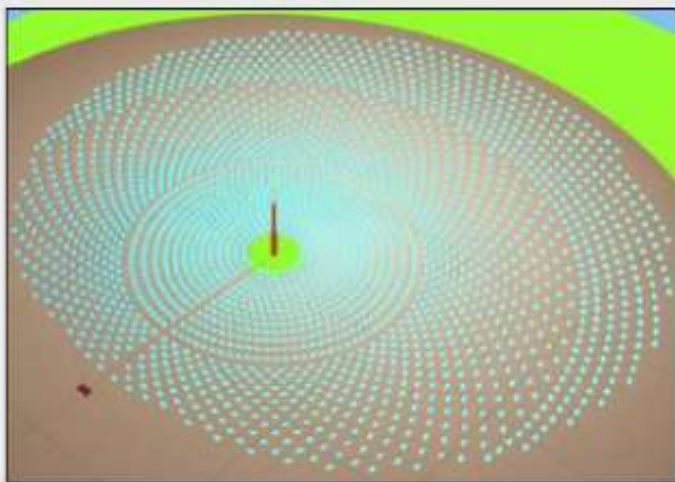
Costo stimato : 33 M€

Status: Operation



Solar Tres

Nuovo Impianto commerciale Tower Power a Sali fusi



Sito: Siviglia

Potenza nominale : 17 MWe

Campo eliostati: 2500 x 120 m² = 30 ha

Storage termico a sali fusi : 15 h

Energia annua: 100 GWhe, 6000 h

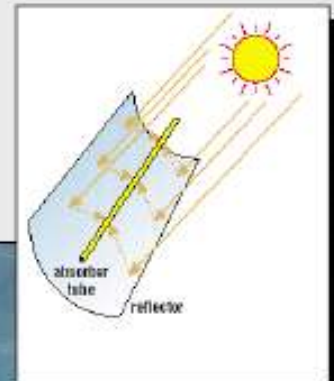
LEC stimato : 14 – 17 c€/kWhe

Status: fine del permitting

L'impianto è progettato per funzionare h24 per 250
giorni l'anno

Impianti a parabole lineari

Parabolic trough system



Un impianto a parabole lineari consiste in campo con lunghe file di collettori paraboloidi lineari che concentrano la radiazione solare su un tubo di acciaio rivestito da un tubo di vetro montato nel fuoco.

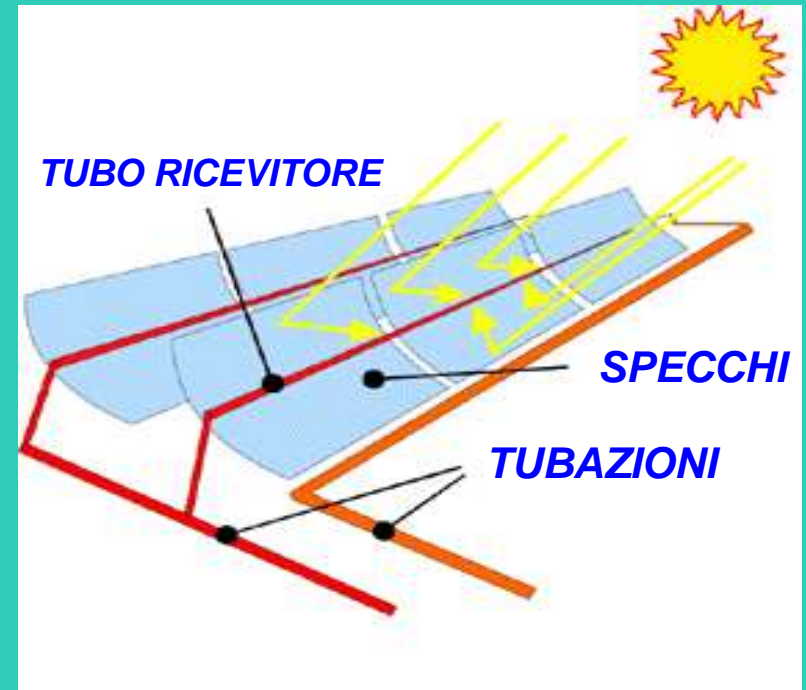
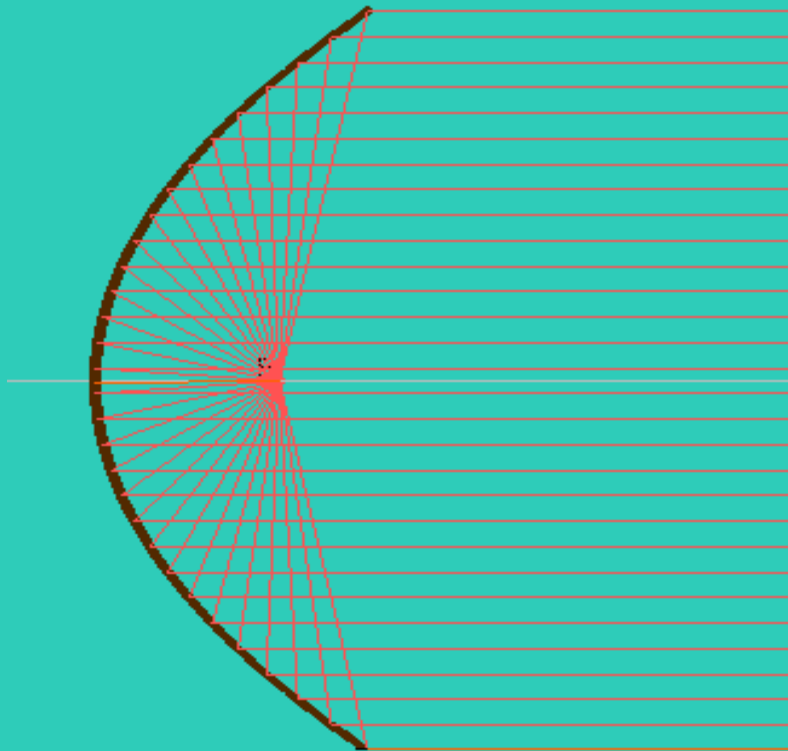
Un fluido termovettore passa nel tubo e trasporta l'energia ad un generatore di vapore che alimenta un turboalternatore che produce energia elettrica.



Collettore parabolico lineare

Specchi parabolici

La radiazione solare diretta viene focalizzata attraverso degli specchi parabolici verso un tubo ricevitore all'interno del quale è presente un fluido.



Una delle tante proprietà delle parabole è: **la proprietà focale**: ogni raggio parallelo all'asse della parabola si riflette nel fuoco.

Quindi gli specchi parabolici vengono indirizzati affinché l'asse della parabola sia parallelo ai raggi solari e in questo modo tutti i raggi che colpiscono la parabola si riflettono sul suo fuoco, ovvero dove è posizionato il tubo ricevitore.

Collettori solari

I carichi aerodinamici dovuti all'azione del vento, vengono determinati con precisione attraverso modelli matematici specifici e prove nella galleria del vento.

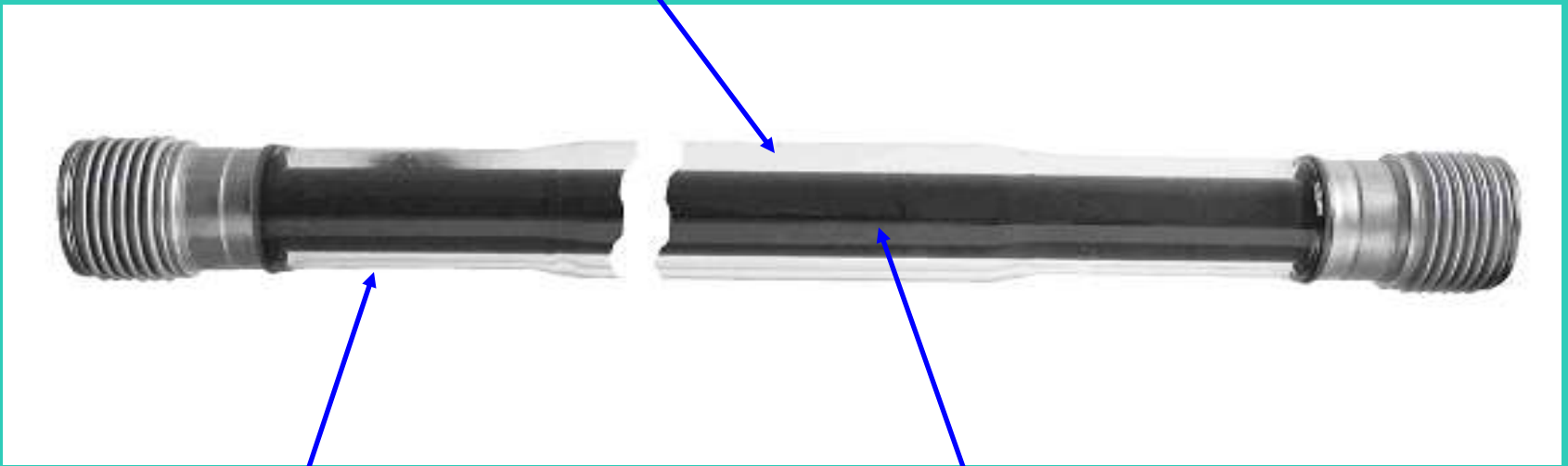


Il sistema è in grado di portare il collettore nella *posizione di sicurezza*, in previsione di eventi atmosferici avversi, quali forte vento o grandine.



Tubo ricevitore

Il tubo ricevitore, situato sulla linea focale degli specchi, è costituito da due cilindri concentrici separati da una **intercapedine sotto vuoto** con funzione di isolante termico.



- ***Il cilindro esterno in vetro***

ha funzione di involucro protettivo ed è collegato mediante soffietti metallici al cilindro interno in acciaio.

Sulla superficie del tubo di vetro viene fatto un **trattamento antiriflesso** per ridurre al minimo la luce riflessa.

- ***Il cilindro interno in acciaio***

costituisce il tubo assorbitore dell'energia solare; al suo interno circola il fluido termovettore.

Sulla superficie del tubo di acciaio è presente un **composto spettralmente selettivo**, sviluppato dall'ENEA, che assicura il massimo assorbimento della luce solare e la minima emissione di radiazione infrarossa, consentendo il raggiungimento dell'elevata temperatura di esercizio dell'impianto.

Fluido termovettore

Nel progetto **ENEA**, a differenza degli impianti a collettori parabolici lineari (es: *California*) in cui il fluido termovettore è un olio minerale :

- infiammabile
- tossico
- non utilizzabile a temperature elevate

si è preferito adottare una miscela sali fusi:



- **60% - Nitrato di sodio (NaNO_3)**
- **40% - Nitrato di potassio (KNO_3)**

Fluido termovettore

I vantaggi dei sali fusi

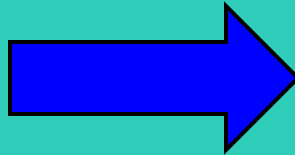
- **accumulo termico a basso costo**, in quanto i sali sono economici, non tossici e a limitato impatto ambientale (si tratta di fertilizzanti naturali) in caso di fuoriuscita accidentale e disponibili in grandissime quantità.
- **aumentare la temperatura** all'uscita del campo solare fino a 550 °C, con aumento delle prestazioni del ciclo termodinamico di produzione elettrica;



Fluido termovettore

Le problematiche dei sali fusi

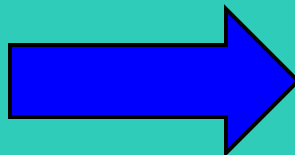
Queste miscele solidificano ad alta temperatura per cui è necessario mantenerle sempre liquide con opportuni accorgimenti tecnologici.



- **sistema di fusione del sale** e sistemi di preriscaldamento elettrico delle tubazioni nelle fasi di “primo avviamento” dell’impianto, quando le tubazioni vanno riempite di sale;
- assicurare una **continua circolazione** dei sali nelle tubazioni, anche di notte, per prevenire solidificazioni della miscela.



Adottare per le tubazioni e la componentistica materiali e tecnologie costruttive adeguati, in particolare per il comportamento alla corrosione.



- Condurre esperienze specifiche per qualificare la componentistica; attività che l’ENEA sta attuando mediante i suoi **circuiti sperimentali** e con altre attività di laboratorio.

Accumulo termico

Una tecnologia matura per la produzione di energia deve erogare l'energia in funzione della domanda.

Fino ad oggi, l'unica energia rinnovabile che ha avuto una diffusione estesa è quella idroelettrica.

Ciò è dovuto sia alla competitività dei suoi costi che alla presenza del bacino che è in grado di compensare le variazioni dovute alle variabilità delle precipitazioni.

Nel caso dell'energia solare, la funzione svolta dall'accumulo di acqua nella diga è sostituita dal calore accumulato nel **serbatoio termico**.

Sono presenti due serbatoi:

- **serbatoio “caldo”** contiene la miscela di sali fusi alla temperatura di 550°C
- **serbatoio “freddo”** contiene la miscela di sali fusi alla temperatura di 290°C



Impianti di prova

A supporto dello sviluppo della tecnologia ENEA sono stati realizzati una serie di impianti di prova e di installazioni sperimentali.

L'impianto PCS (Prova Collettori Solari)

L'impianto PCS è il principale impianto di prova, realizzato presso l'area sperimentale del Centro Ricerche Casaccia (Roma).



L'impianto è costituito da:

- due collettori da 50 m in serie;
- un circuito chiuso dotato di un serbatoio di accumulo dei sali;
- un sistema di frammentazione e fusione dei sali, per eseguire la prima carica;
- un sistema di estrazione e ri-solidificazione per smaltire i sali alla fine del ciclo sperimentale, e sistemi di preriscaldamento elettrico delle tubazioni.

Tramite il circuito PCS sono state eseguite gran parte delle prove e delle **verifiche sperimentali** sui collettori finora sviluppati; inoltre si è acquisita una notevole esperienza, sia progettuale che gestionale, per quanto riguarda l'impiego di sali fusi come fluido termovettore.

Il progetto “Archimede”

Il “**Progetto Archimede**”, frutto di una collaborazione con ENEL, è la principale proposta di realizzazione dimostrativa della tecnologia ENEA.

Questo progetto prevede la realizzazione di un impianto solare integrato con la centrale termoelettrica ENEL ubicata a Priolo Gargallo (Siracusa), già denominata Archimede in onore del famoso inventore siracusano.



Secondo la leggenda nel 212 a.C. avrebbe usato numerosi specchi parabolici per raccogliere e concentrare i raggi solari contro le navi di legno romane.

In questo modo i raggi riflessi ne provocarono l'incendio, distruggendo la flotta romana.

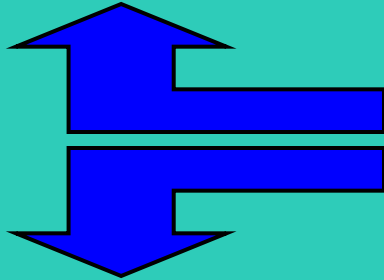


Con l'installazione del campo solare la centrale potrà fregiarsi, oltre che del nome, anche del titolo di **prima applicazione a livello mondiale** di integrazione tra un impianto a ciclo combinato e un impianto solare termodinamico.

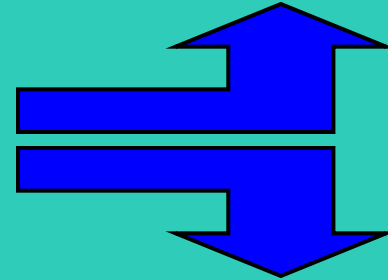


Tempi di costruzione brevi e lunga vita dell'impianto

- ✓ Grazie alla semplicità progettuale, un impianto può essere realizzato in circa tre anni.
- ✓ La sua vita attesa è di circa 30 anni, sicuramente estendibile apportando successive modifiche e miglioramenti.
- ✓ Lo smantellamento finale è semplice ed economico.



Vantaggi



Energia ad alta disponibilità ed adattabilità

L'uso dell'accumulo termico permette l'erogazione di energia indipendentemente dall'ora. Le discontinuità della radiazione solare a breve termine e del ciclo notte/giorno sono completamente compensate. Quindi la produzione di elettricità può prontamente seguire la variazione della domanda giornaliera.

Uso efficiente dell'energia

I sistemi a concentrazione, grazie alla loro elevata efficienza, richiedono superfici 2 o 3 volte inferiori rispetto ai sistemi foto-voltaici, a parità di energia elettrica prodotta.

Un'energia solare sostitutiva per applicazioni tradizionali di potenza

L'energia solare a concentrazione consente di estendere l'uso di energia pulita e rinnovabile in un gran numero di applicazioni industriali.

Una tecnologia rispettosa dell'ambiente

- ✓ Gli impianti solari producono energia senza emissioni né inquinamento.
- ✓ L'intero sistema non è sorgente di rischio o di altri fastidi per le popolazioni presenti nelle sue vicinanze.
- ✓ Alla fine del periodo di utilizzazione, molti dei materiali possono essere o riciclati o ripristinati per ulteriori installazioni.

Collettori lineari di Fresnel

“Nuovo” concept CLFR

Eliostati lineari che riflettono la radiazione su un tubo ricevitore in acciaio protetto da un vetro

Produzione di vapore in campo fino a 270 °C

Test presso la Centrale di Liddell in Australia di 1400 m²

12 eliostati, lung. 100 m

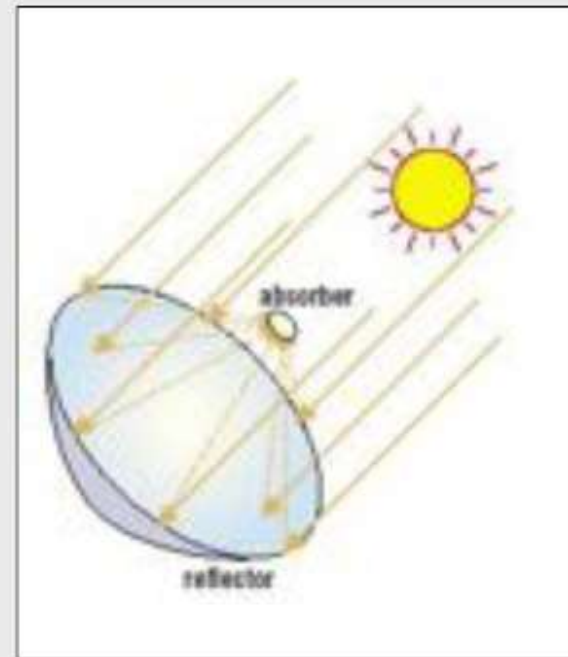


I sistemi dish Stirling

Un sistema dish - Stirling è costituito da un paraboloide riflettente a forma di disco che concentra la radiazione sul ricevitore di un motore Stirling.

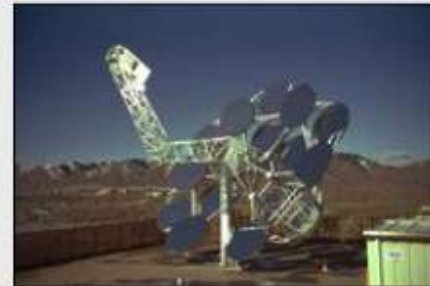
Il motore Stirling è in grado di trasformare il calore in energia meccanica e produrre energia elettrica mediante un alternatore.

Un sistema di movimento a due assi mantiene il paraboloide puntato verso il Sole.



Caratteristiche dei sistemi dish Stirling

- alta efficienza di conversione, fino al 25%
- potenze da 10 – 25 kW
- facilità di installazione
- possibilità di grande riduzione di costi con produzione in serie
- costi di produzione LEC inferiore alla generazione diesel e PV



E' un motore a pistoni di costruzione abbastanza semplice

Utilizza sorgenti di calore esterne (sorgente calda e fredda)

Impiega un gas di lavoro senza scambio con l'esterno

È molto robusto e silenzioso

Non ha valvole interne, non ha emissioni

La potenza può essere regolata mediante la pressione del gas o la corsa dei pistoni

Il motore Stirling



Caratteristiche di EuroDish

Unico generatore solare dish – Stirling Europeo (4° prototipo al mondo al CESI Ricerca)

Basato sul motore Stirling SOLO 161

Concentratore 8.5 m diam., 56 m²

Fattore di concentrazione 2300 soli,
800°C, efficienza netta 17 %,

Sistema di inseguimento del Sole a due assi

Potenza elettrica nominale 10 kWe 400 V ac 3 p. Connesso alla rete



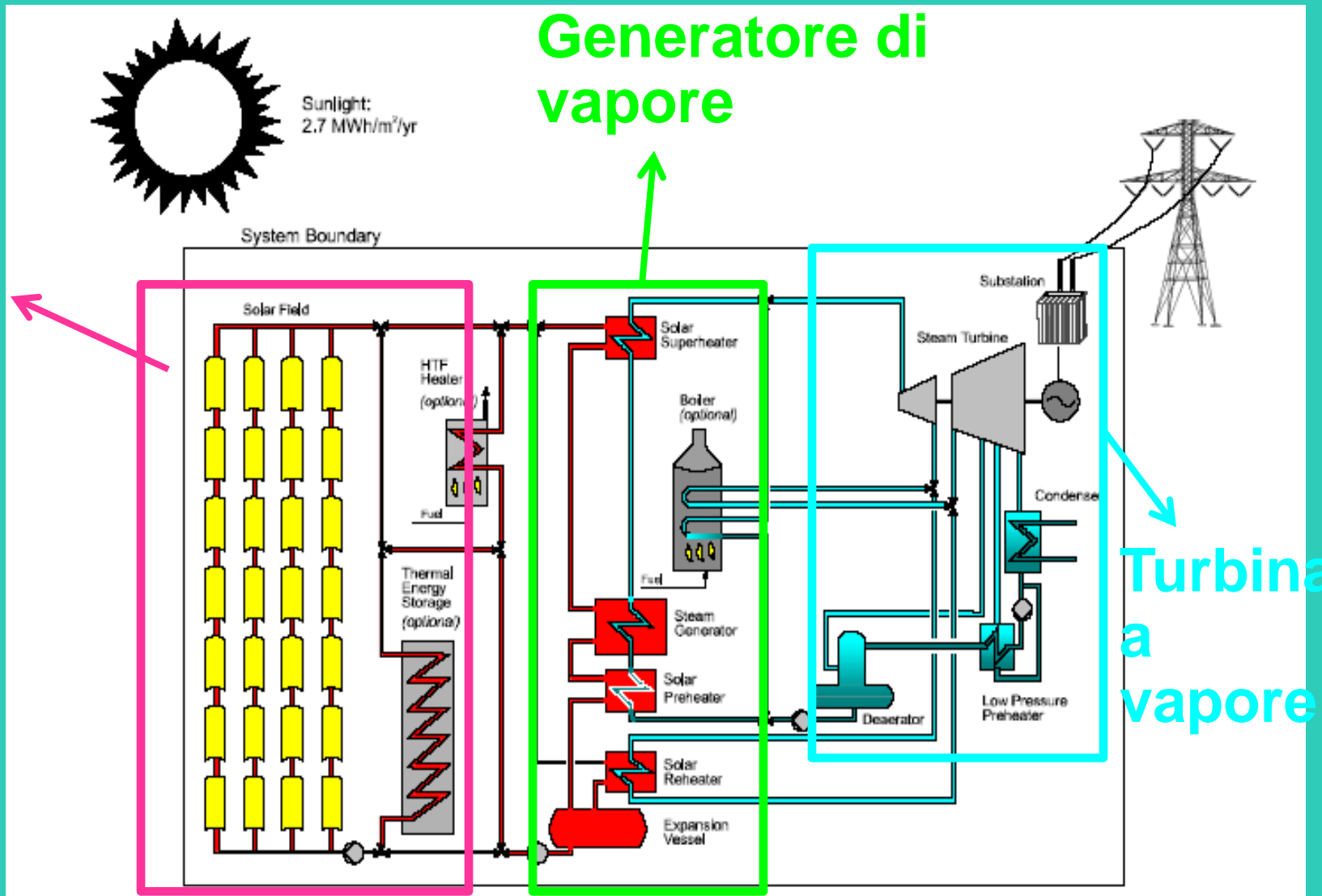
E' il primo generatore solare termoelettrico in Italia dopo 17 anni dalla chiusura di Eurelios

EuroDish è installato anche ad Almeria, Odeillo, Siviglia, Wursburg

Applicazioni

- Cicli Hirn a vapore

Campo solare



Generatore di vapore

Turbina a vapore

Progetto “Archimede”

La legge n.388 del 2000 ha assegnato all'**ENEA** il compito di sviluppare un programma per la produzione dimostrativa di energia elettrica a partire da quella solare utilizzata come sorgente ad alta temperatura.

Il tutto ha portato alla realizzazione del “**Progetto Archimede**” che prevede la realizzazione di un impianto solare integrato alla centrale termoelettrica ENEL ubicata a **Priolo Gargallo**, in provincia di Siracusa.

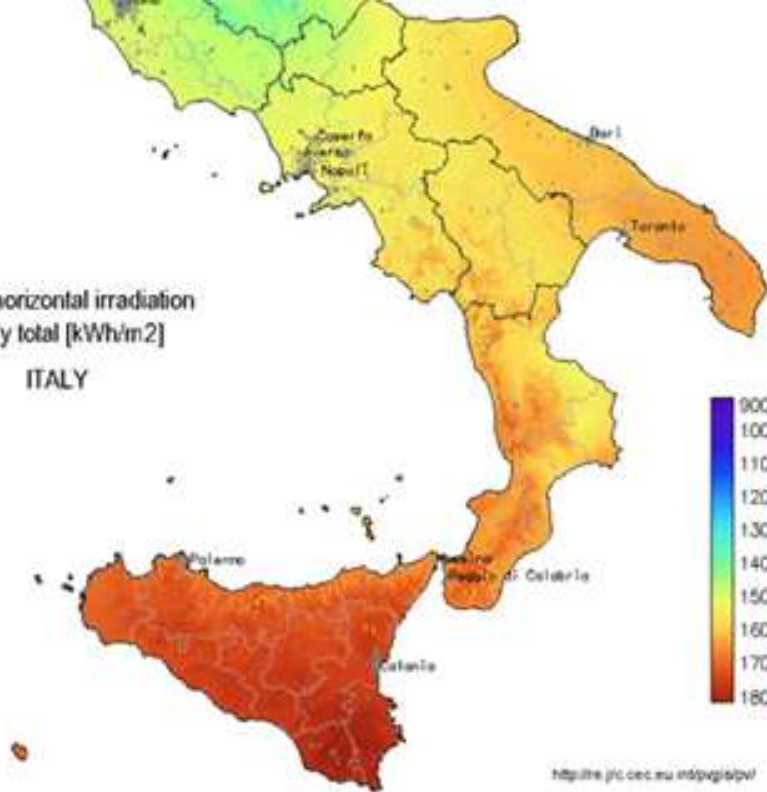
La scelta di Priolo nasce da una serie di motivazioni tecniche:

- Elevati valori di insolazione (1.784 kWh/m²anno);
- Elevata disponibilità di terreno per la sistemazione del campo specchi di 60 ettari;
- Il vapore prodotto verrà immesso direttamente nella turbina a vapore della centrale del ciclo combinato esistente, risparmiando così su tutta la parte convenzionale;



Global horizontal irradiation
yearly total [kWh/m²]

ITALY

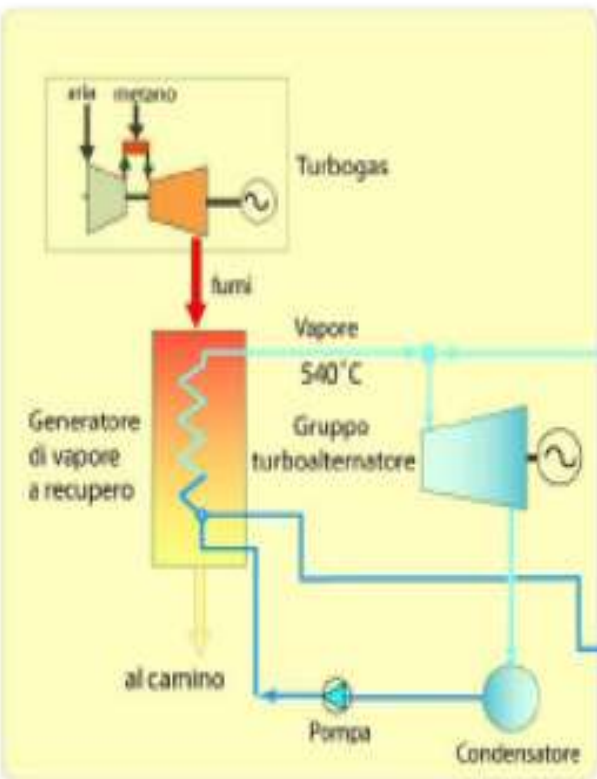


PV-GIS (c) EC JRC 2002-2005

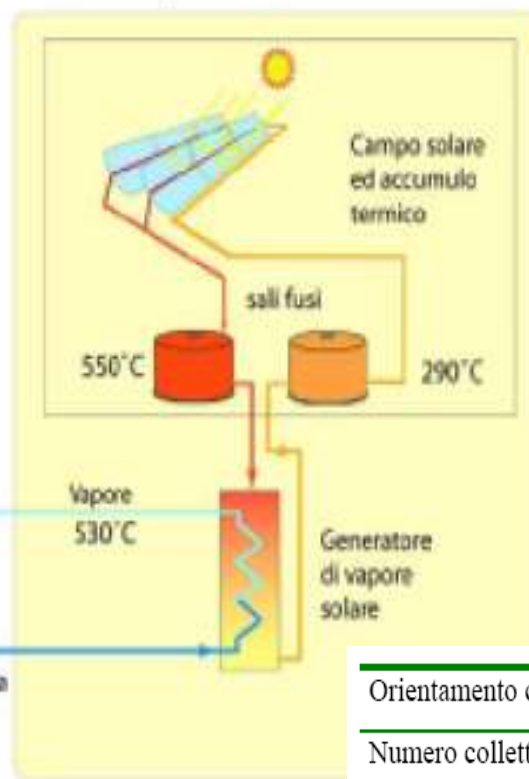
<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>



Ciclo combinato

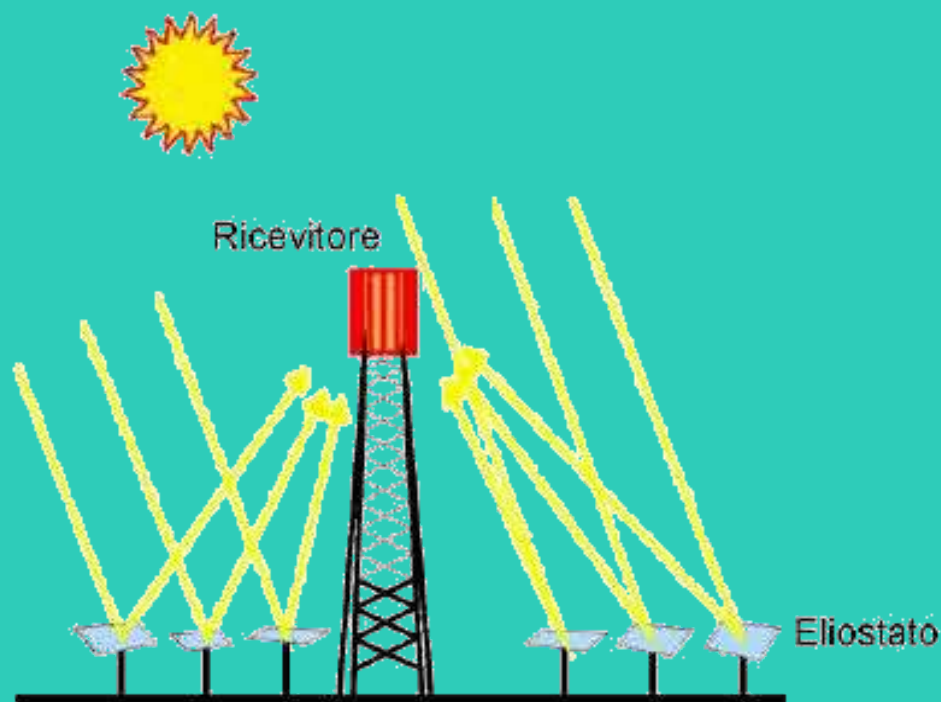


Impianto solare

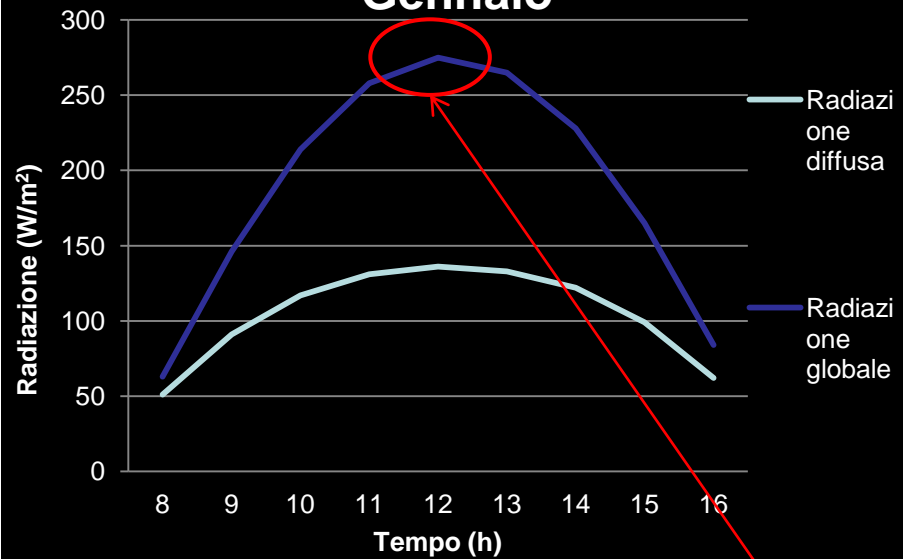


Orientamento collettori	Nord - Sud
Numero collettori	360
Superficie attiva collettori	$199,1 \cdot 10^3 \text{ m}^2$
Risorsa solare media disponibile - DNI	1748 kWh/m ² a
Risorsa solare media effettiva - DNIcos(<i>i</i>)	1540 kWh/m ² a
Potenza elettrica nominale	28,08 MW
Energia termica annua raccolta	179,4 GWh/a
Energia elettrica lorda annua prodotta	59,2 GWh/a
Rendimento energetico globale rispetto al DNI	17%
Emissione annua CO ₂ evitata	39,458 t/a
Risparmio annuo di energia primaria	12,703 tep/a

Analisi delle prestazioni di un impianto solare ibrido con MTG



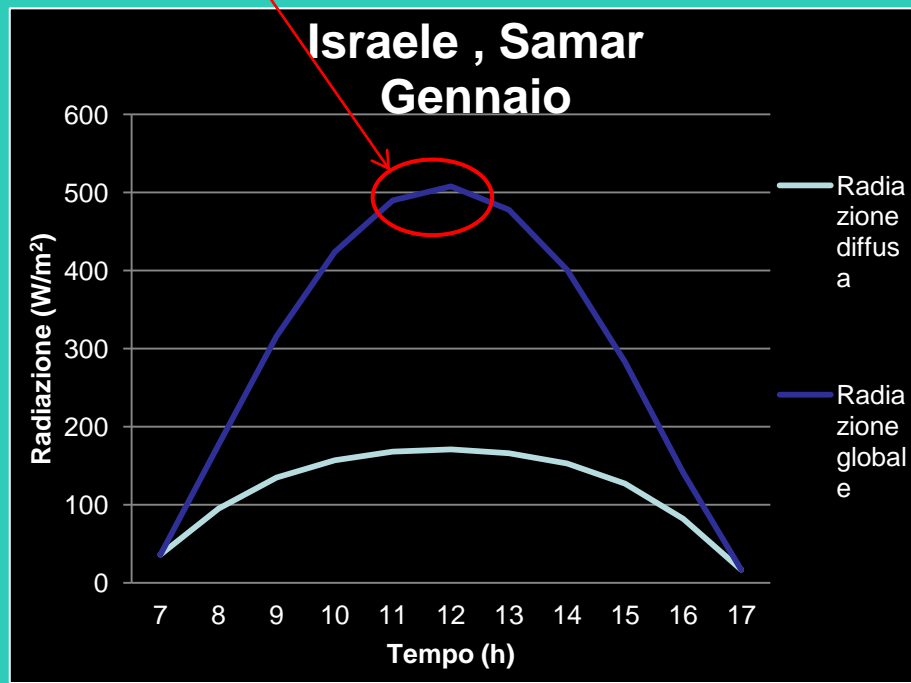
Napoli , Fuorigrotta Gennaio



Napoli , Fuorigrotta Profilo Temperatura



Israele , Samar Gennaio

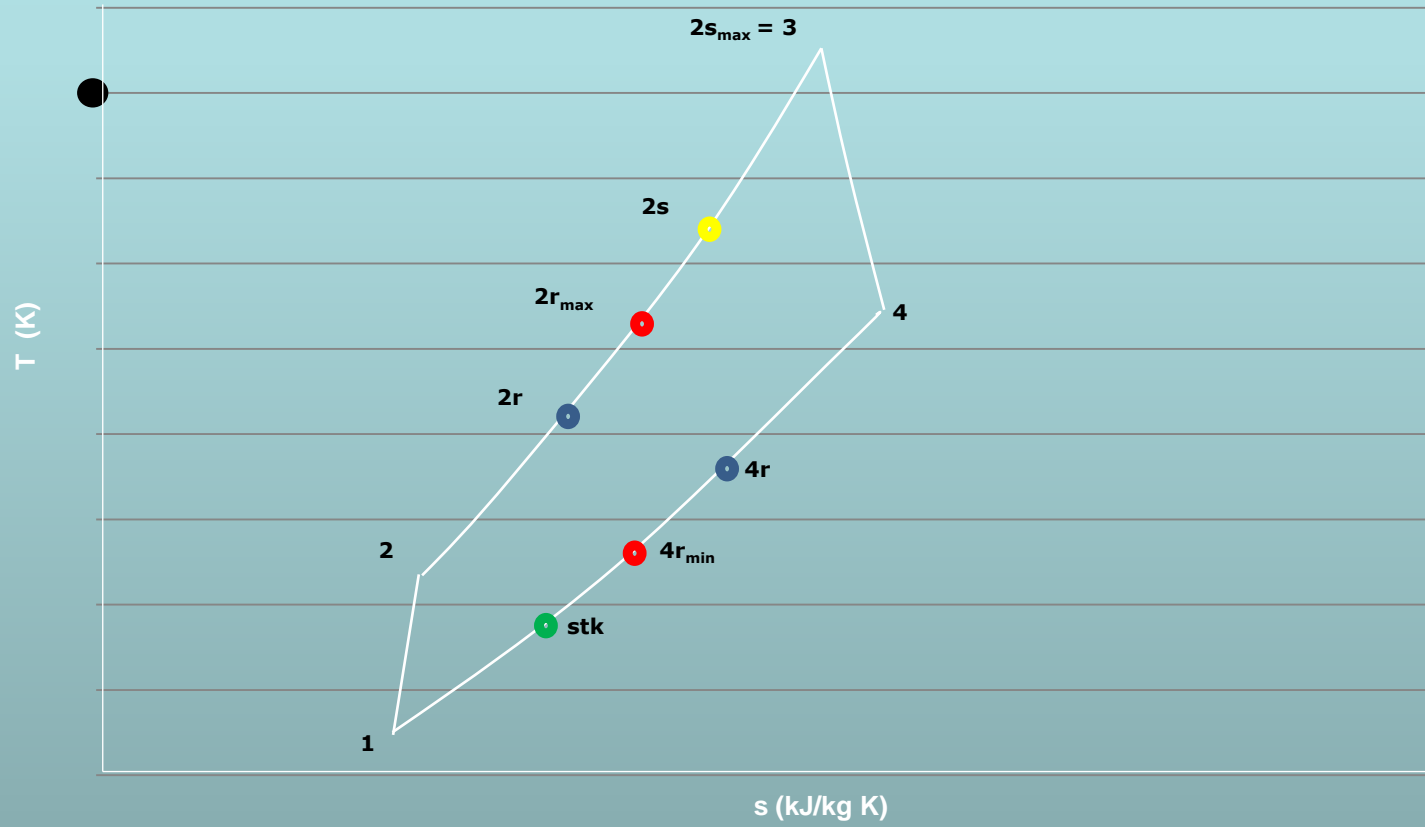


MICROTURBINA A GAS

Impianto solare ibrido da 100 kW



Ciclo Brayton



MICRO - TURBINA A GAS

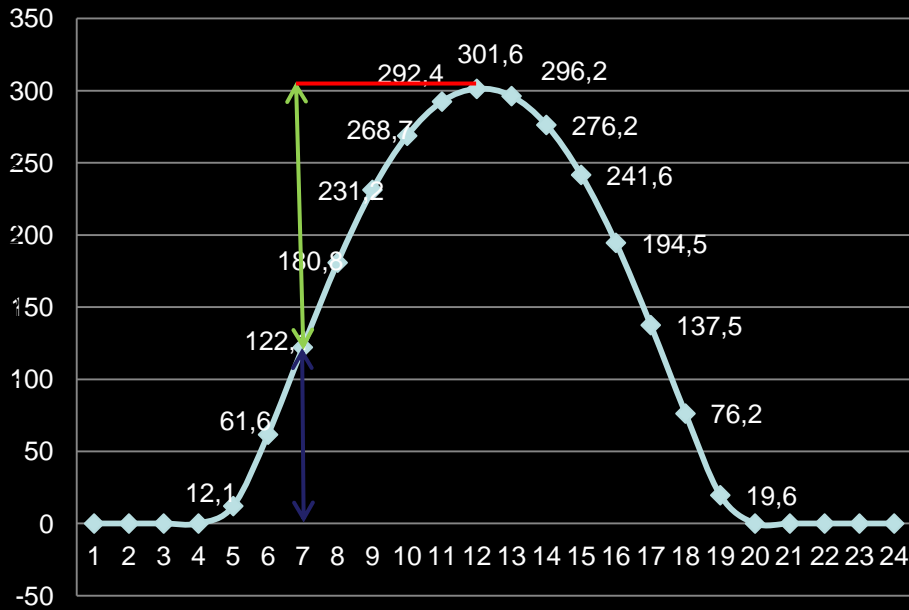
Punto 1	$T_1=288.1$ K	$p_1=1.01$ bar
Punto 2	$T_2=468$ K	$p_2=3.92$ bar
Punto 2r	$T_{2r}=892$ K	$p_{2r}=3.84$ bar
Punto 3	$T_3=1223$ K	$p_3=3.65$ bar
Punto 4	$T_4=948$ K	$p_4=1.05$ bar
Punto 4r	$T_{4R}=529$ K	$p_{4r}=1.02$ bar
Punto stk	$T_{stk}=403$ K	$p_{stk}=1.01$ bar
Potenza meccanica nominale		102 kW
Potenza elettrica nominale		100 kW _e
Potenza termica richiesta dalla turbina		301.6 kW _t
Portata effettiva		0.7901 kg/s
Potenza termica recuperata		103 kW _t
Rendimento globale		0.33
Rendimento globale ai morsetti dell'alternatore		0.304
Rapporto Compressione		3.9
Rendimento politropico turbina		0.85
Rendimento politropico compressore		0.75
Efficienza Rigenerazione (R)		0.9
Velocità di rotazione nominale		64000 giri/min

	NAPOLI	ISRAELE
Mese	Superficie (m²)	
Gennaio	1426.86	761.29
Aprile	643.27	476.21
Luglio	520.75	394.40
Ottobre	811.97	536.27

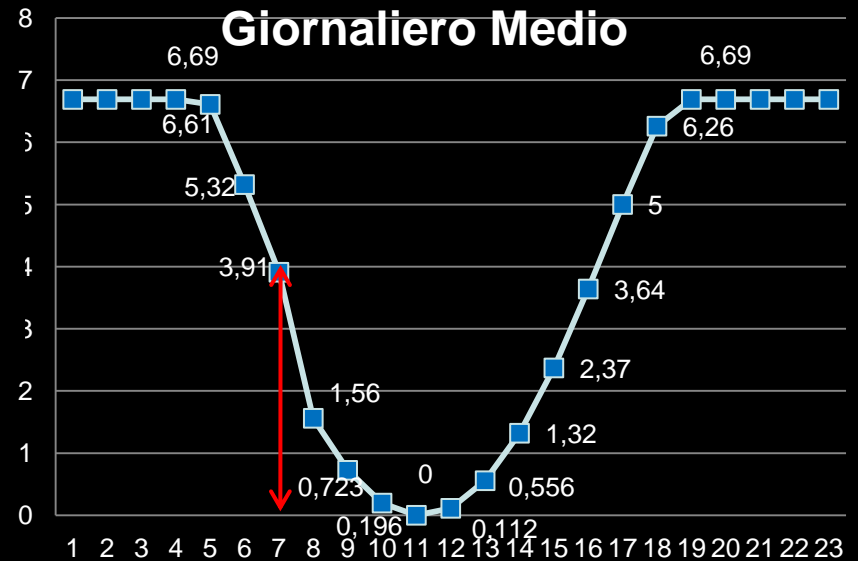
$$S_{collettore} = \frac{\dot{Q}}{I_{solare} \cdot \eta_{collettore}}$$

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{Q} - \dot{Q}_{solare}}{H_i \cdot \eta_b} = \frac{\dot{Q}_{comb}}{H_i \cdot \eta_b}$$

Potenza Termica

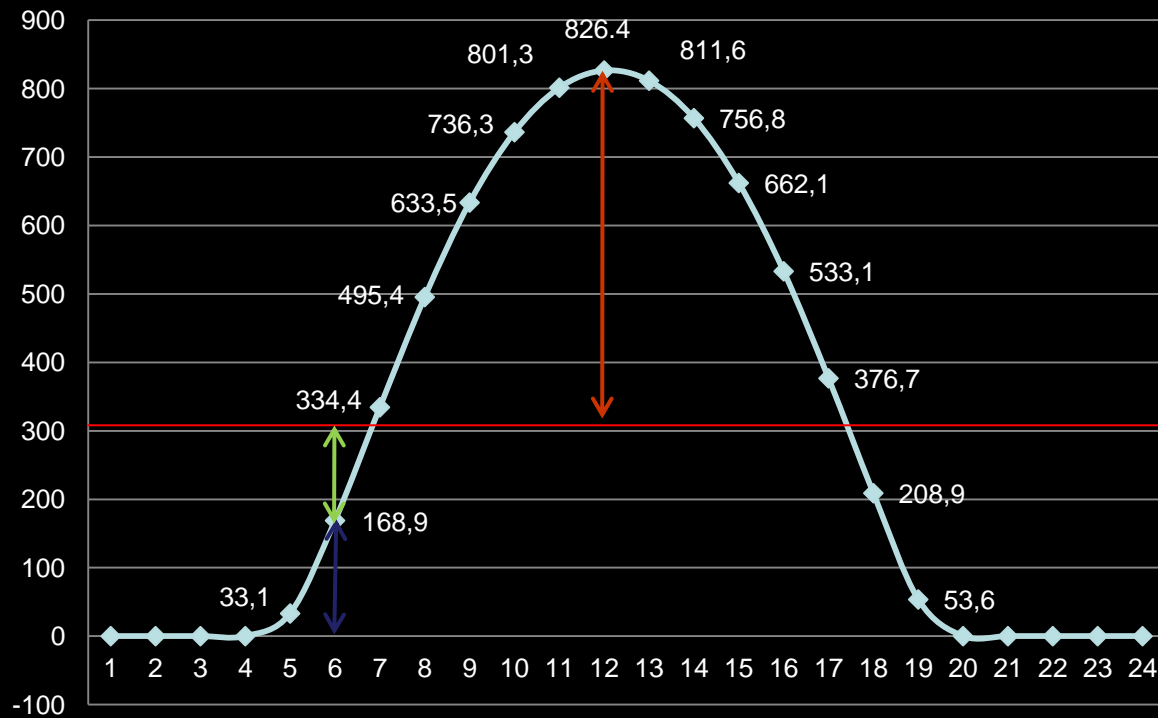


Consumo Combustibile Giornaliero Medio



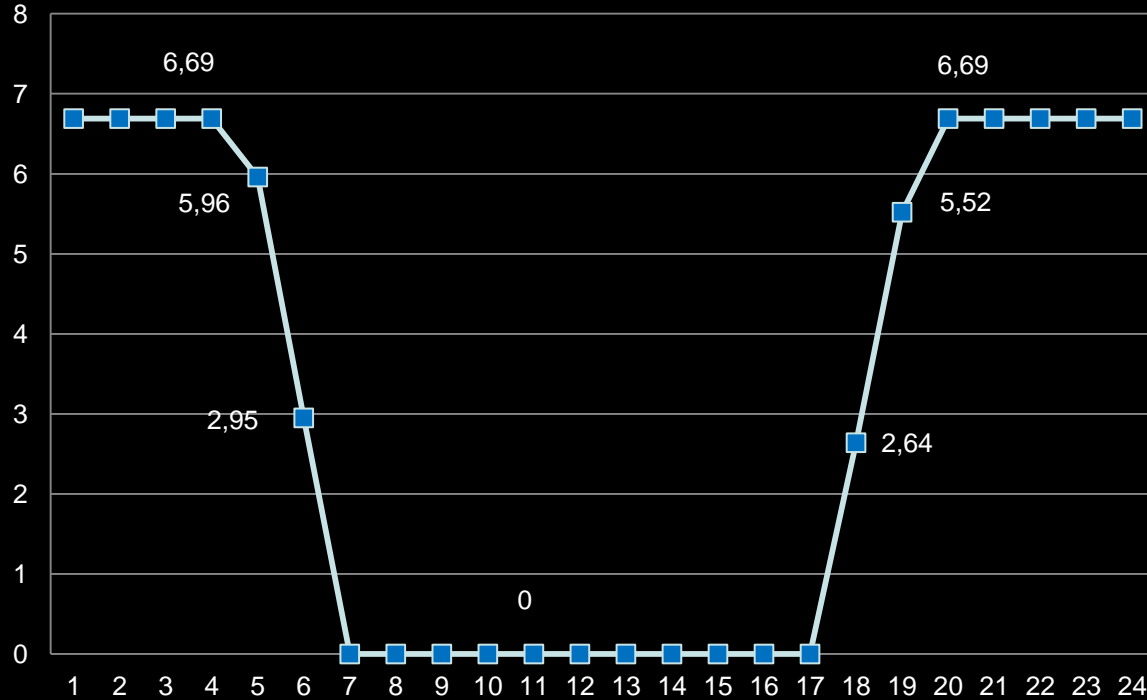
$$\dot{Q} = I_{solare, luglio} \cdot S_{collettore, gennaio} \cdot \eta_{collettore}$$

Potenza Termica



$$\dot{Q} = I_{\text{solare, luglio}} \cdot S_{\text{collettore, luglio}} \cdot \eta_{\text{collettore}}$$

Consumo Combustibile Giornaliero Medio



$$\dot{m}_f = \frac{\dot{Q} - \dot{Q}_{solare}}{H_i \cdot \eta_b} = \frac{\dot{Q}_{comb}}{H_i \cdot \eta_b}$$