

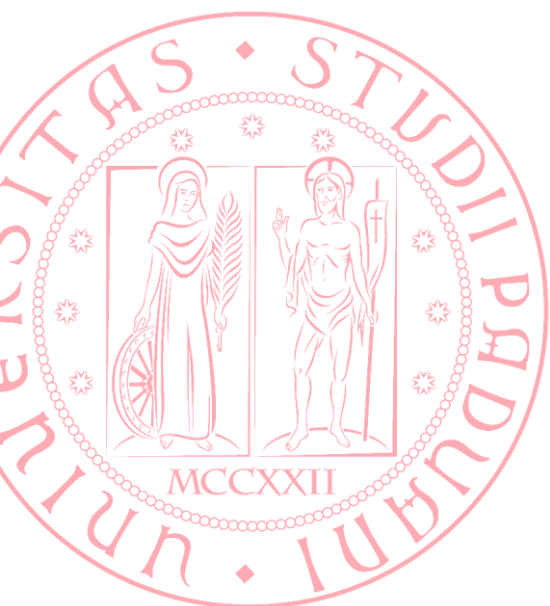


# *Martedì Della Ricerca*

*organizzato da*

## **LEDS - L'Energia Degli Studenti**

Integrazione dell'energia solare in un ciclo combinato:  
migliori tecnologie e ottimo posizionamento



### **Sergio Rech, Ph.D.**

*Assegnista di ricerca - Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Centro studi di economia e tecnica dell'energia Giorgio Levi Cases  
Università degli Studi di Padova*





# MARTES GROUP: Modeling Analysis and Research in Turbomachinery and Energy Systems

## Chi siamo

**Andrea Lazzaretto**, Professore Associato – *Responsabile Scientifico*

**Massimo Masi**, Ricercatore confermato (DTG)

**Paolo Gobbato**, Assegnista di Ricerca

**Giovanni Manente**, Assegnista di Ricerca

**Sergio Rech**, Assegnista di Ricerca

**Stefano Castegnaro**, Dottorando

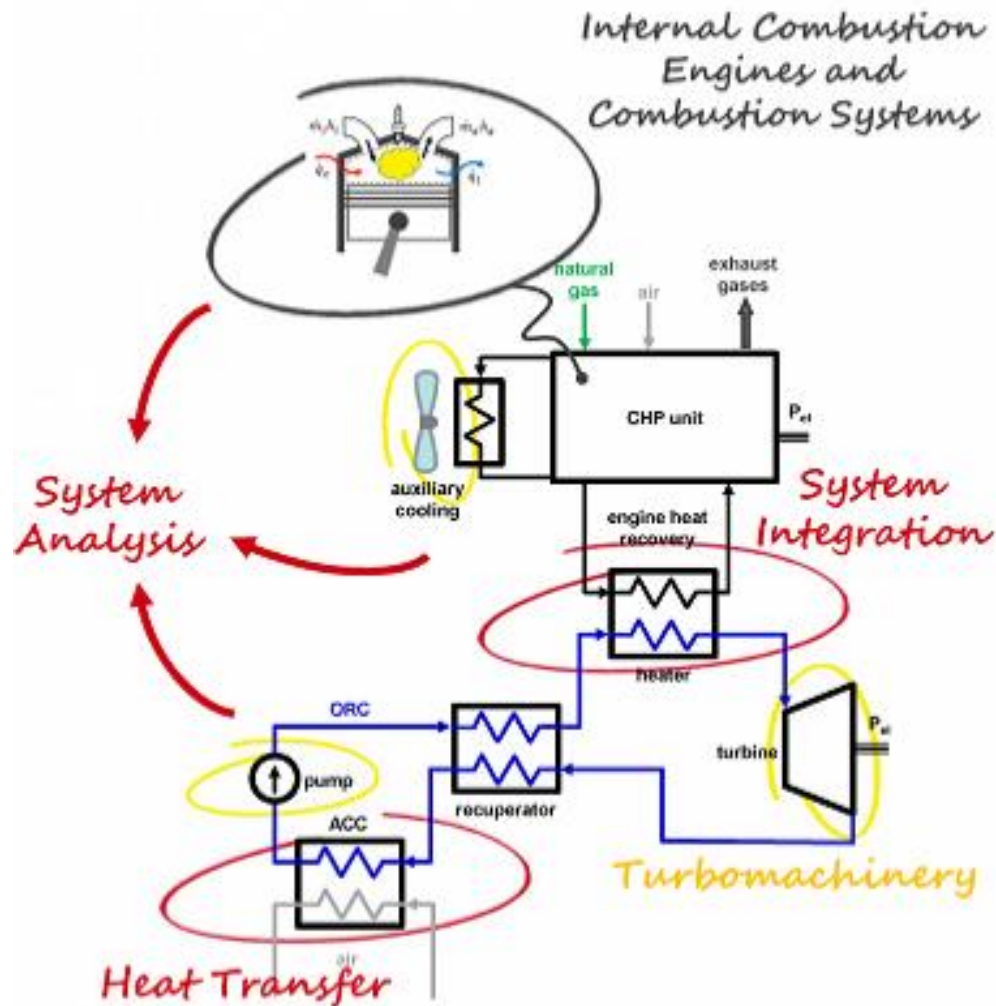
**Luca Da Lio**, Dottorando

**Stefano Fontana**, Dottorando

**Andrea Toffolo**, Full Professor (Luleå University (Svezia)) – collaboratore esterno

**Matteo Morandin**, Assistant Professor (Chalmers University (Svezia)) – collaboratore esterno

### Le «due anime» della nostra ricerca



#### Energy system analysis

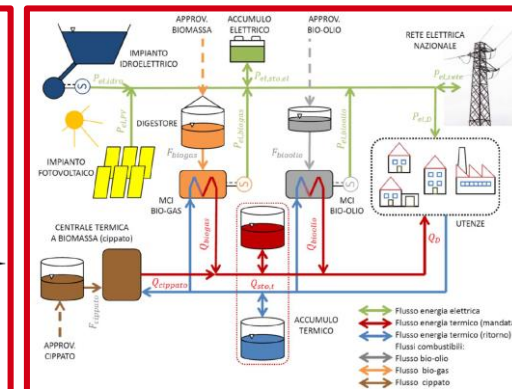
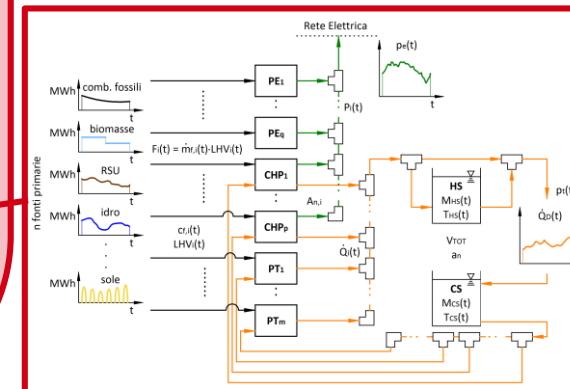
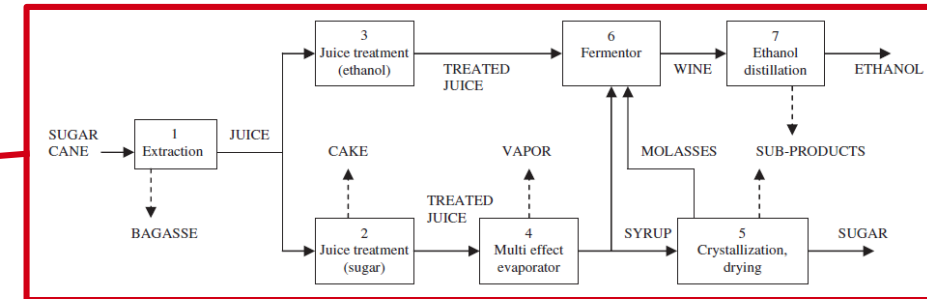
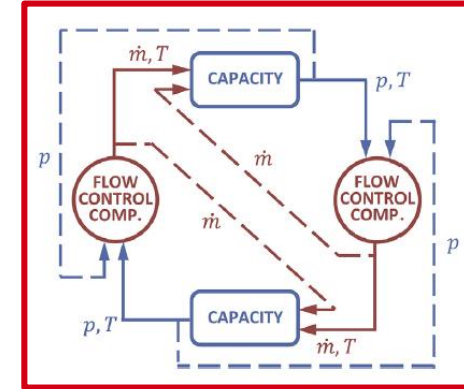
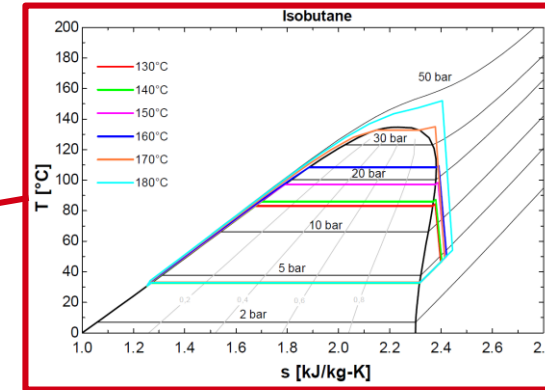
- Modellazione steady-state e dinamica
- Ottimizzazione di progetto e di funzionamento
- Process integration
- Diagnostica dei malfunzionamenti

#### Turbomacchine, combustori e motori a combustione interna

- Progettazione
- Sperimentazione
- Modellazione quasi-dimensionale e CFD

### Alcune applicazioni

- **ORC (*Organic Rankine Cycle*)**: metodi generali per la scelta della configurazione ciclo termodinamico e del fluido, ottimizzazione dei parametri di progetto e funzionamento (applicazioni geotermiche e recupero termico nel settore industriale e navale), costi, modellazione dinamica
- **Integrazione di energia solare a concentrazione** con impianti tradizionali a fonte fossile e ORC
- **Impianti di conversione di Biomassa**: produzione di zucchero e bio-etanolo, generazione elettrica con cicli Brayton supercritici a  $\text{CO}_2$ , sistemi continui di produzione elettrica da bio-alghe
- **Smart power systems**: ottimizzazione del progetto e della gestione di «macro-sistemi» CHP (*Combined Heat and Power*) con sistemi di accumulo termico ed elettrico
- **Accumuli di energia**: analisi teorica di Thermo-Electric Energy Storage, confronto tra varie tecnologie di accumulo



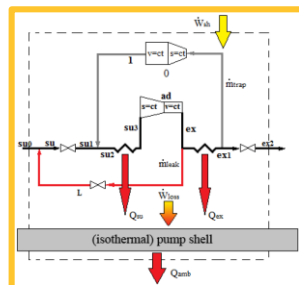
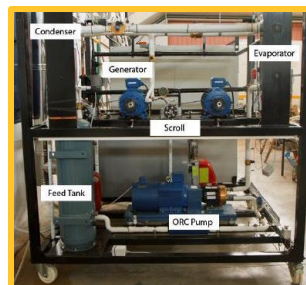
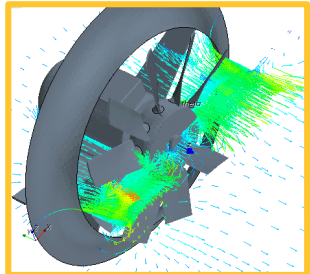
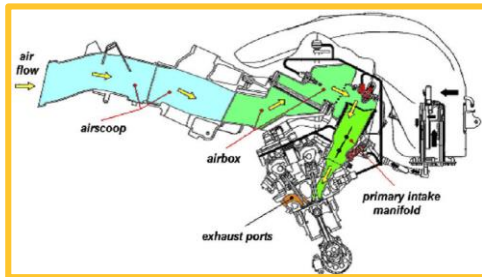
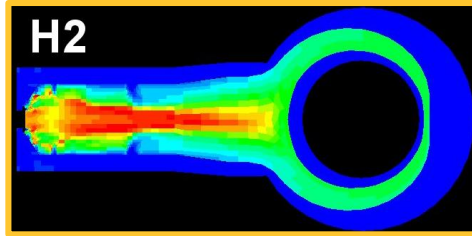
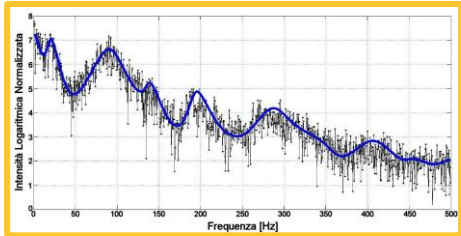




# MARTES GROUP:

## Modeling Analysis and Research in Turbomachinery and Energy Systems

### Alcune applicazioni



- **Combustori di turbine a gas e caldaie:** analisi CFD del campo reattivo e delle instabilità termoacustiche con validazione sperimentale
- **Motori a combustione interna:** sperimentazione per il miglioramento del funzionamento e del progetto di motori ad accensione comandata alimentati a benzina o con combustibili alternativi
- **Ventilatori assiali e a flusso trasversale:** sperimentazione e modelli CFD per il miglioramento del progetto
- **Macchine volumetriche:** test e modellazione semi-empirici di una pompa multi-diaframma installata in una piccola unità ORC sperimentale per applicazioni navali

## Proposte di tesi

Scelta della configurazione, e ottimizzazione dei parametri di progetto e di fuori progetto (funzionamento) di qualsiasi sistema di conversione che trasforma una o più fonti di energia (rinnovabile e non rinnovabile) in una o più forme di energia differenti richieste dalla utenze



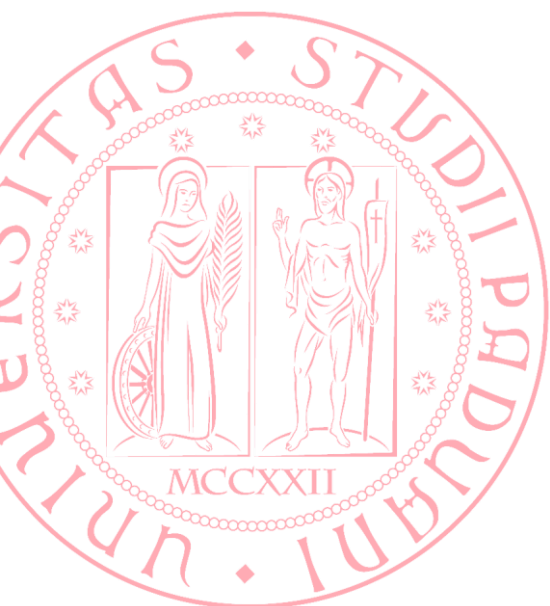


# *Martedì Della Ricerca*

*organizzato da*

## **LEDS - L'Energia Degli Studenti**

Integrazione dell'energia solare in un ciclo combinato:  
migliori tecnologie e ottimo posizionamento

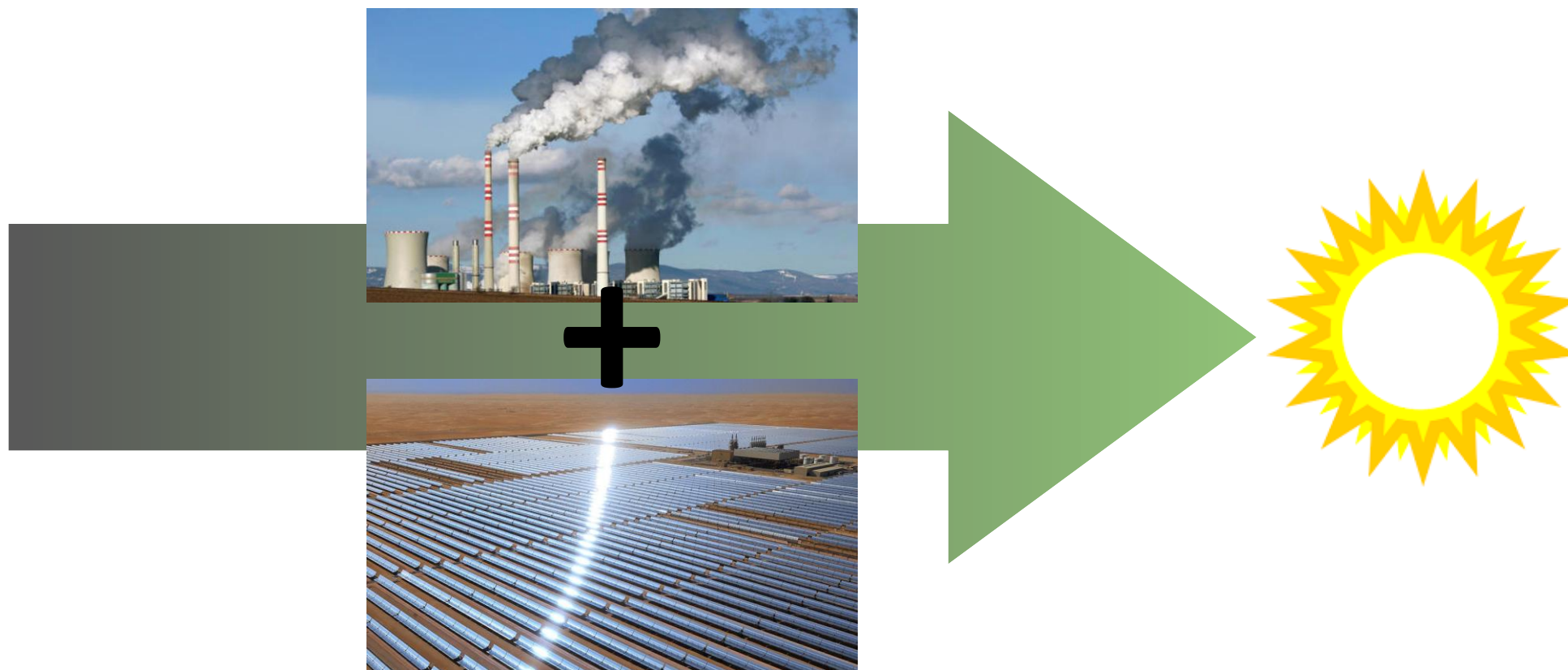


### **Sergio Rech, Ph.D.**

*Assegnista di ricerca - Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Centro studi di economia e tecnica dell'energia Giorgio Levi Cases  
Università degli Studi di Padova*



**Come ottenere un sistema di generazione «tutto verde»?  
Attraverso una transizione graduale fossile-rinnovabile**





### Perché una transizione graduale?

- Per dare più tempo alle tecnologie rinnovabili di svilupparsi e **migliorare le efficienze e ridurre i costi** ancora molto elevati (bassa densità di energia: occorrono  $20 \div 25 \text{ m}^2$  di pannello fotovoltaico per produrre in un ora di sole «a picco» l'energia elettrica generabile da 1 litro di benzina)
- Per **valorizzare gli investimenti** già eseguiti in centrali a fonte fossile ad alto rendimento e basso impatto ambientale



**FOSSILE**

Impianti tradizionali  
a fonte fossile



**GAS**

Impianti a  
ciclo combinato



**SOLARE**

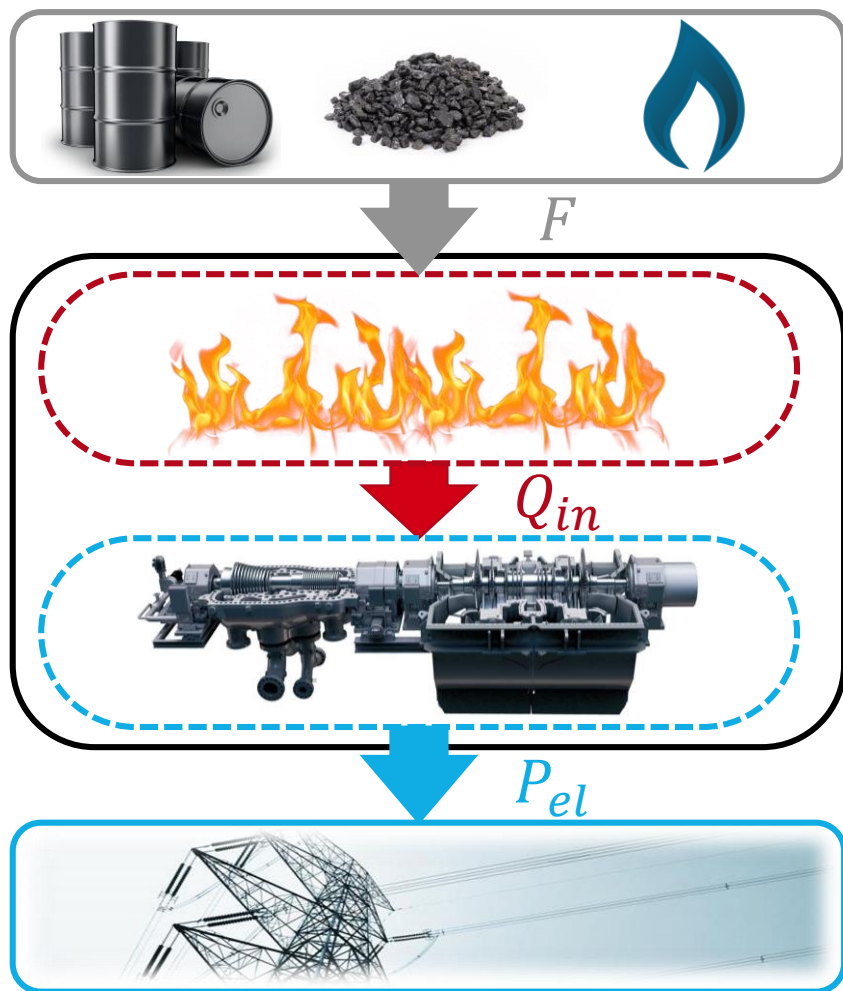
Impianti solari  
termodinamici



Integrated Solar Combined Cycle (ISCC)  
(Ain Beni Mathar – Marocco)

- Quale tecnologia solare?
- Dove integrare?

### Impianti tradizionali a fonte fossile

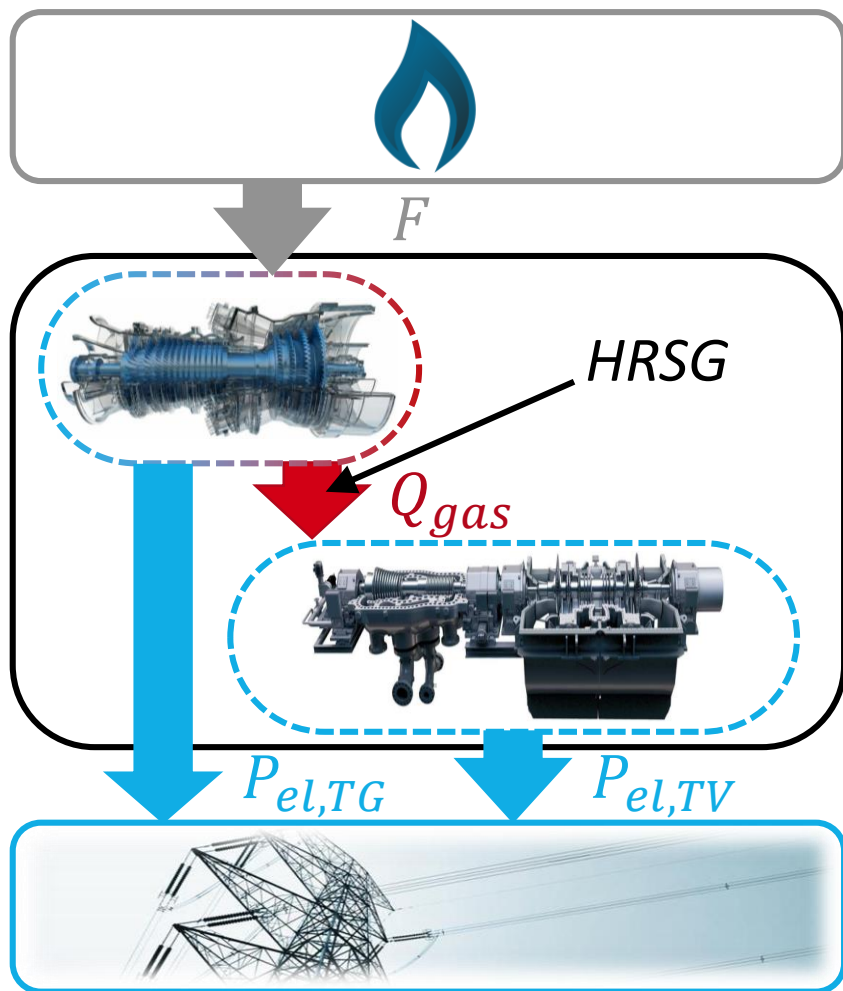


- Convertono l'energia chimica contenuta nei combustibili fossili ( $F$ ) in energia elettrica ( $P_{el}$ ) in due fasi:
  - conversione dell'energia chimica ( $F$ ) in energia termica ( $Q_{in}$ ) tramite combustione
  - conversione dell'energia termica ( $Q_{in}$ ) in energia elettrica ( $P_{el}$ ) mediante macchine che fanno compiere ad un fluido (es. acqua, aria) un ciclo termodinamico
- L'energia chimica ( $F$ ) non può essere totalmente convertita in energia elettrica ( $P_{el}$ ):

$$\eta_{th} = \frac{P_{el}}{F} \text{ (37\% TG, 42\% TV, 58\% CC)}$$

$$\eta_{comb} = \frac{Q_{in}}{F} \text{ (98 - 99 \%)}$$

### Impianti a ciclo combinato a gas



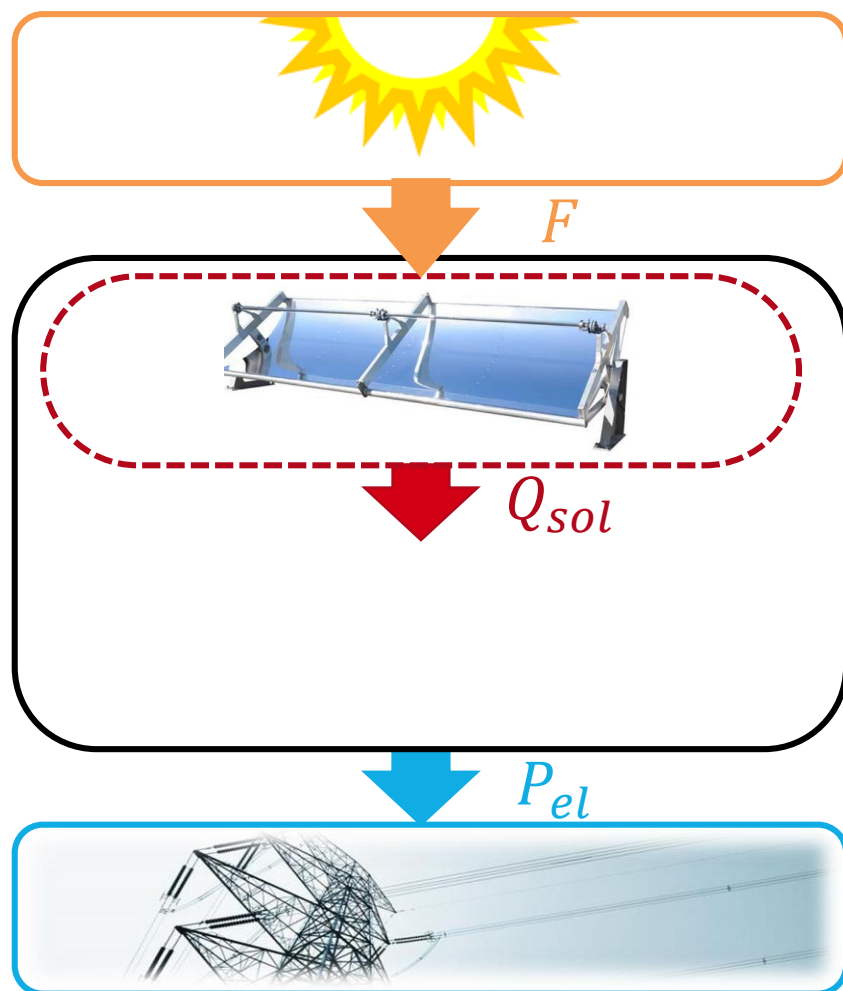
- Sono la combinazioni di due cicli termodinamici «in cascata»:
  1. un ciclo a monte (ciclo Brayton-Joule – TG) che converte l'energia chimica ( $F$ ) in energia elettrica ( $P_{el,TG}$ ) e energia termica «residua» ( $Q_{gas}$ )
  2. un ciclo a valle (ciclo Rankine – TV) che converte l'energia termica «residua» ( $Q_{gas}$ ) in ulteriore energia elettrica ( $P_{el,TV}$ ) (senza ulteriore consumo di combustibile)

$$\eta_{th} = \frac{P_{el}}{F} = \frac{P_{el,TG} + P_{el,TV}}{F} \approx 60\%$$

- I due cicli termodinamici sono «collegati» da un opportuno componente detto generatore di valore a recupero (HRSG – *Heat recovery Steam Generator*)



### Impianti solari termodinamici



- Convertono l'energia della radiazione solare al suolo ( $F$ ) in energia elettrica ( $P_{el}$ ) in due fasi:
  1. conversione della radiazione solare al suolo ( $F$ ) in energia termica ( $Q_{sol}$ ) tramite concentrazione (un fluido viene riscaldato fino ad una temperatura che dipende dalla tecnologia del concentratore solare)

#### Parabolic trough

+ olio diatermico:  $T = 350 - 400^{\circ}\text{C}$

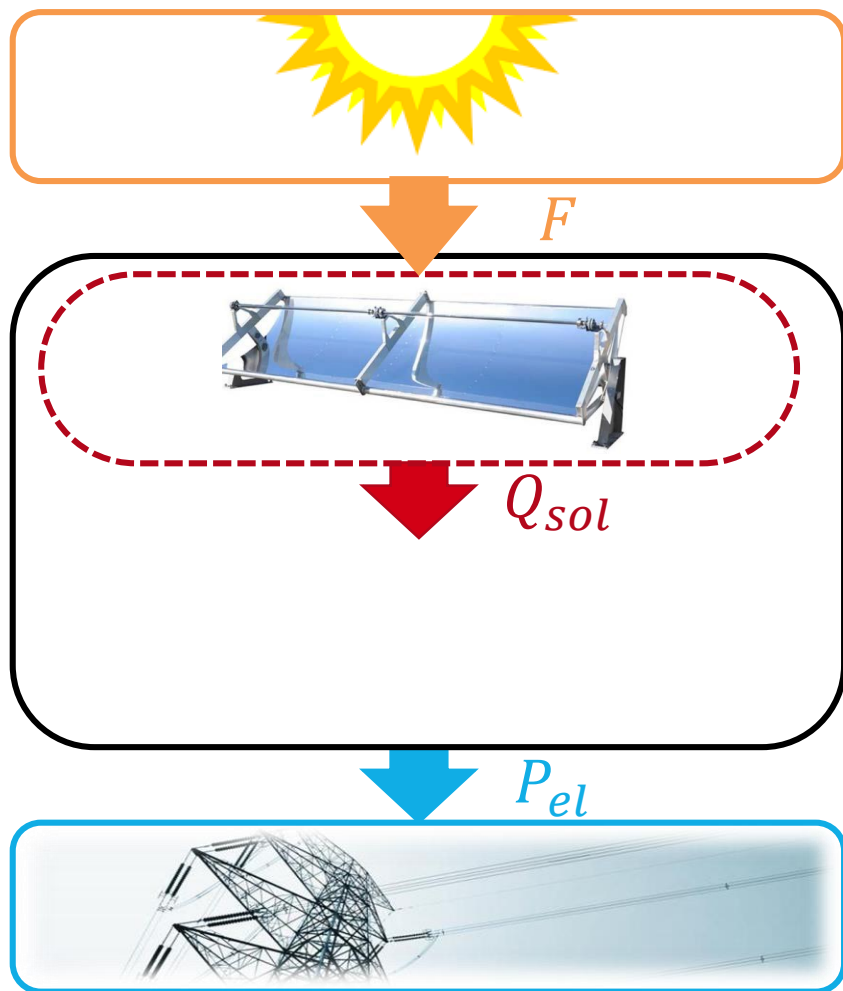
+ sali fusi:  $T = 500 - 600^{\circ}\text{C}$

$$\eta_{sf} = \frac{Q_{sol}}{F} = \frac{Q_{sol}}{A \cdot DNI} \approx 60 - 65\%$$



Integrazione dell'energia solare in un ciclo combinato: migliori tecnologie e ottimo posizionamento

### Impianti solari termodinamici

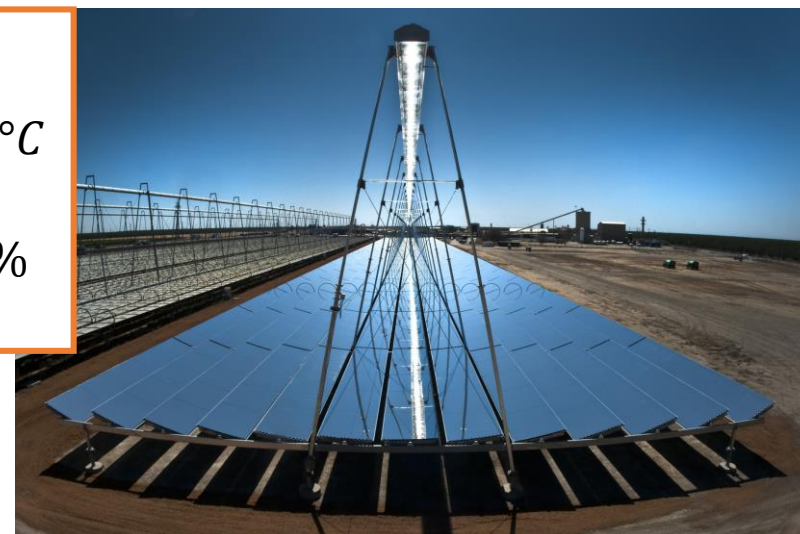


- Convertono l'energia della radiazione solare al suolo ( $F$ ) in energia elettrica ( $P_{el}$ ) in due fasi:
  - conversione della radiazione solare al suolo ( $F$ ) in energia termica ( $Q_{sol}$ ) tramite concentrazione (un fluido viene riscaldato fino ad una temperatura che dipende dalla tecnologia del concentratore solare)

#### Linear Fresnel

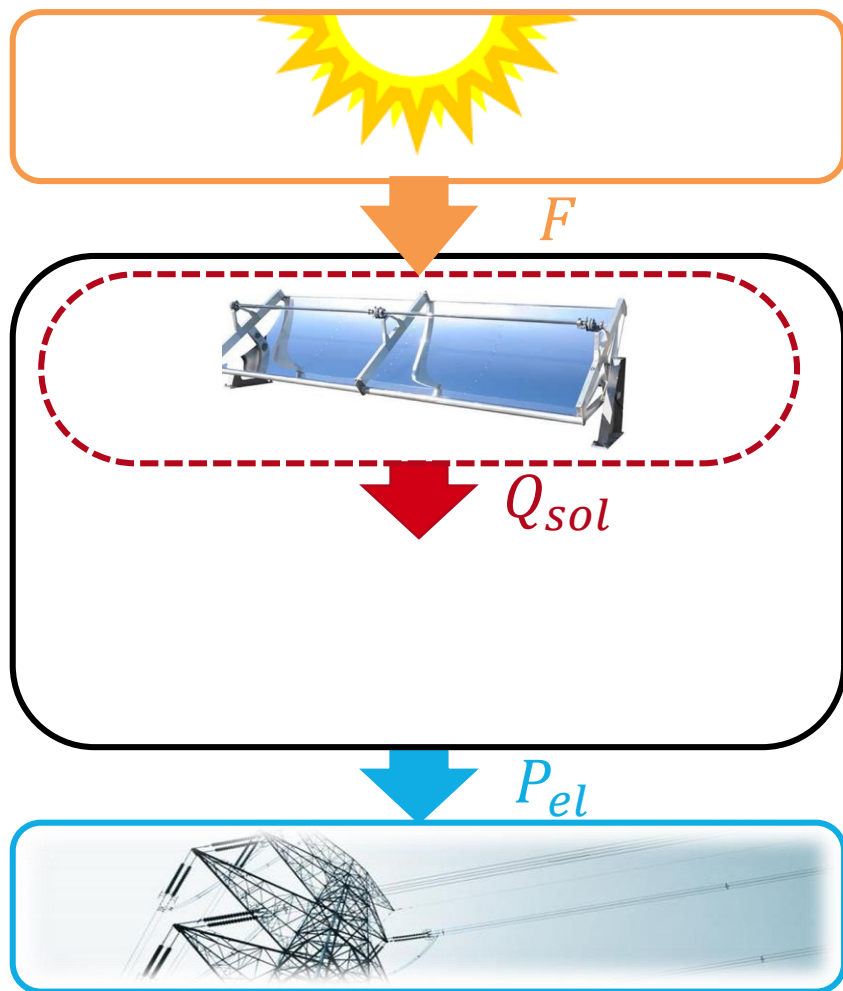
+ acqua/vapore:  $T = 480 - 520^{\circ}\text{C}$

$$\eta_{sf} = \frac{Q_{sol}}{F} = \frac{Q_{sol}}{A \cdot DNI} \approx 55 - 60\%$$



Integrazione dell'energia solare in un ciclo combinato: migliori tecnologie e ottimo posizionamento

### Impianti solari termodinamici



- Convertono l'energia della radiazione solare al suolo ( $F$ ) in energia elettrica ( $P_{el}$ ) in due fasi:
  - conversione della radiazione solare al suolo ( $F$ ) in energia termica ( $Q_{sol}$ ) tramite concentrazione (un fluido viene riscaldato fino ad una temperatura che dipende dalla tecnologia del concentratore solare)

#### Torri solari

+ sali fusi:  $T = 500 - 600^{\circ}\text{C}$

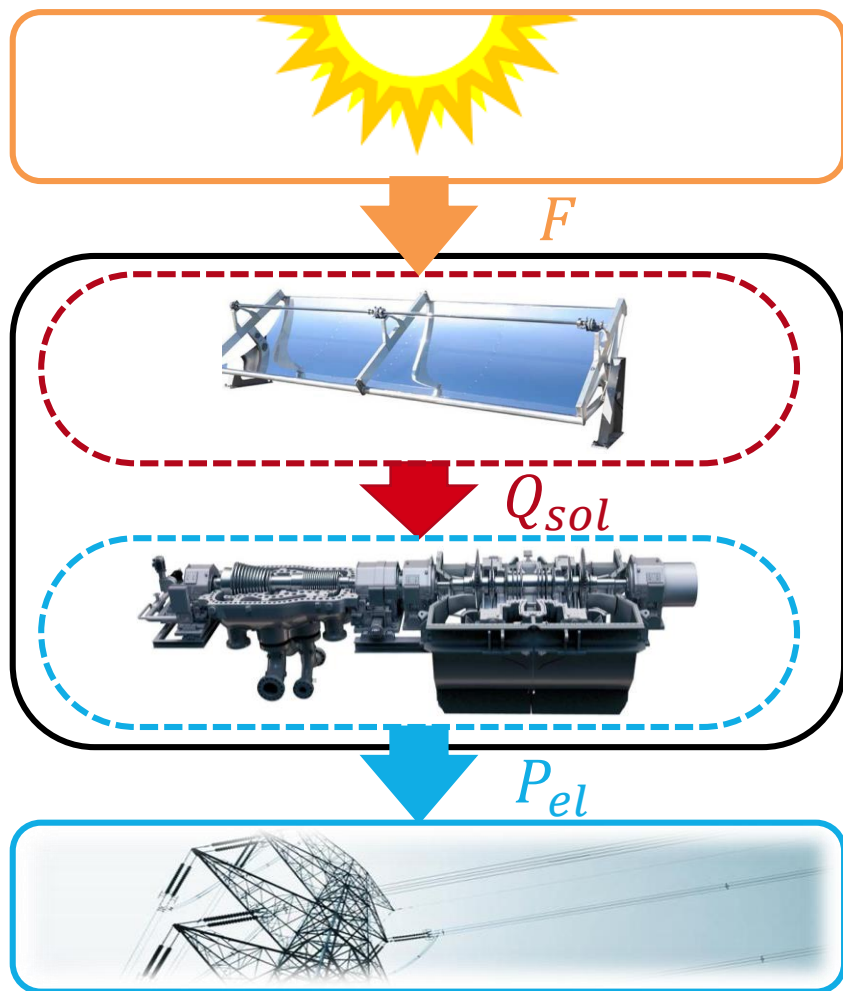
+ aria:  $T = 950 - 1000^{\circ}\text{C}$

$$\eta_{sf} = \frac{Q_{sol}}{F} = \frac{Q_{sol}}{A \cdot DNI} \approx 55 - 60\%$$





### Impianti solari termodinamici



- Convertono l'energia della radiazione solare al suolo ( $F$ ) in energia elettrica ( $P_{el}$ ) in due fasi:
  - conversione della radiazione solare al suolo ( $F$ ) in energia termica ( $Q_{sol}$ ) tramite concentrazione
  - conversione dell'energia termica ( $Q_{sol}$ ) in energia elettrica ( $P_{el}$ ) mediante macchine che fanno compiere ad un fluido (es. acqua, aria) un ciclo termodinamico
- L'energia della radiazione solare ( $F$ ) non può essere totalmente convertita in energia elettrica ( $P_{el}$ ):

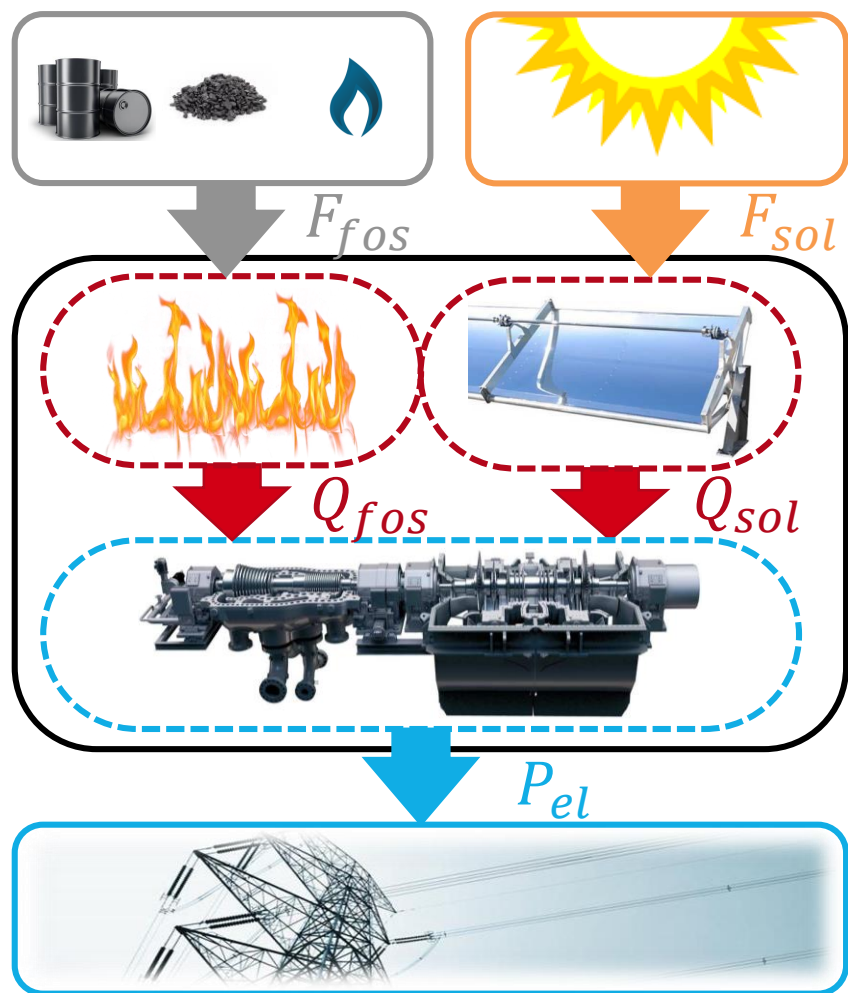
$$\eta_{th,DNI} = \frac{P_{el}}{F} = \frac{P_{el}}{A \cdot DNI} (20-25\%) < \eta_{th} \text{ impianti tradizionali}$$

- necessità di concentrare la radiazione solare
- inferiori temperature raggiunte dai fluidi operativi

Integrazione dell'energia solare in un ciclo combinato: migliori tecnologie e ottimo posizionamento



### Integrazione del solare a concentrazione in impianti tradizionali



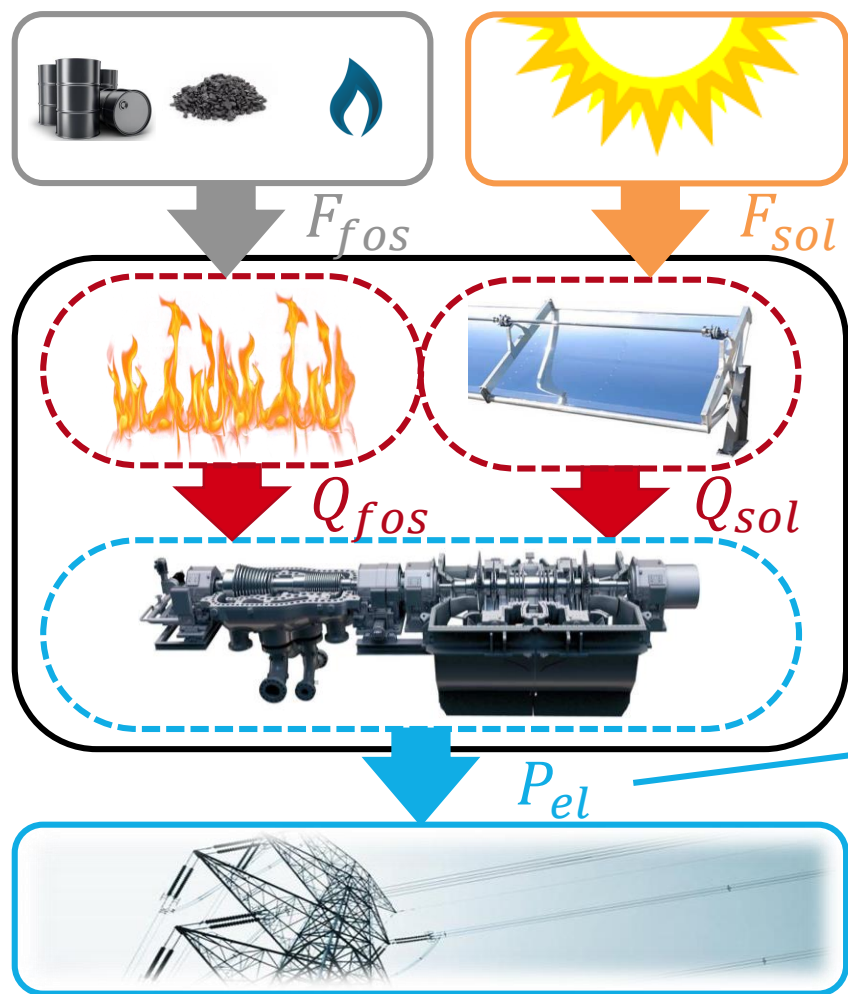
L'idea generale è di «accoppiare» dei concentratori solari agli impianti a fonte fossile al fine di:

- Ridurre  $F_{fos}$  a parità di  $P_{el}$  ( $F_{sol}$  «sostituisce» parte di  $F_{fos}$ ) – *Fuel Saving*
- Aumentare  $P_{el}$  a parità di  $F_{fos}$  – *Power Busting*

$$\eta_{th,DNI} = \frac{P_{el}}{F_{fos} + F_{sol}} = \frac{P_{el}}{F_{fos} + A \cdot DNI}$$

$$\eta_{th,Q_{sol}} = \frac{P_{el}}{F_{fos} + Q_{sol}} = \frac{P_{el}}{F_{fos} + F_{sol} \cdot \eta_{sf}}$$

### Integrazione del solare a concentrazione in impianti tradizionali



L'idea generale è di «accoppiare» dei concentratori solari agli impianti a fonte fossile al fine di:

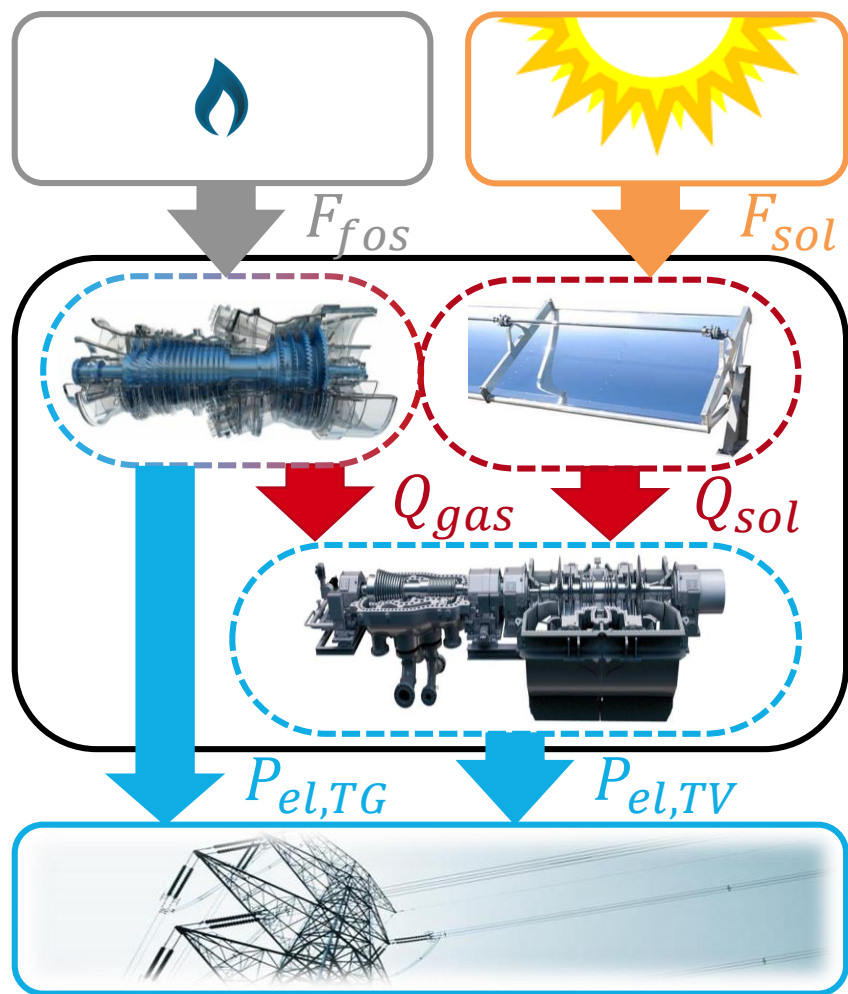
- Ridurre  $F_{fos}$  a parità di  $P_{el}$  ( $F_{sol}$  «sostituisce» parte di  $F_{fos}$ ) – *Fuel Saving*
- Aumentare  $P_{el}$  a parità di  $F_{fos}$  – *Power Busting*

$P_{el,fos}$

$P_{el,sol}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{sol,DNI} = \frac{P_{el}}{F_{sol}} = \frac{P_{el}}{A \cdot DNI} \\ \eta_{sol,Q} = \frac{P_{el}}{Q_{sol}} = \frac{P_{el}}{F_{sol} \cdot \eta_{sf}} \end{array} \right. \Rightarrow \eta_{sol,DNI} = \eta_{sol,Q} \cdot \eta_{sf}$$

### Integrazione del solare a concentrazione in impianti a ciclo combinato



Questa idea è stata applicata ad un impianto a ciclo combinato (NGCC – *Natural Gas Combined Cycle*) di grandi dimensioni ( $P_{el,NGCC} = P_{el,TG} + P_{el,TV} = 389.8 \text{ MWe}$  e  $\eta_{th} = 57.5\%$ ) a tre livelli di pressione considerando uno scenario di Power Busting

$$(P_{el,NGCC} - P_{el,ISCC} = P_{el,sol} = +50 \text{ MWe})$$

L'obiettivo è individuare:

- La tecnologia di solare a concentrazione (coppia tipo collettori – fluido)
- Il «punto di integrazione» (posizione nell'HRSG nel quale viene aggiunto il calore da solare)

che massimizza i rendimenti di conversione solar-to-electricity

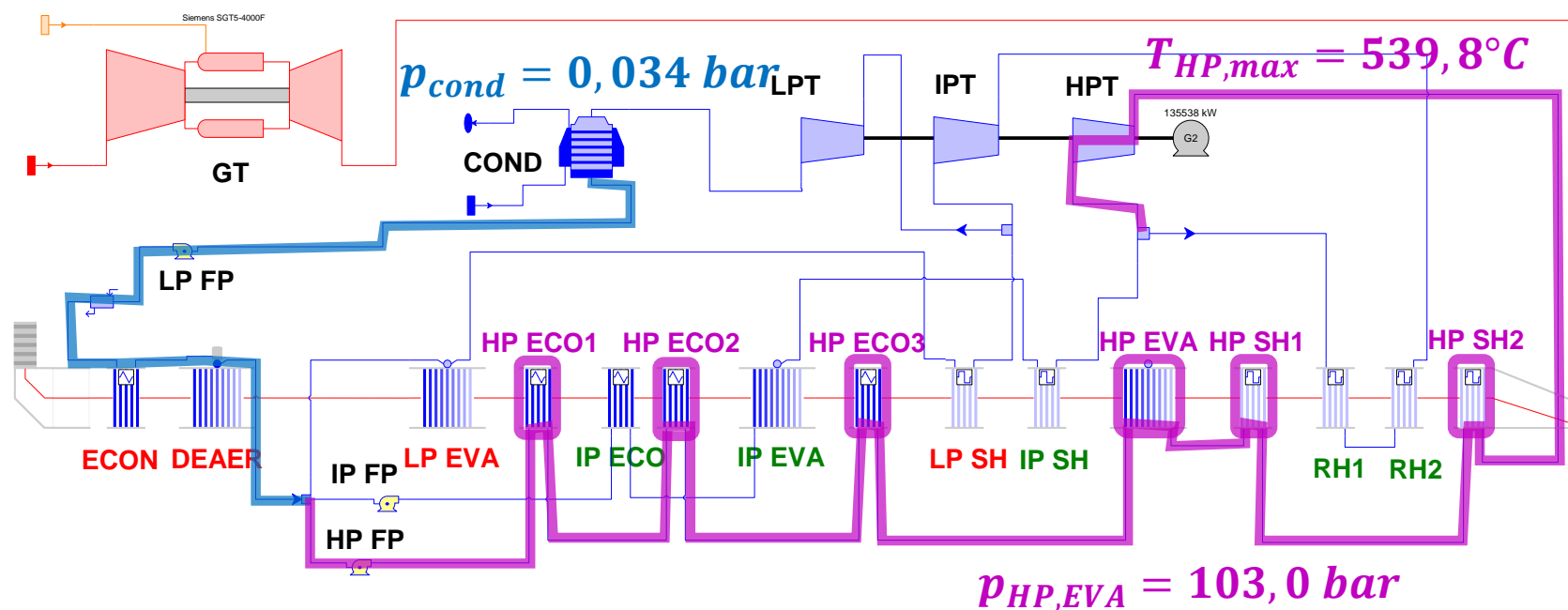
The diagram illustrates a gas turbine power plant configuration. At the top, a gas turbine (GT) is shown with a Siemens SGT5-4000F engine. The inlet gas temperature is  $T_{gas,in} = 600,4^{\circ}\text{C}$  and the outlet gas temperature is  $T_{gas,out} = 94,5^{\circ}\text{C}$ . The GT is connected to a condenser (COND) and a low-pressure feed pump (LP FP). The condenser is cooled by a cooling water loop. The gas turbine exhausts into a complex heat recovery system consisting of multiple heat exchangers and economizers. The system includes a high-pressure feed pump (HP FP) and a high-pressure turbine (HPT) connected to a generator (G2) producing 135538 kW. The heat recovery system also includes a low-pressure turbine (LPT) and an intermediate-pressure turbine (IPT). The system is further equipped with various safety and control components like valves and pumps.

ST	3 pressure HRSG
$p_{HP\ EVA}$ (bar)	103,0
$p_{IP\ EVA}$ (bar)	16,5
$p_{LP\ EVA}$ (bar)	4,5
$P_{ST}$ (MW <sub>e</sub> )	135,54
$\eta_{ST}$ (%)	37,40%

## Integrazione dell'energia solare in un ciclo combinato: migliori tecnologie e ottimo posizionamento



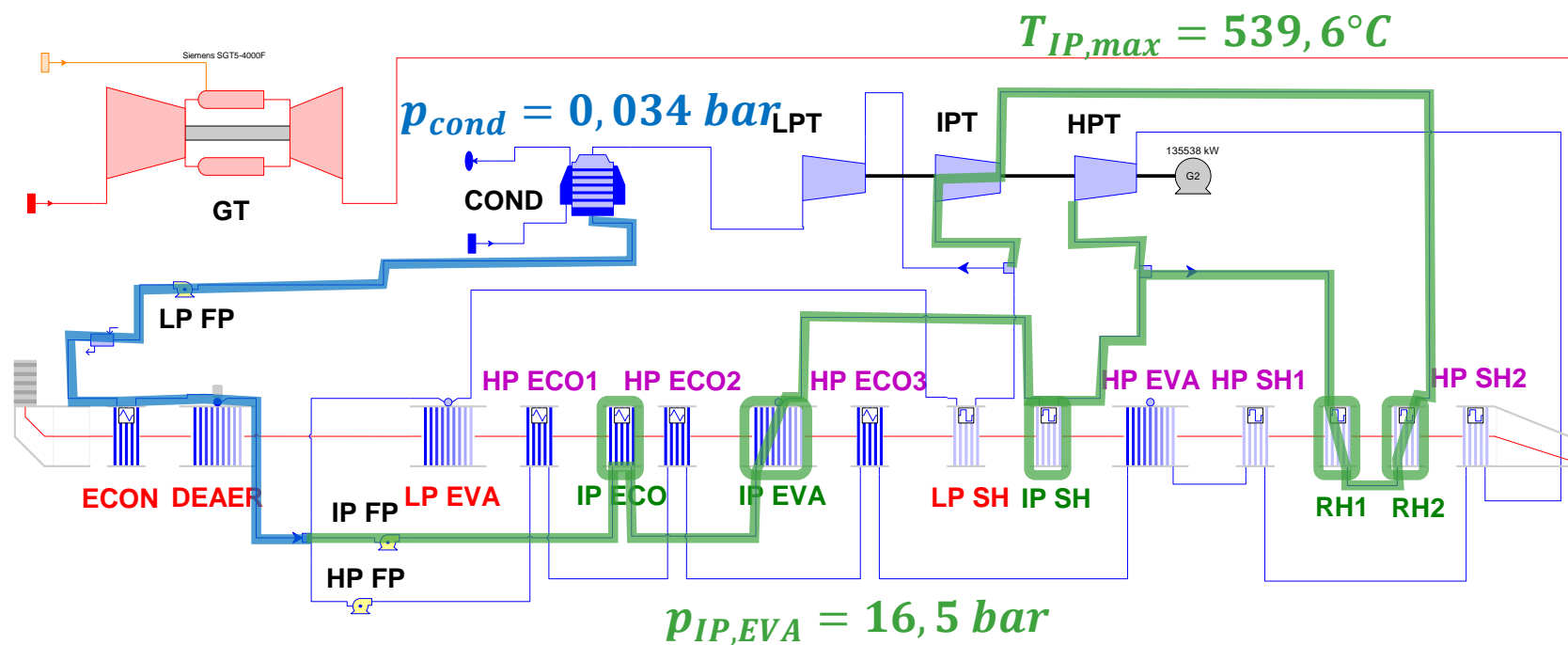
### Impianto a ciclo combinato di riferimento (NGCC) (centrale Archimede – Priolo Gargallo)



TG	Siemens SGT5-4000F
$r_p$	17,0
$TIT$ (°C)	1316,3
$m_{gas}$ (kg/s)	643,1
$P_{TG}$ (MW <sub>e</sub> )	254,25
$\eta_{TG}$ (%)	37,51%

ST	3 pressure HRSG
$p_{HP\ EVA}$ (bar)	103,0
$p_{IP\ EVA}$ (bar)	16,5
$p_{LP\ EVA}$ (bar)	4,5
$P_{ST}$ (MW <sub>e</sub> )	135,54
$\eta_{ST}$ (%)	37,40%

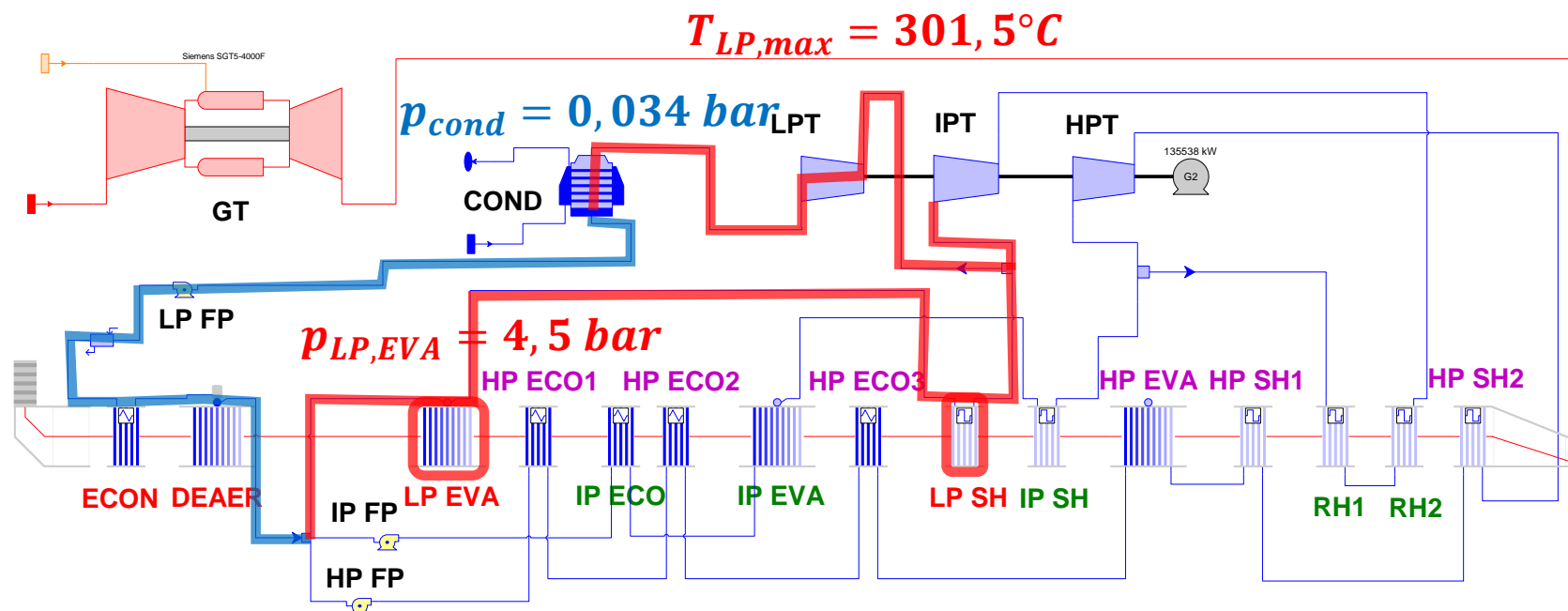
### Impianto a ciclo combinato di riferimento (NGCC) (centrale Archimede – Priolo Gargallo)



TG	Siemens SGT5-4000F
$r_p$	17,0
$TIT (^{\circ}\text{C})$	1316,3
$m_{gas} \text{ (kg/s)}$	643,1
$P_{TG} \text{ (MW}_e\text{)}$	254,25
$\eta_{TG} \text{ (%)}$	37,51%

ST	3 pressure HRSG
$p_{HP\ EVA} \text{ (bar)}$	103,0
$p_{IP\ EVA} \text{ (bar)}$	16,5
$p_{LP\ EVA} \text{ (bar)}$	4,5
$P_{ST} \text{ (MW}_e\text{)}$	135,54
$\eta_{ST} \text{ (%)}$	37,40%

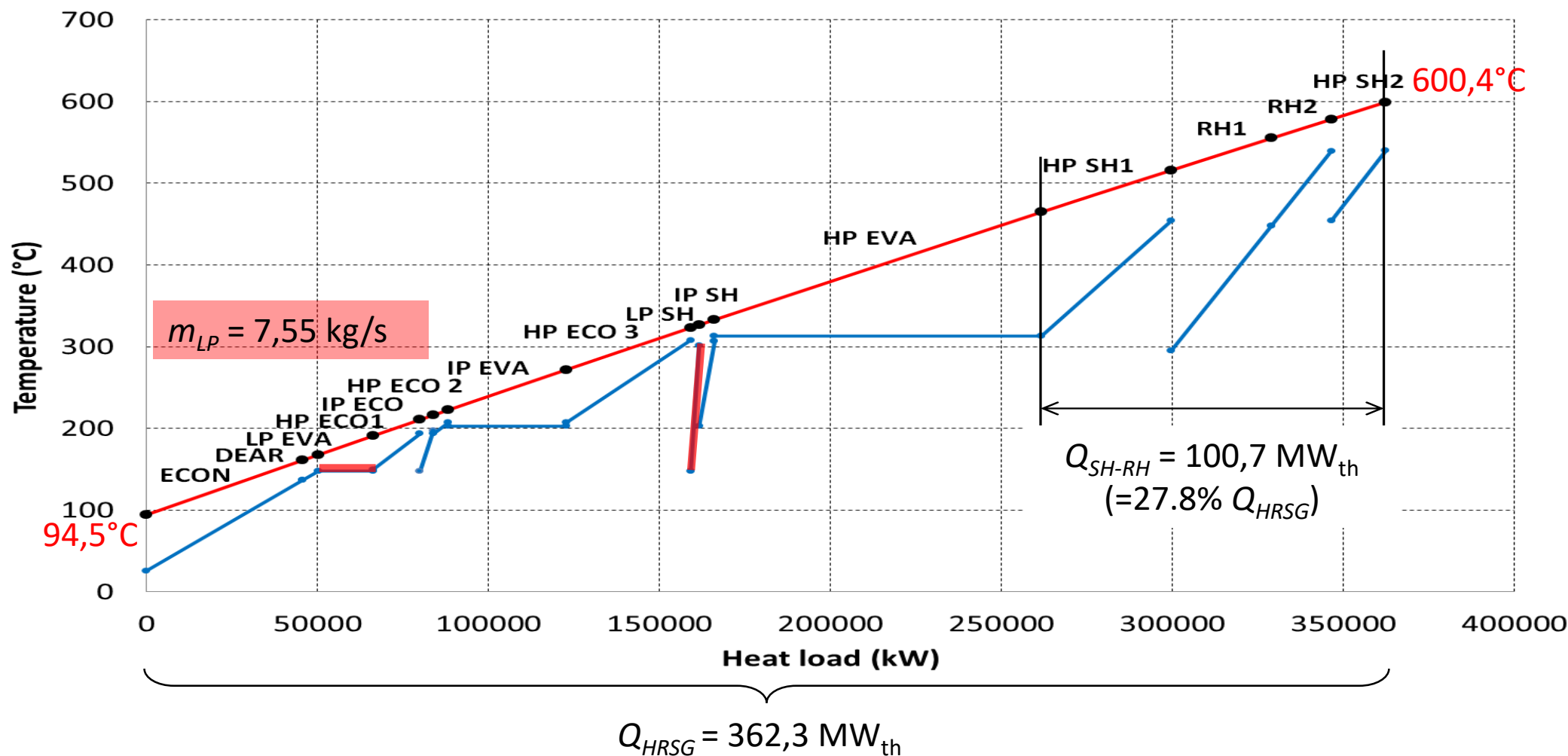
### Impianto a ciclo combinato di riferimento (NGCC) (centrale Archimede – Priolo Gargallo)



TG	Siemens SGT5-4000F
$r_p$	17,0
$TIT (^{\circ}C)$	1316,3
$m_{gas} \text{ (kg/s)}$	643,1
$P_{TG} \text{ (MW}_e\text{)}$	254,25
$\eta_{TG} \text{ (%)}$	37,51%

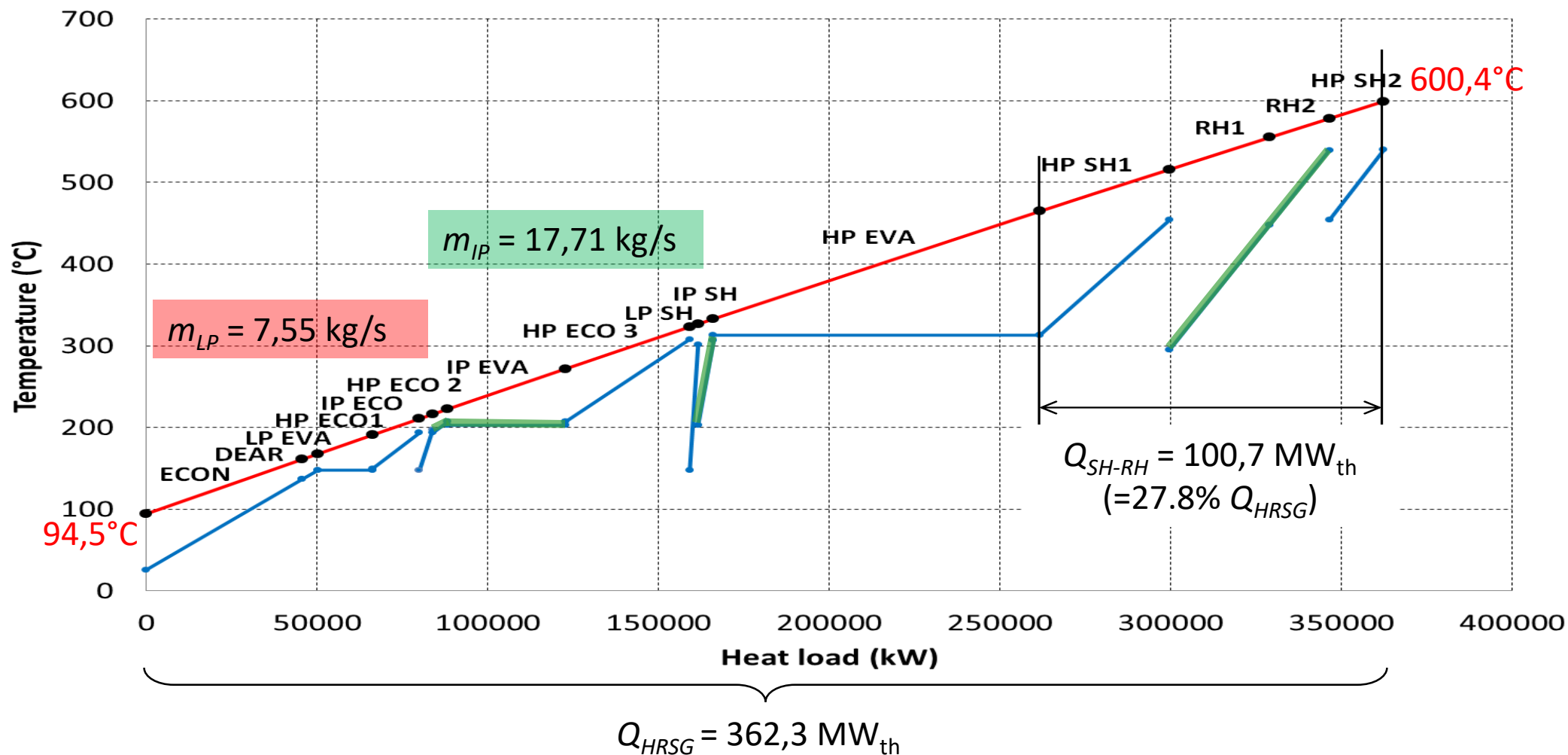
ST	3 pressure HRSG
$p_{HP \text{ EVA}} \text{ (bar)}$	103,0
$p_{IP \text{ EVA}} \text{ (bar)}$	16,5
$p_{LP \text{ EVA}} \text{ (bar)}$	4,5
$P_{ST} \text{ (MW}_e\text{)}$	135,54
$\eta_{ST} \text{ (%)}$	37,40%

### Impianto a ciclo combinato di riferimento (NGCC)



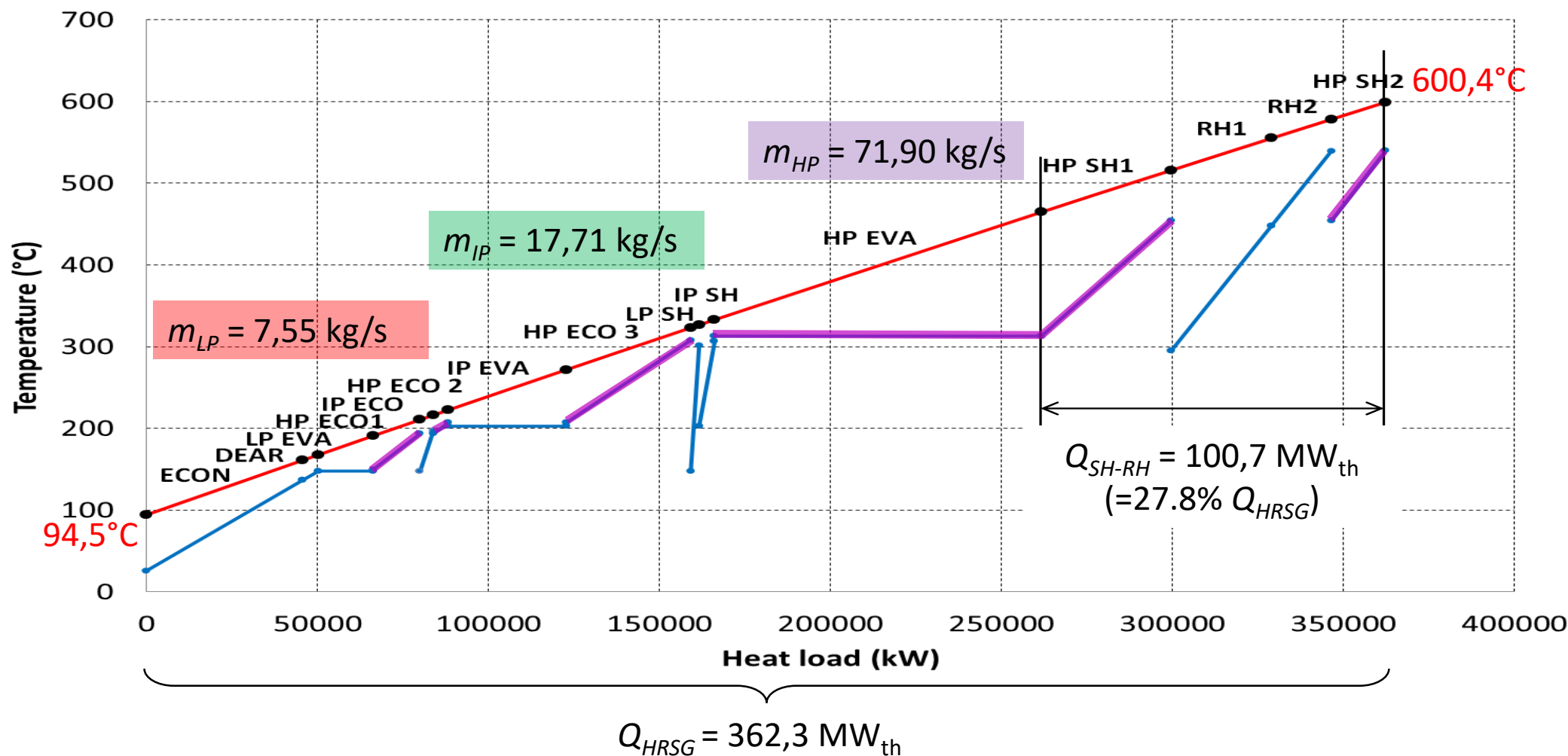


### Impianto a ciclo combinato di riferimento (NGCC)

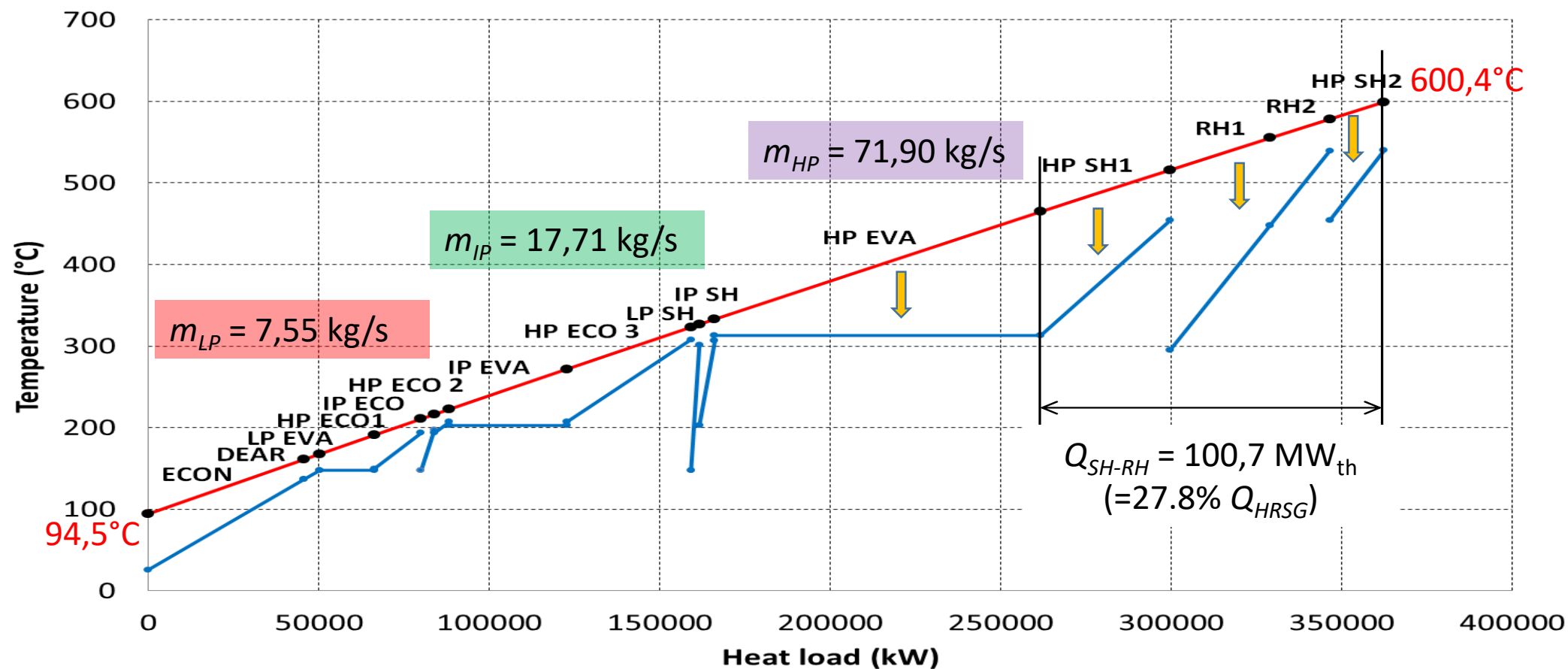


Integrazione dell'energia solare in un ciclo combinato: migliori tecnologie e ottimo posizionamento

### Impianto a ciclo combinato di riferimento (NGCC)



### Impianto a ciclo combinato di riferimento (NGCC)



Disaccoppiamento termico tra i gas caldi e l'acqua/vapore alle temperature medio-alte (HP EVA, SH, RH)

Integrazione dell'energia solare in un ciclo combinato: migliori tecnologie e ottimo posizionamento

## Impianti integrati solare – ciclo combinato (ISCC)

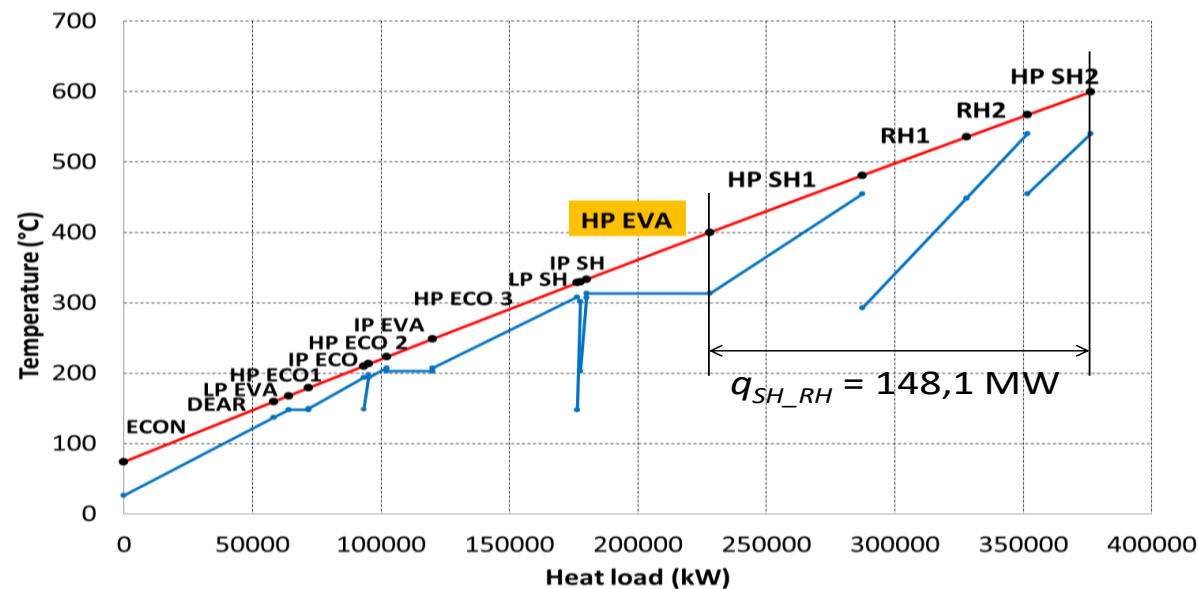
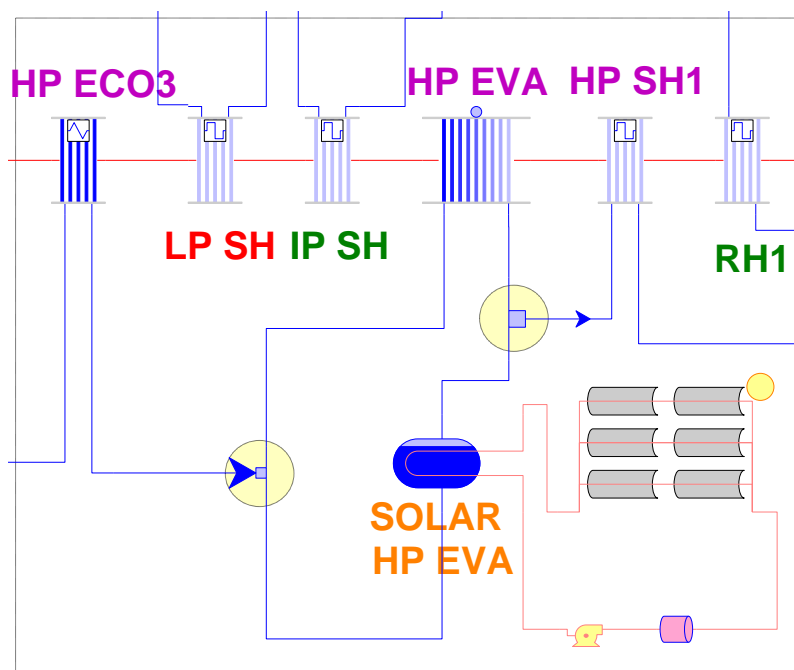
Target: +50 MWe da solare ( $P_{el,NGCC} - P_{el,ISCC} = P_{el,sol} = +50 \text{ MWe}$ )

Layout	Punto di integrazione	HTF	CSP technology
ISCC 1	HP EVA	Therminol-VP1	Parabolic Trough
ISCC 2	HP EVA - SH1	Sali fusi	Parabolic Trough
ISCC 3	HP ECO3 - EVA - SH1	Sali fusi	Parabolic Trough
ISCC 4	HP EVA-SH1-SH2	Sali fusi	Torre solare
ISCC 5	HP ECO3 - EVA	acqua/vapore	Linear Fresnel
ISCC 6	HP ECO3 - EVA - SH1	acqua/vapore	Linear Fresnel

- Si sono considerate le più recenti tecnologie di solare a concentrazione in commercio
- Il punto di integrazione è stato scelto compatibilmente con le temperature raggiungibili da ciascuna tecnologia
- Non sono stati analizzati i punti di integrazione nei circuiti di media e bassa pressione in quanto è già stato dimostrato in letteratura che questi non permettono di ottenere buoni valori di rendimento solar-to-electricity ( $\eta_{sol,DNI}$  e  $\eta_{sol,Q}$ )



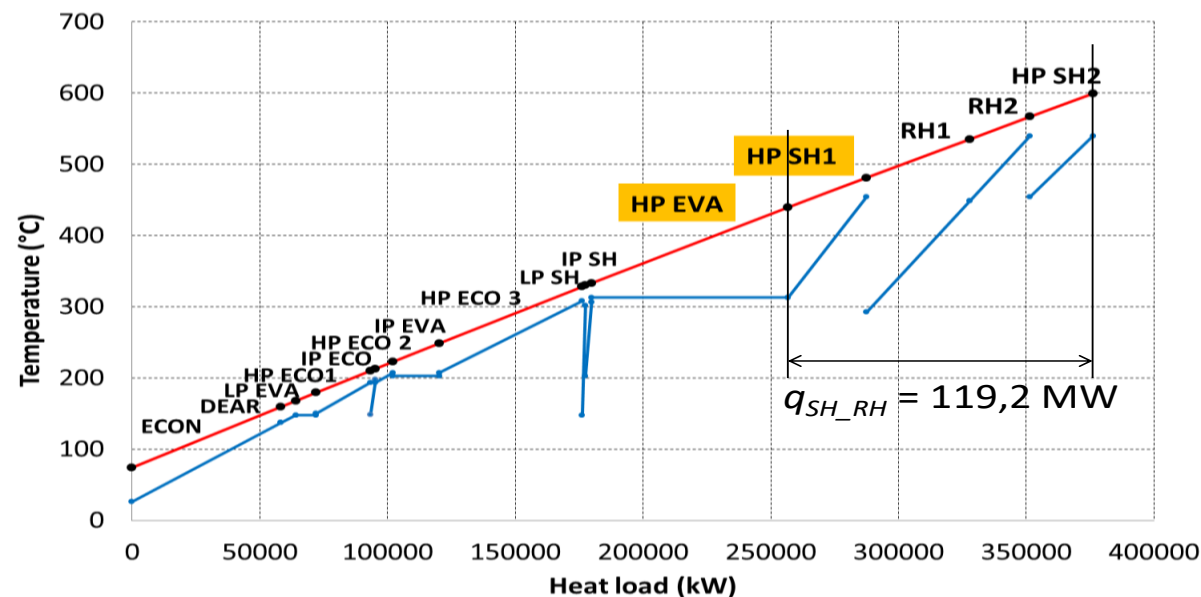
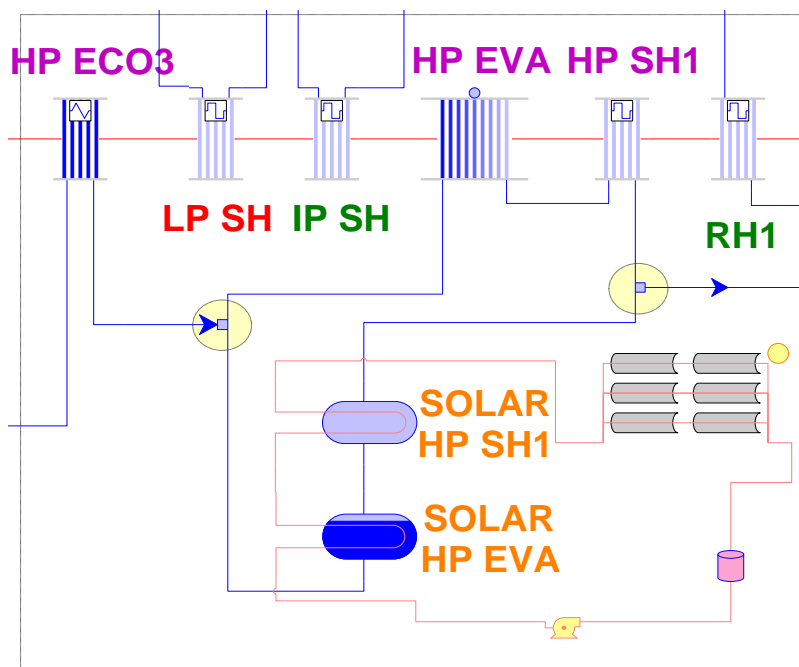
### ISCC1: Parabolic Trough (olio diatermico) + EVA di alta pressione



- Il calore solare «trasportato» dall'olio diatermico viene utilizzato per far evaporare in SOLAR HP EVA parte della portata di alta pressione prelevata a monte di HP EVA
- Il vapore saturo risultante viene miscelato con quello (generato nell'HRSG) all'uscita di HP EVA
- Dopo la miscelazione, la portata totale di alta pressione viene surriscaldata fino a circa 540°C nell'HRSG

Integrazione dell'energia solare in un ciclo combinato: migliori tecnologie e ottimo posizionamento

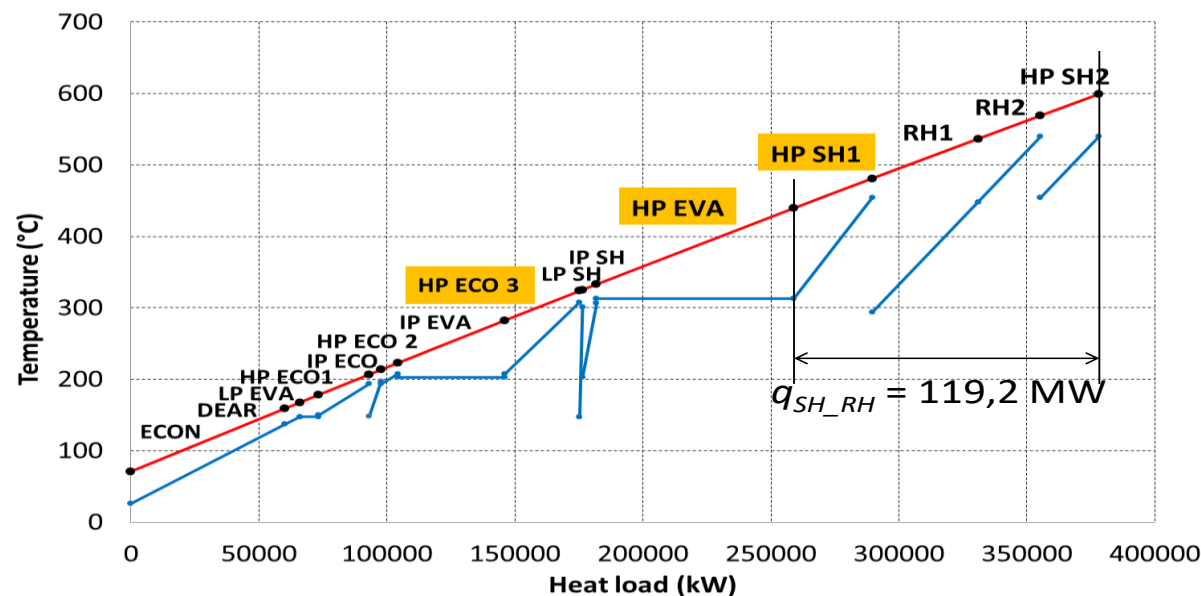
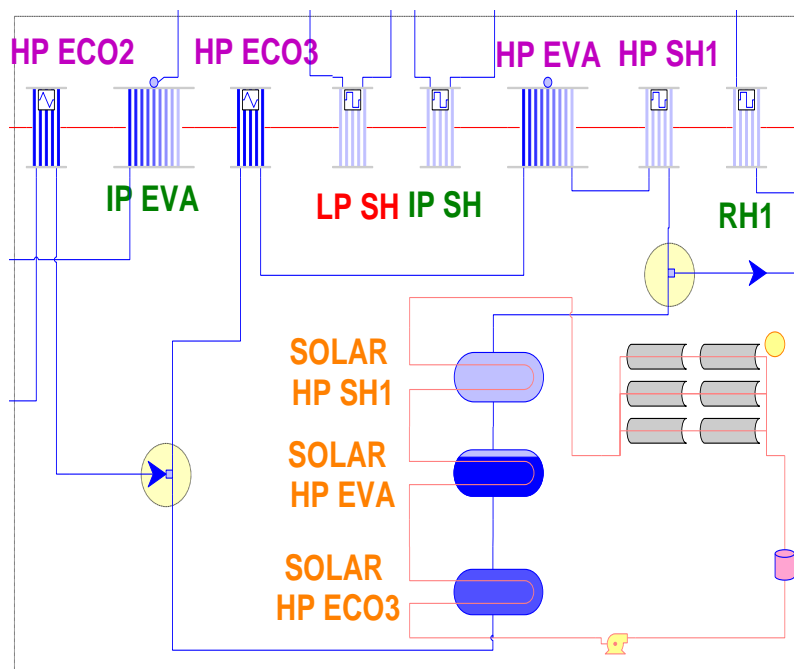
### ISCC2: Parabolic Trough (sali fusi) + EVA e SH1 di alta pressione



- Il calore solare «trasportato» dai sali fusi viene utilizzato per far evaporare in SOLAR HP EVA e surriscaldare in SOLAR HP1 parte della portata di alta pressione prelevata a monte di HP EVA
- Il vapore surriscaldato risultante viene miscelato con quello (generato nell'HRSG) all'uscita di HP SH1
- Dopo la miscelazione, la portata totale di alta pressione viene surriscaldata fino a circa 540°C nell'HRSG

Integrazione dell'energia solare in un ciclo combinato: migliori tecnologie e ottimo posizionamento

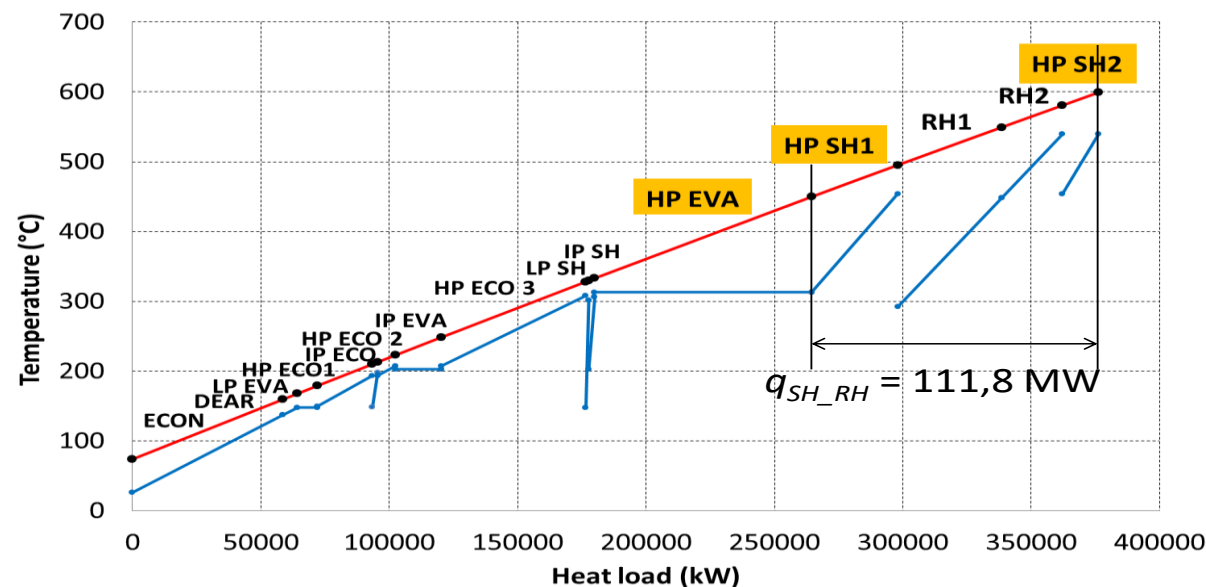
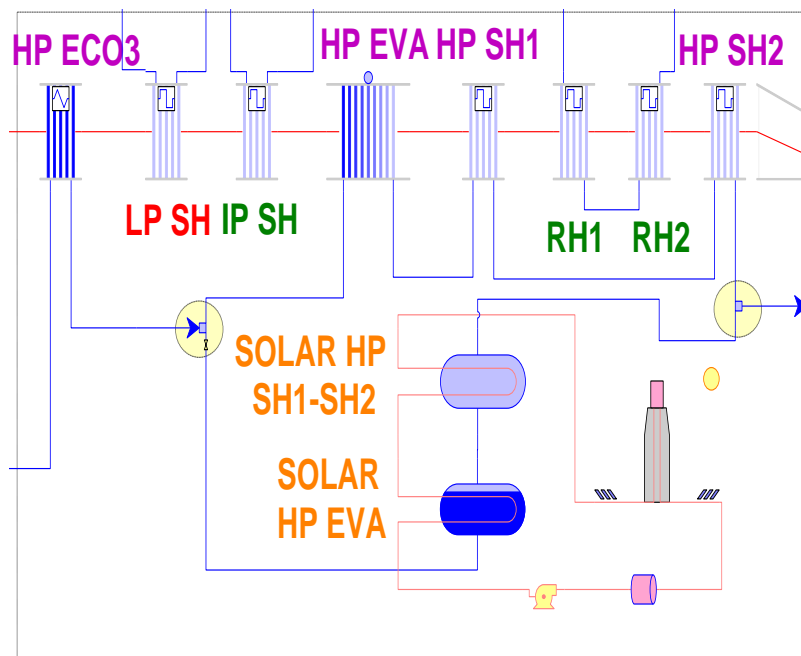
### ISCC3: Parabolic Trough + ECO3, EVA e SH1 di alta pressione



- Il calore solare «trasportato» dai sali fusi viene utilizzato per far preriscaldare in SOLAR HP ECO3, evaporare in SOLAR HP EVA e surriscaldare in SOLAR HP SH1 parte della portata di alta pressione prelevata a monte di HP ECO3
- Il vapore surriscaldato risultante viene miscelato con quello (generato nell'HRSG) all'uscita di HP SH1
- Dopo la miscelazione, la portata totale di alta pressione viene surriscaldata fino a circa 540°C nell'HRSG

Integrazione dell'energia solare in un ciclo combinato: migliori tecnologie e ottimo posizionamento

### ISCC4: Torre solare + EVA, SH1 SH2 di alta pressione

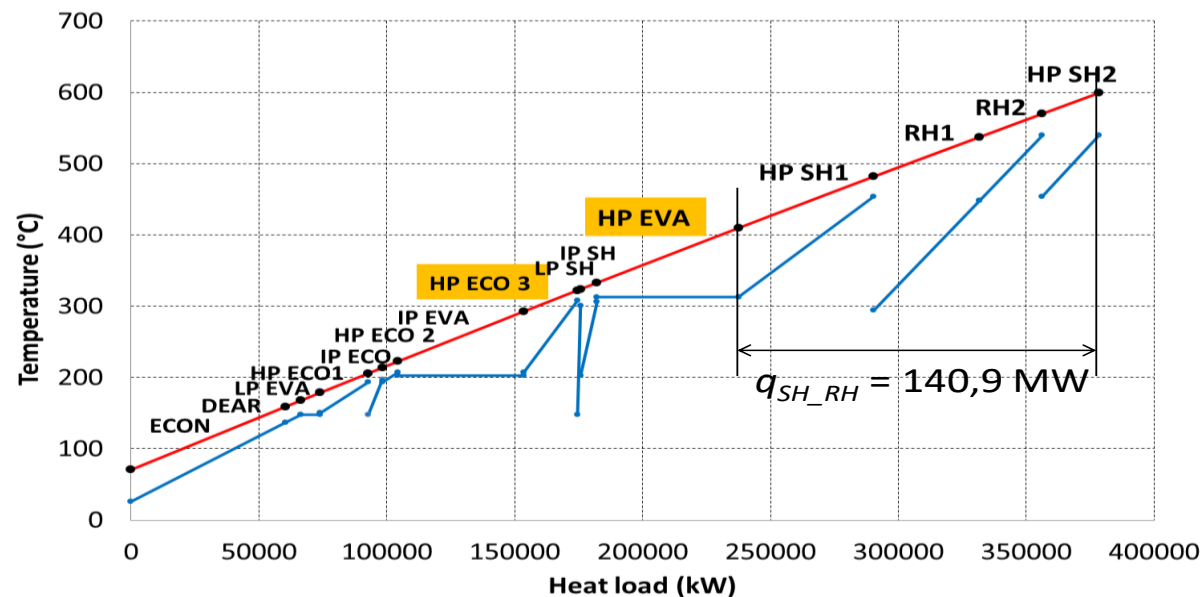
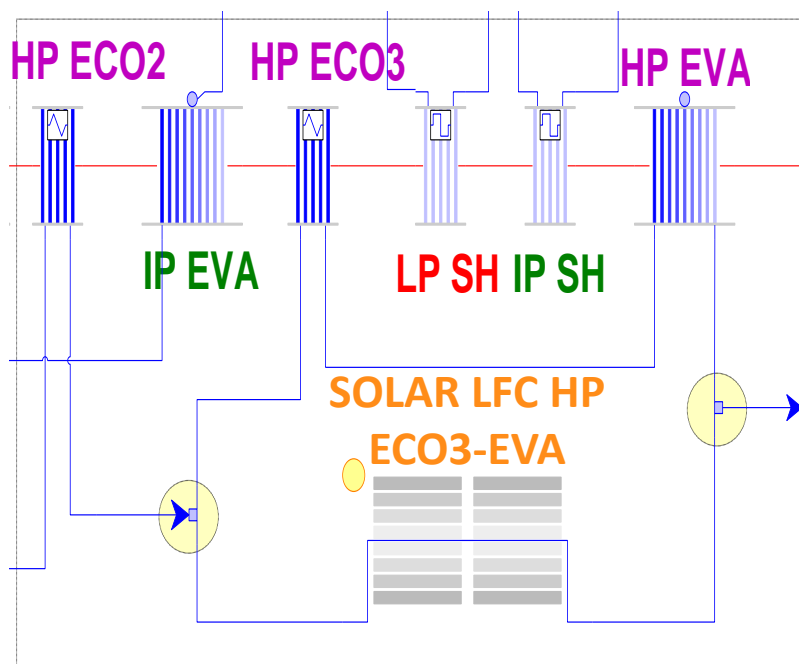


- Il calore solare «trasportato» dai sali fusi viene utilizzato per far evaporare in SOLAR HP EVA e surriscaldare in SOLAR HP1-SH2 parte della portata di alta pressione prelevata a monte di HP EVA
- Il vapore surriscaldato risultante viene miscelato con quello (generato nell'HRSG) all'uscita di HP SH2
- Dopo la miscelazione, la portata totale di alta pressione viene inviata alla turbina di alta pressione

Integrazione dell'energia solare in un ciclo combinato: migliori tecnologie e ottimo posizionamento



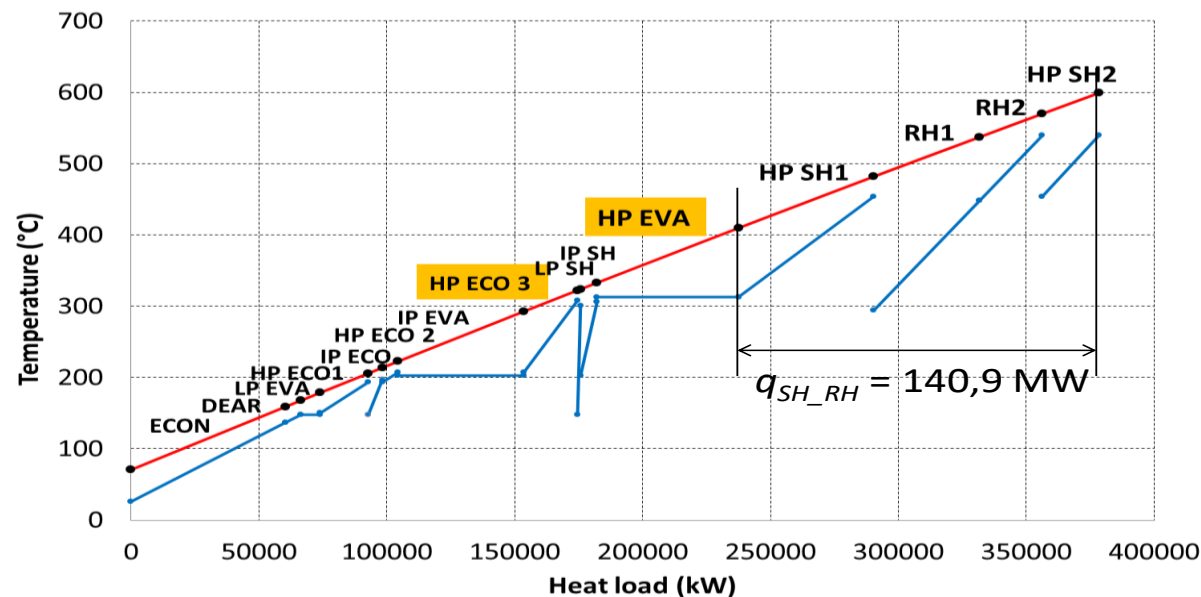
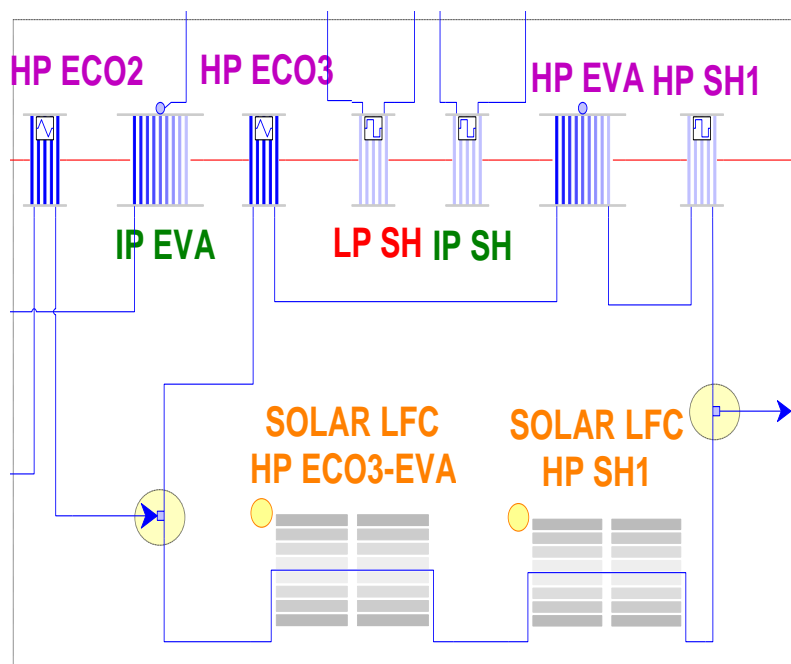
### ISCC5: Linear Fresnel + ECO3 e EVA di alta pressione



- Il calore solare viene utilizzato direttamente (produzione diretta di vapore) in SOLAR LFC HP ECO3-EVA per preriscaldare e far evaporare parte della portata di alta pressione prelevata a monte di HP ECO3
- Il vapore saturo risultante viene miscelato con quello (generato nell'HRSG) all'uscita di HP EVA
- Dopo la miscelazione, la portata totale di alta pressione viene surriscaldata fino a circa 540°C nell'HRSG

Integrazione dell'energia solare in un ciclo combinato: migliori tecnologie e ottimo posizionamento

### ISCC6: Linear Fresnel + ECO3, EVA e SH1 di alta pressione



- Il calore solare viene utilizzato direttamente (produzione diretta di vapore) per prerisc. e far evap. in SOLAR LFC HP ECO3-EVA, e surriscaldare in SOLAR LFC HP SH1 parte della portata di alta p. prelevata a monte di HP ECO3
- Il vapore surriscaldato risultante viene miscelato con quello (generato nell'HRSG) all'uscita di HP SH1
- Dopo la miscelazione, la portata totale di alta pressione viene surriscaldata fino a circa 540°C nell'HRSG

Integrazione dell'energia solare in un ciclo combinato: migliori tecnologie e ottimo posizionamento

### Parametri di prestazione

- Efficienza termica del ciclo a vapore basata sulla radiazione solare

$$\eta_{TV,DNI} = \frac{P_{el,TV,ISCC}}{Q_{gas} + F_{sol}} = \frac{P_{el,TV,ISCC}}{Q_{gas} + A \cdot DNI}$$

- Efficienza termica del ciclo a vapore basata sul calore da solare

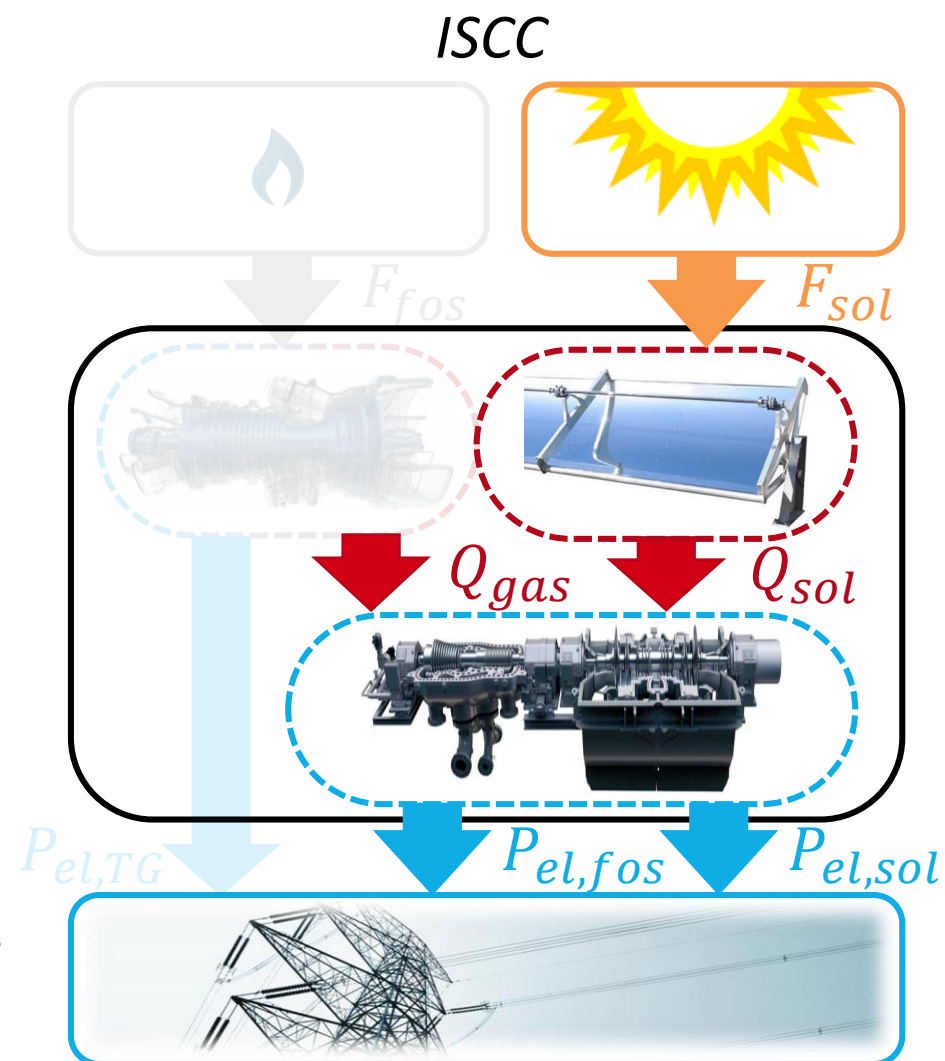
$$\eta_{TV,Q_{sol}} = \frac{P_{el,TV,ISCC}}{Q_{gas} + Q_{sol}} = \frac{P_{el,TV,ISCC}}{Q_{gas} + F_{sol} \cdot \eta_{sf}} \quad \text{dove} \quad \eta_{sf} = \frac{Q_{sol}}{F_{sol}} = \frac{Q_{sol}}{A \cdot DNI}$$

- Efficienza «radiation-to-electrical» della quota solare basata sulla rad. solare

$$\eta_{sol,DNI} = \frac{P_{el,sol}}{F_{sol}} = \frac{P_{el,sol}}{A \cdot DNI} = \left( \frac{50 \text{ MWe}}{A \cdot DNI} \right)$$

- Efficienza «radiation-to-electrical» della quota solare basata sul calore da sol.

$$\eta_{sol,Q_{sol}} = \frac{P_{el,sol}}{Q_{sol}} = \frac{P_{el,sol}}{F_{sol} \cdot \eta_{sf}} = \left( \frac{50 \text{ MWe}}{Q_{sol}} \right)$$



### Risultati: analisi energetica

Parameter	NGCC	ISCC 1	ISCC 2	ISCC 3	ISCC 4	ISCC 5	ISCC 6
$P_{el,TV}$ (kWe)	135538	185779	185101	185772	185753	185012	185363
$P_{el,sol}$ (kWe)	/	50241	49563	50234	50215	49474	49825
$Q_{gas}$ (kWt)	362303	376220	376136	378149	376342	378439	378085
$F_{sol}$ (kWt)	/	164315	166301	175100	179397	182595	181447
$\eta_{sf}$ (%)	/	60,93	59,73	61,15	56,17	58,19	57,91
$Q_{sol}$ (kWt)	/	100112	99325	107070	100774	106249	105072
$\eta_{TV,DNI}$ (%)	37,41	34,37	34,12	33,58	33,42	32,98	33,13
$\eta_{TV,Q_{sol}}$ (%)	37,41	39,00	38,93	38,29	38,93	38,17	38,36
$\eta_{sol,DNI}$ (%)	/	30,58	29,80	28,69	27,99	27,09	27,46
$\eta_{sol,Q_{sol}}$ (%)	/	50,18	49,90	46,92	49,83	46,56	47,42

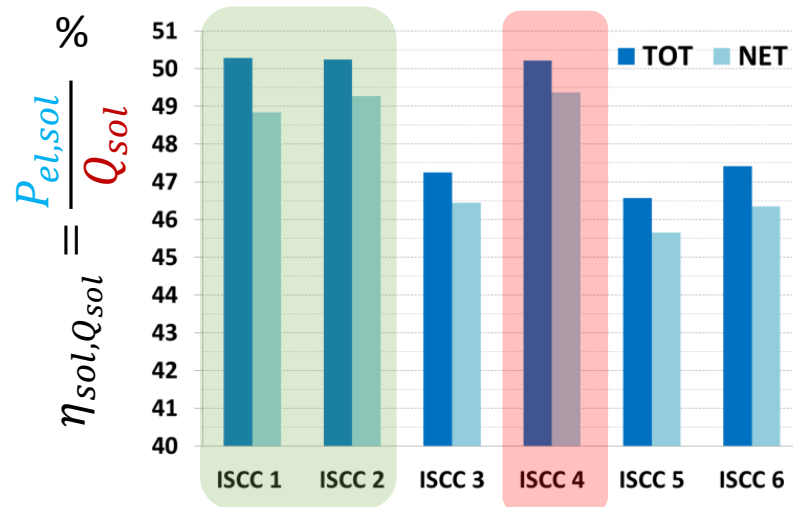
- Alti valori delle efficienze «radiation-to-electrical» della quota solare (27.1 ÷ 30.6%)
- Questi valori, molto più elevato di impianti solar-only (20 ÷ 25%), dimostrano la positiva sinergia risultante dall'integrazione del calore da solare a concentrazione con il ciclo combinato

Integrazione dell'energia solare in un ciclo combinato: migliori tecnologie e ottimo posizionamento

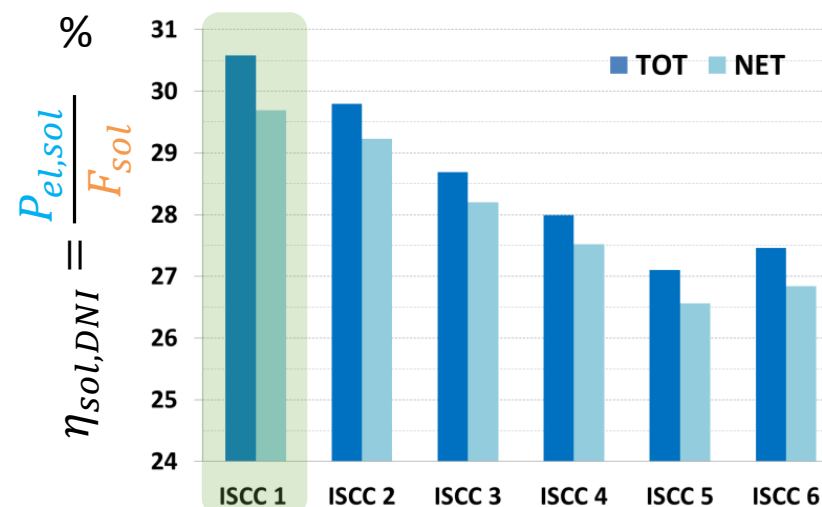


### Risultati: analisi energetica

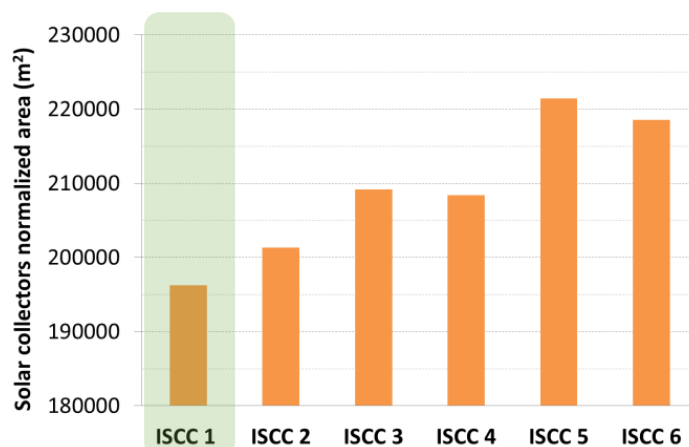
Solar thermal-to-electrical efficiency



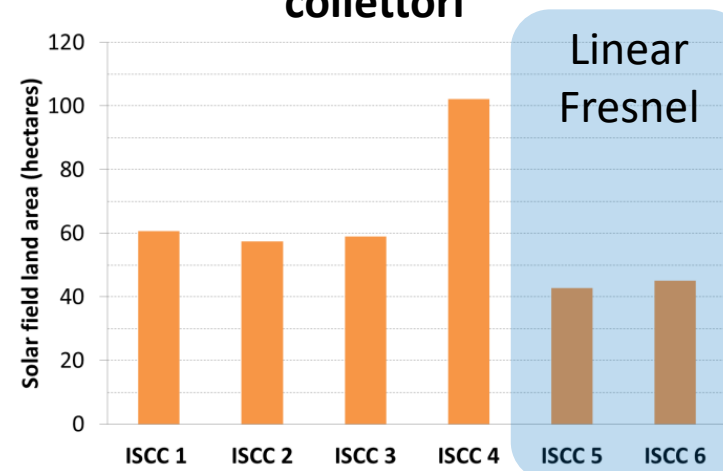
Solar radiation-to-electrical efficiency

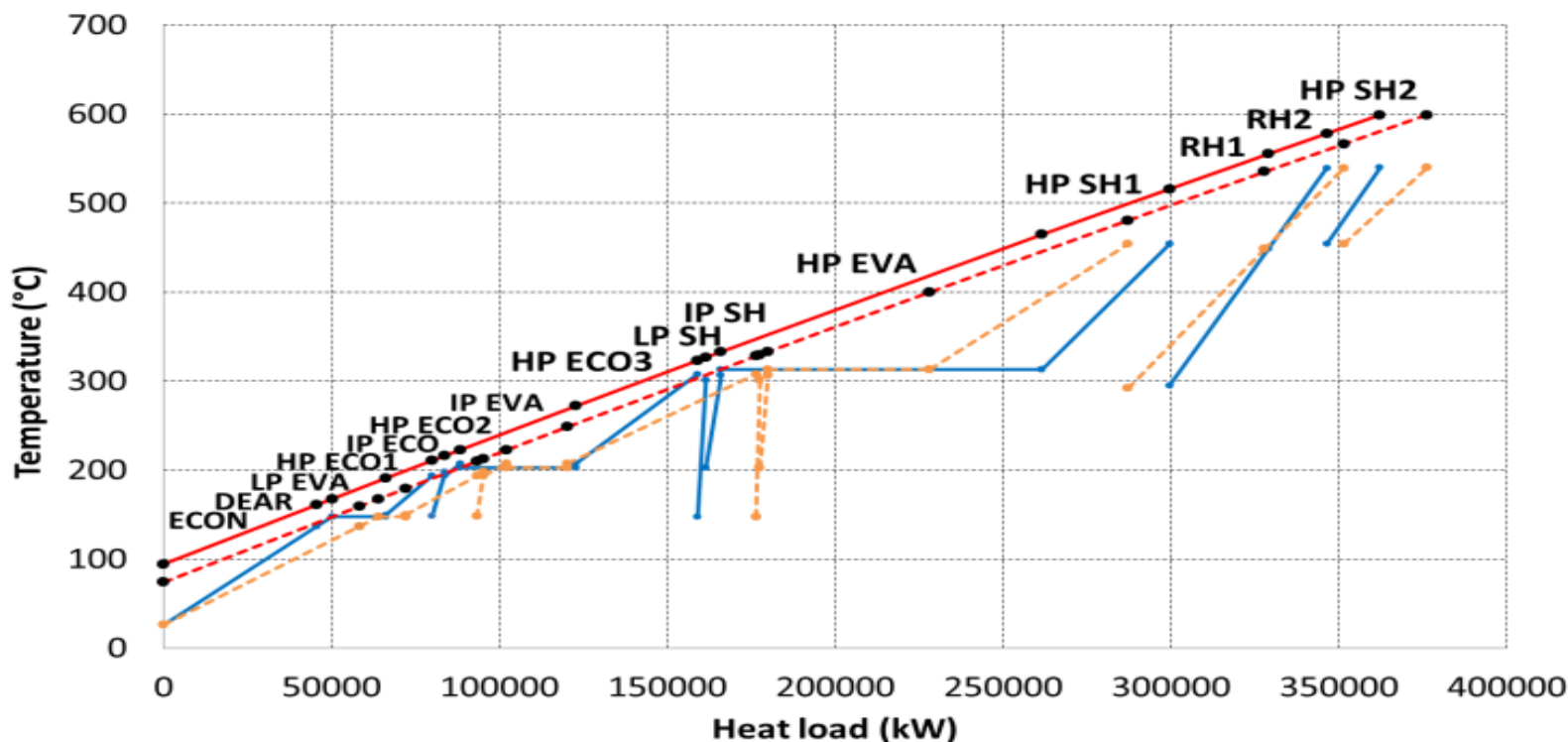


Area collettori (A)

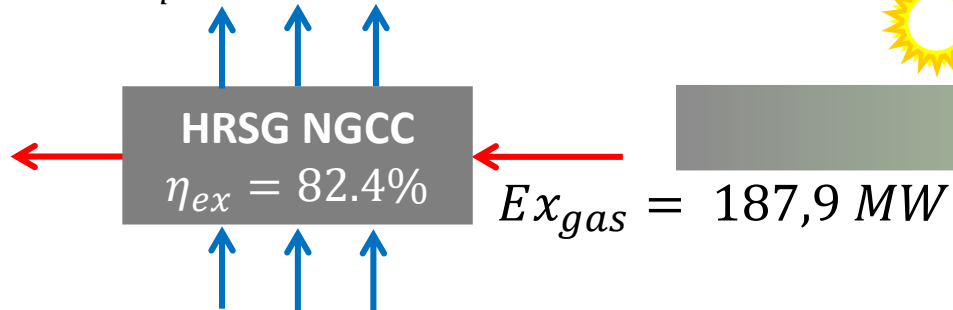


Area del terreno occupato dai collettori

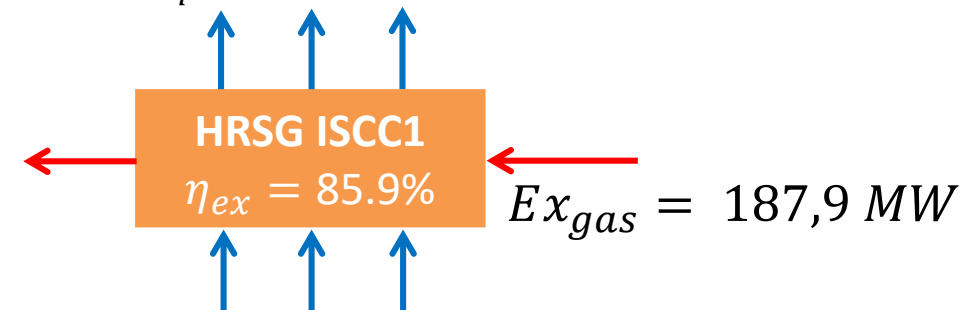




$$\Delta Ex_{vapore} = 154,9 \text{ MW}$$



$$\Delta Ex_{vapore} = 161,5 \text{ MW}$$



## Conclusioni

- La soluzione di integrazione del solare a concentrazione in un ciclo combinato con migliore efficienza «solar-to-electricity» è risulta essere quella che utilizza il calore solare generato dalla coppia Parabolic Trough – olio diatermico per sostituire parte del calore di evaporazione nel circuito di alta pressione
- Nel caso in cui vi siano vincoli sulla dimensione del campo solare è preferibile utilizzare collettori Linear Fresnel nonostante la minore efficienza «solar-to-electricity»
- L'efficienza di conversione «solar-to-electricity» ottenuta per l'impianto integrato solare – ciclo combinato è maggiore di quella raggiungibile da un impianto «solar-only» (la «componente fossile» dell'impianto integrato migliora l'efficienza della «componente solare»)
- L'aggiunta del calore da solare consente di utilizzare in modo più efficiente i gas caldi all'interno dell'HRSG rispetto al ciclo combinato di riferimento (la «componente solare» dell'impianto integrato rende più efficiente l'utilizzo del combustibile fossile)

**Per maggiori dettagli fare riferimento a:**

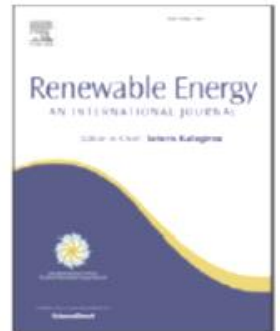
Manente G., Rech S., & Lazzaretto A. (2016). *Optimum choice and placement of concentrating solar power technologies in integrated solar combined cycle systems*. *Renewable Energy*, 96, 172–189.

*Renewable Energy* 96 (2016) 172–189

Contents lists available at [ScienceDirect](#)

**Renewable Energy**

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/renene](http://www.elsevier.com/locate/renene)



Optimum choice and placement of concentrating solar power technologies in integrated solar combined cycle systems

