

Organic Rankine Cycle

Organic Rankine Cycle (ORC) è un ciclo Rankine, dove viene utilizzato come fluido di lavoro un fluido organico invece dell'acqua.

Un fluido organico è per definizione un fluido che ha in molecola uno o più atomi di carbonio

Nelle applicazioni a bassa temperatura l'adozione di un ciclo ORC può portare notevoli vantaggi.

Le tipiche applicazioni sono:

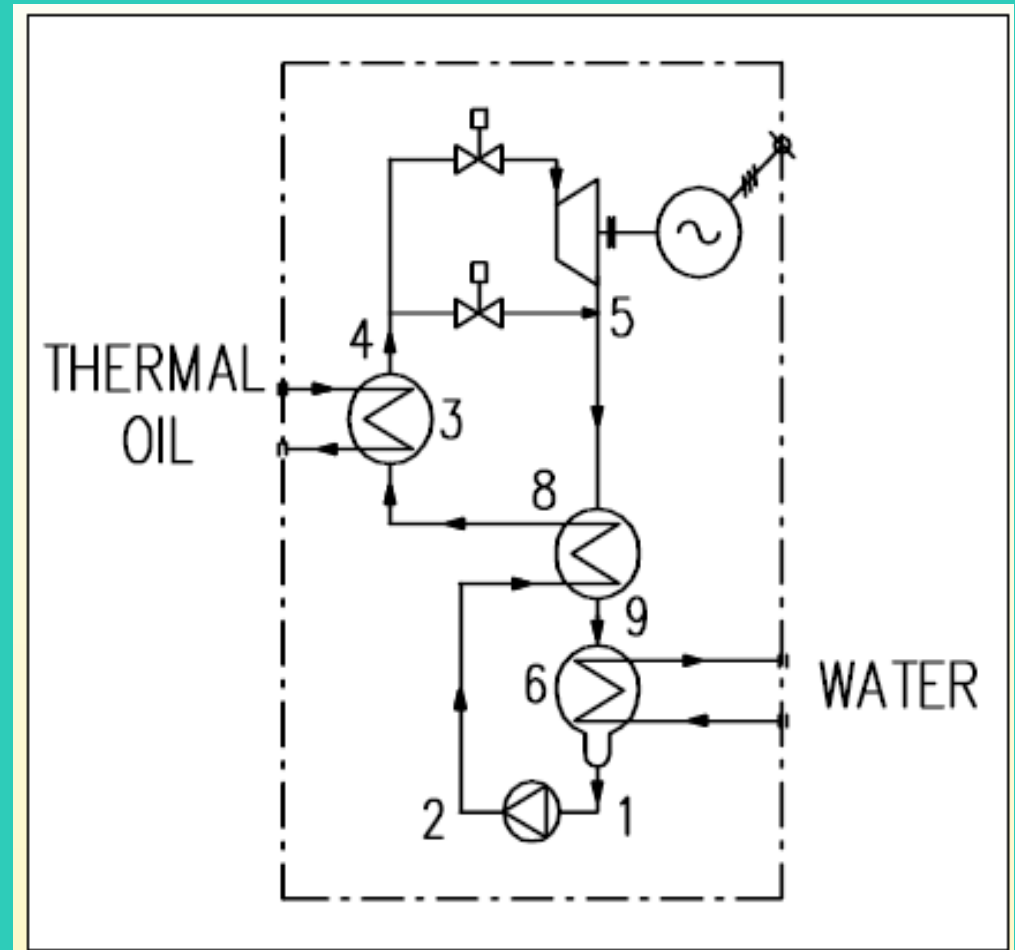
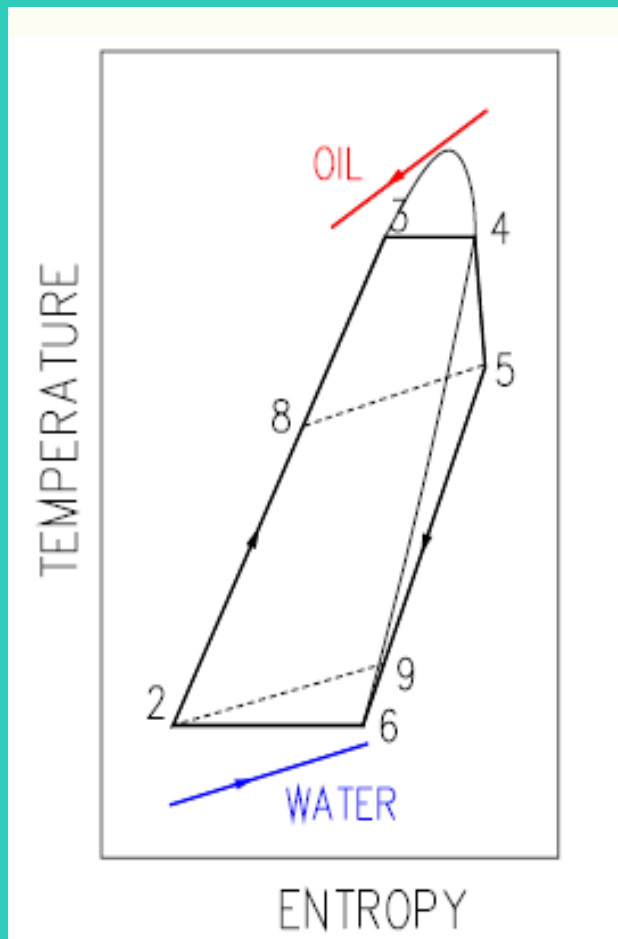
a. centrali geotermiche.

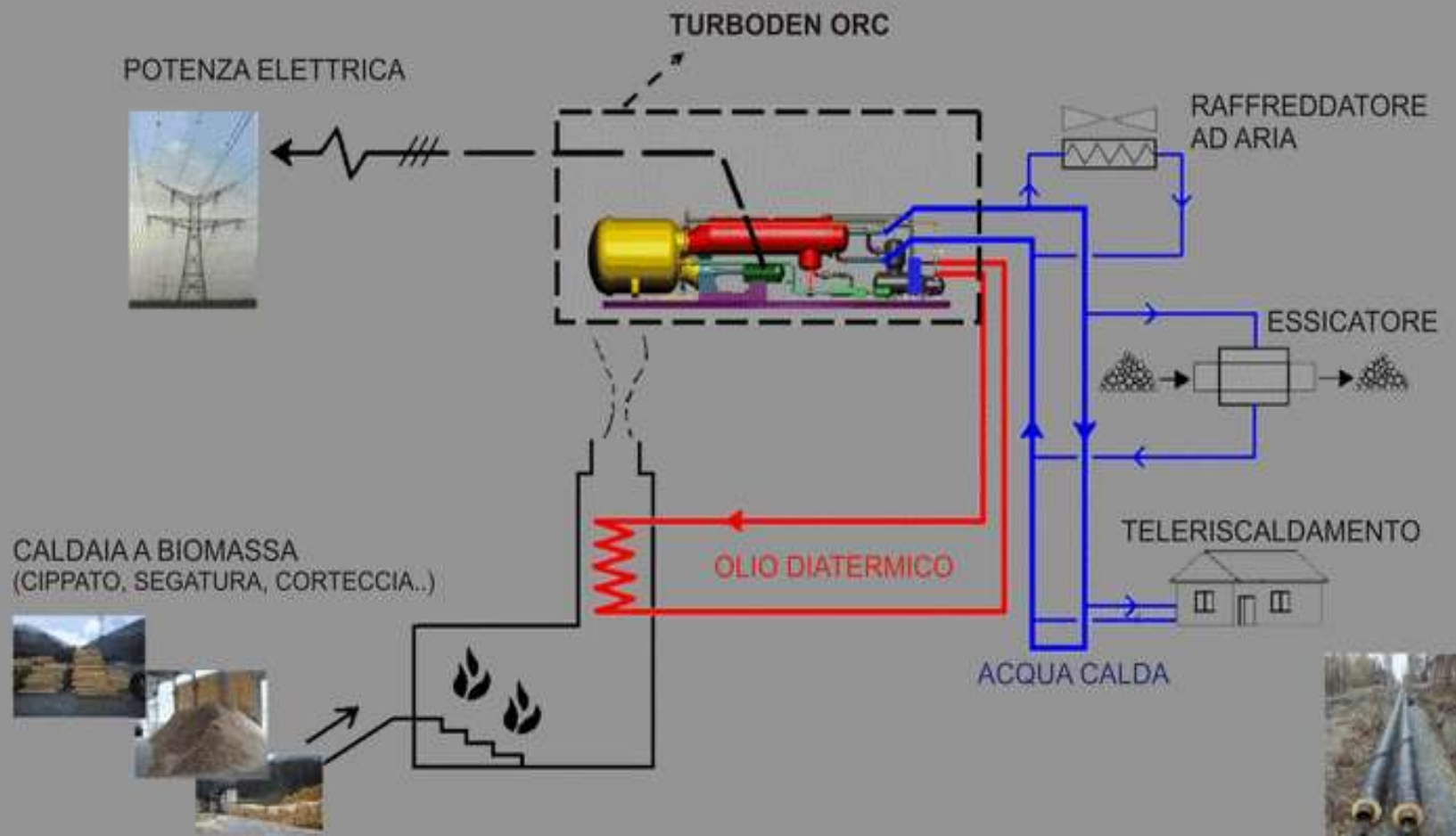
b. centrali di cogenerazione a biomassa.

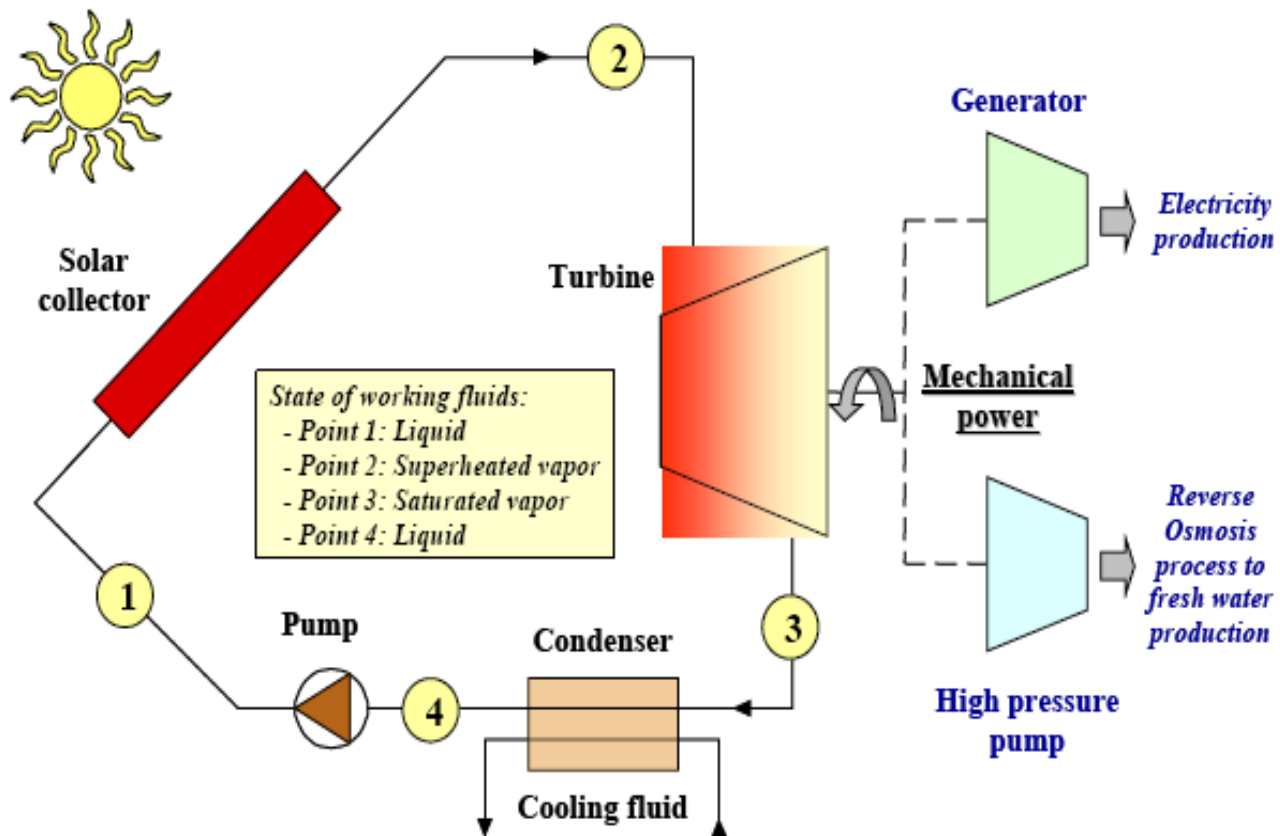
c. applicazioni di recupero di calore.

d. applicazioni che utilizzano energia solare

Configurazione di principio di un impianto OR







La scelta del fluido di lavoro:

- 1) Ottimizzi l'efficienza del ciclo.
- 2) Si accoppi bene con quello proveniente dalla sorgente termica.

Il fluido di lavoro può essere classificato in tre categorie:

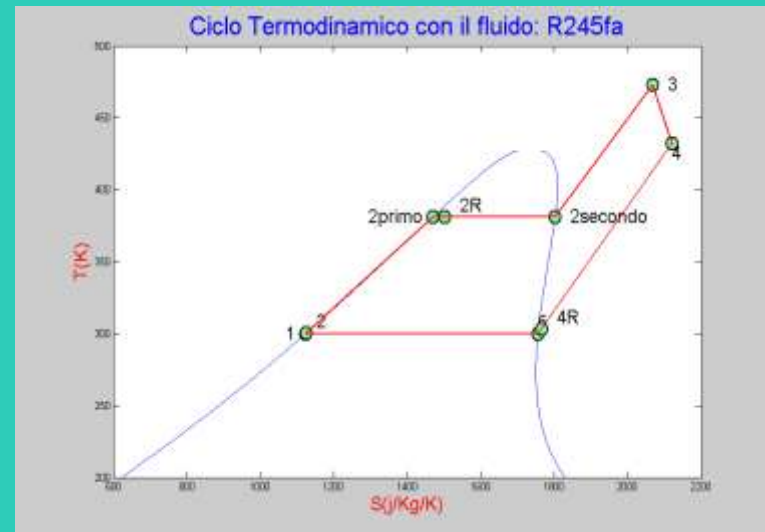
- Dry
- Isentropic
- Wet

In funzione della pendenza della curva del vapore nel piano T-S, ossia a seconda che (dT/dS) sia positiva, infinita o negativa.

Proprietà termofisiche dei fluidi di lavoro

Fluidi	H2O	NH3	R134a	R11	R113	R245f a
Proprietà						
dT/dS	< 0	< 0	= 0	= 0	> 0	> 0
Peso Molecolare	18	17	102	13 7	187	134
Punto Critico (K)	647	405. 3	374.1 5	47 1	487. 3	427.2
Calore latente a 1 bar (kJ/kg)	2200	1347	215	17 9	143. 9	197

Influenza della pendenza della curva del vapore dT/dS



Durante la fase di espansione i fluidi con pendenza della curva del vapore positiva si dice che rimangono asciutti da qui il nome "dry", a differenza di quanto avviene per H_2O ("wet").

Il notevole vantaggio è di evitare la formazione di goccioline di acqua che muovendosi ad elevata velocità urtano contro le palette della turbina ed inoltre ne provocano l'erosione.

Influenza del peso molecolare

Per tali tipi di applicazioni si deve scegliere un fluido che abbia un valore alto del peso molecolare. Questa considerazione deriva da semplici osservazioni relative alla progettazione

$$L = \frac{k}{k-1} * p1 * v1 * \left[1 - \left(\frac{p2}{p1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \frac{k}{k-1} * R * T1 * \left[1 - \left(\frac{p2}{p1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right], \text{ kJ/kg} \quad R = \frac{Ro}{m}$$

$$L \propto \frac{k}{k-1} * \frac{Ro}{m} * T1 * \left[1 - \left(\frac{p2}{p1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

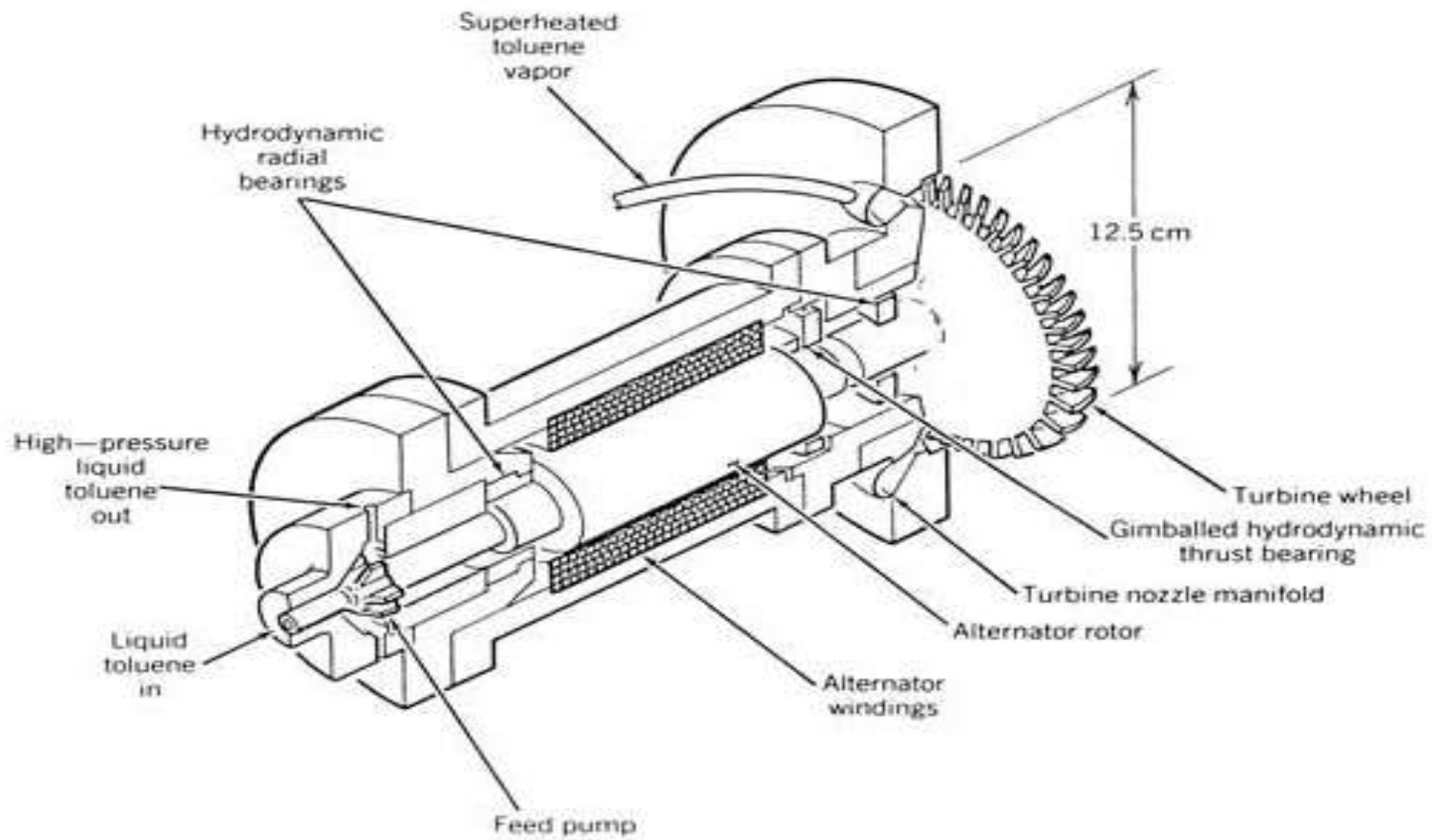
Per un dato rapporto di pressione una elevata massa molecolare mi permette di contenere il lavoro di espansione per unità di massa.

Questo mi consente un notevole vantaggio dal punto di vista costruttivo in quanto costruirò la mia turbina con un solo stadio; a differenza di quanto avviene con l'acqua dove lavoro con turbine multi-stadio.

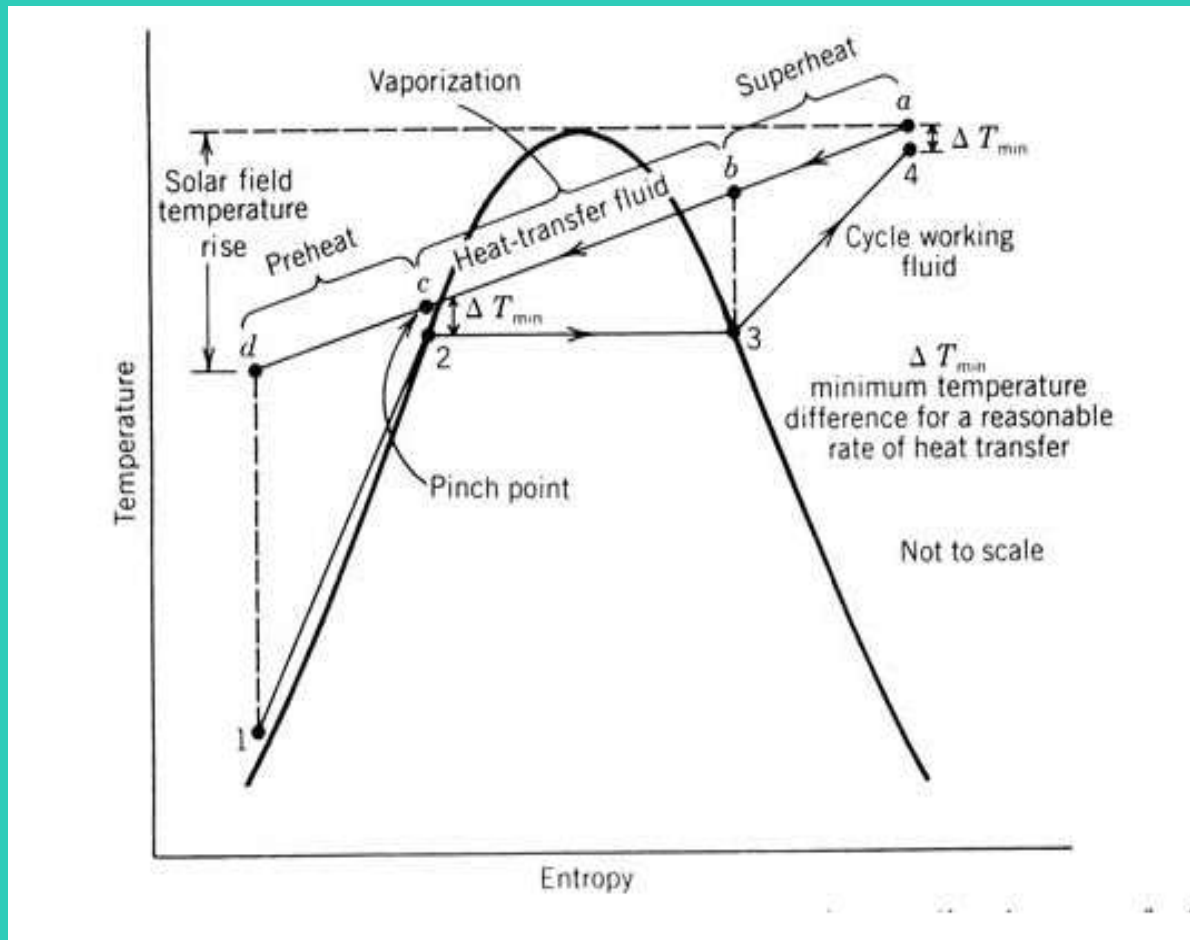
Vediamo se si hanno altri vantaggi

$$L = \frac{k}{k-1} * \frac{Ro}{m} * T1 * \left[1 - \left(\frac{p2}{p1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \propto u^2 \propto N^2 \quad \Rightarrow \quad L \propto u^2 \propto N^2 * \frac{(k-1)}{k} * \frac{m}{Ro}$$

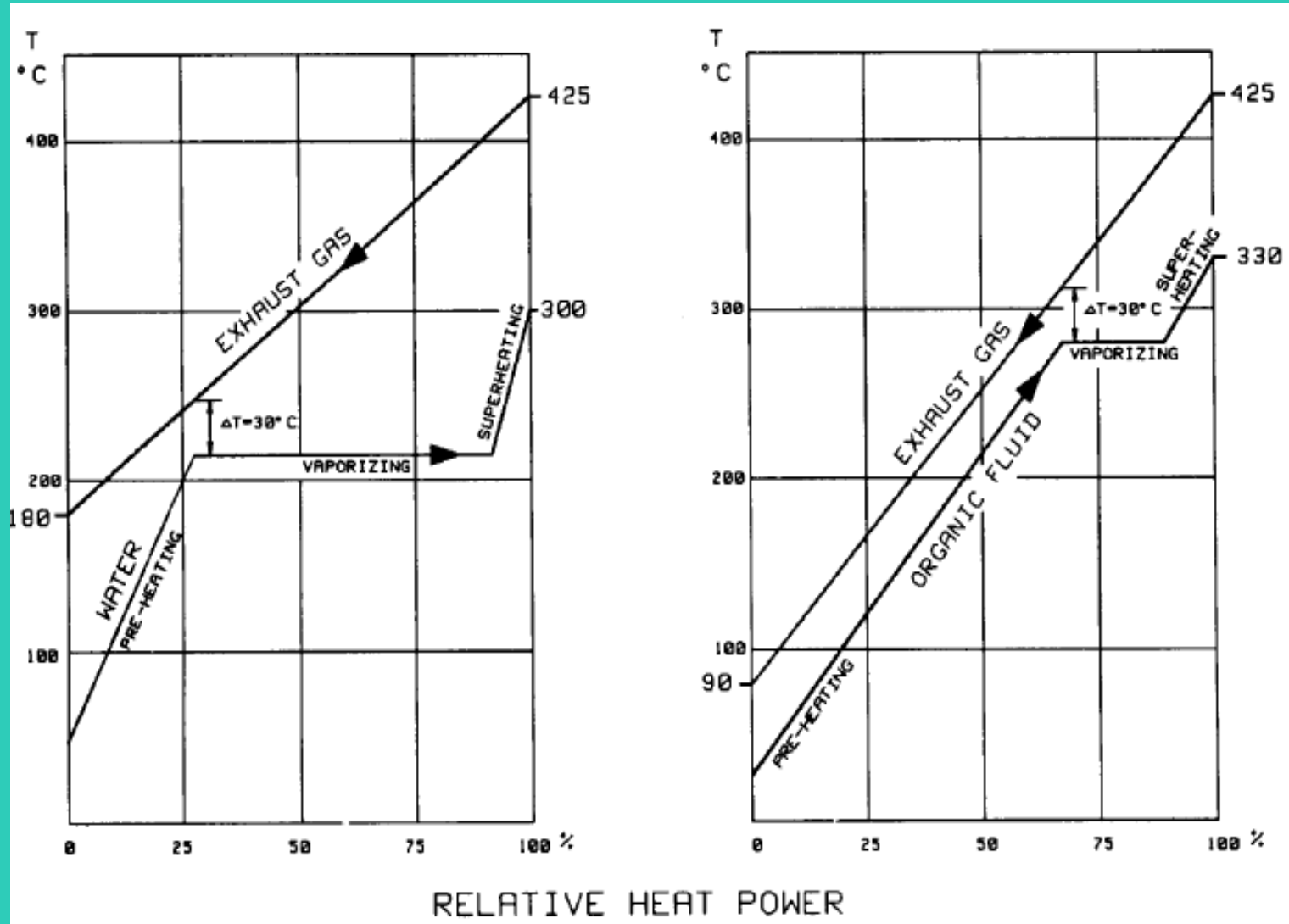
- Bassa sollecitazione meccanica della turbina, dovuta ad una velocità periferica più bassa.
- Basso numero di giri della turbina, tale da consentire il collegamento diretto al generatore elettrico senza interposizione di riduttore di giri



Influenza del calore latente di vaporizzazione



Influenza del calore latente di vaporizzazione



Obiettivi

Analisi di cicli Rankine a fluido organico per la produzione di energia elettrica.

Proposta di realizzazione di un impianto semplice e a basso costo per una potenza di 10 kW.


Espansore

Superficie del collettore

Analisi termodinamica

La simulazione è stata effettuata con MATLAB© fissando:

$$T_3 = 200 \text{ C}$$

$T_{cond} \begin{cases} T_1 = 30 \text{ C} \\ T_1 = 40 \text{ C} \\ T_1 = 50 \text{ C} \end{cases}$  per analizzare i vantaggi scaturiti
dalla diminuzione della temperatura
di condensazione

$$P_2 = P_{critica} \cdot x_p + [P_{sat}(T_{50}) \cdot (1 - x_p)] \quad \text{Con} \quad x_p = \begin{cases} 0,25 \\ 0,5 \\ 0,75 \end{cases}$$

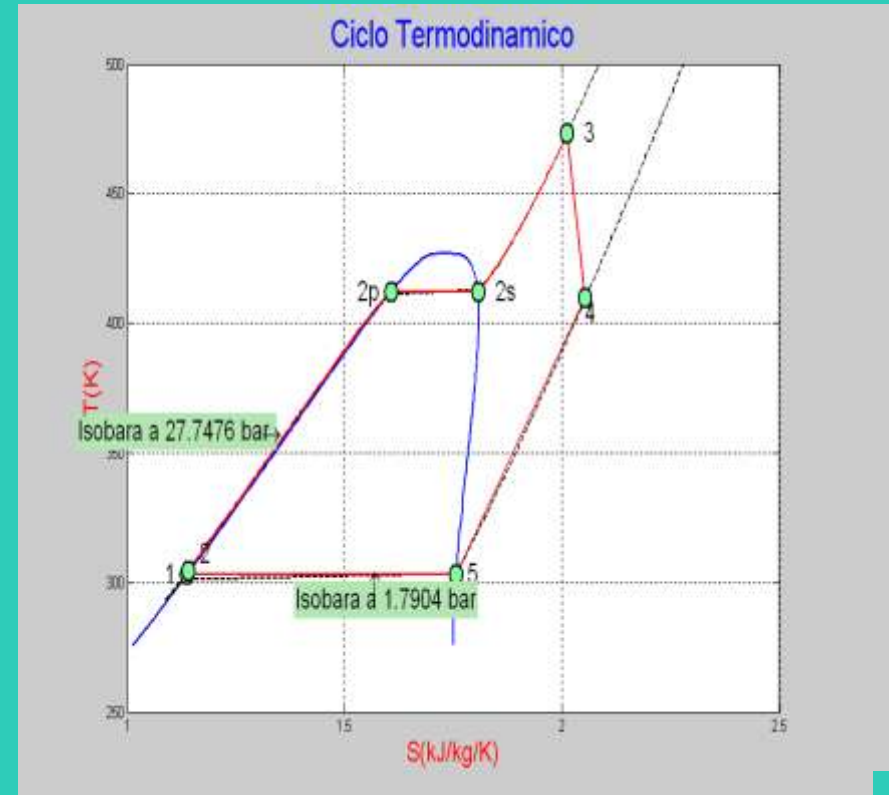
 per analizzare i vantaggi scaturiti dall'innalzamento
dell'isobara superiore

R245fa

$$T_1 = 30\text{ }^{\circ}\text{C} \quad X_p = 0,75$$

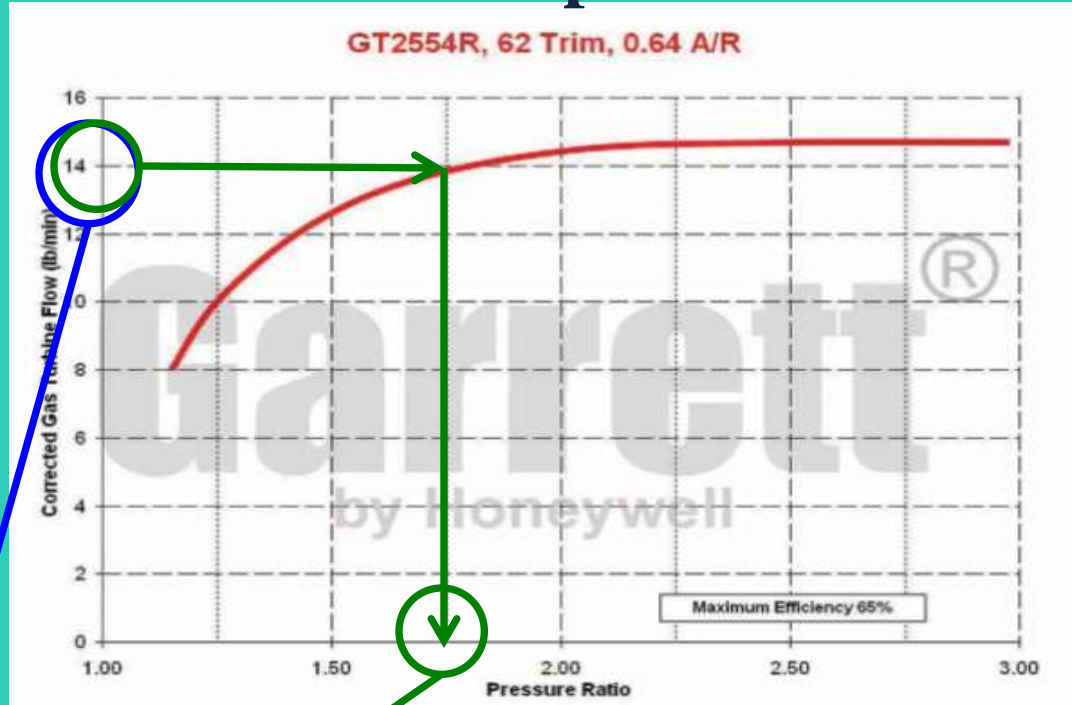
$$P_H = 1,7904 \text{ bar}$$

\dot{V} [m ³ /s]	0,0002088808
\dot{m} [kg/s]	0,2494
h_{tu} [kJ/kg]	30,849
\dot{Q}_{olio} [kW]	8,498
η_{ciclo}	0,1254
$\eta_{globale}$	0,1835



Espansore

Individuazione dei parametri corretti



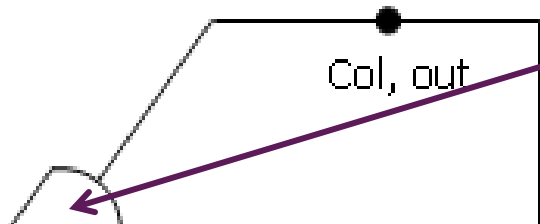
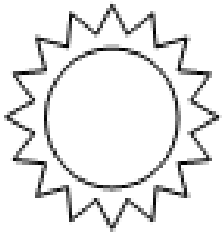
$$\dot{m}_{\text{correttita}} = \beta_{\text{ORC}} \dot{m}_{\text{ORC}} = \frac{T_3 R}{P_3} \sqrt{\frac{T_{\text{rif}} R_{\text{rif}}}{P_{\text{rif}} k_{\text{rif}}}} \frac{1}{\sqrt{\frac{(k_{\text{aria}} - 1)}{(k_{\text{ORC}} - 1)} \cdot \left(1 - \frac{1}{(\beta_{\text{ORC}})^{\lambda_{\text{ORC}}}}\right)}}$$

Espansore

Individuazione dei parametri corretti

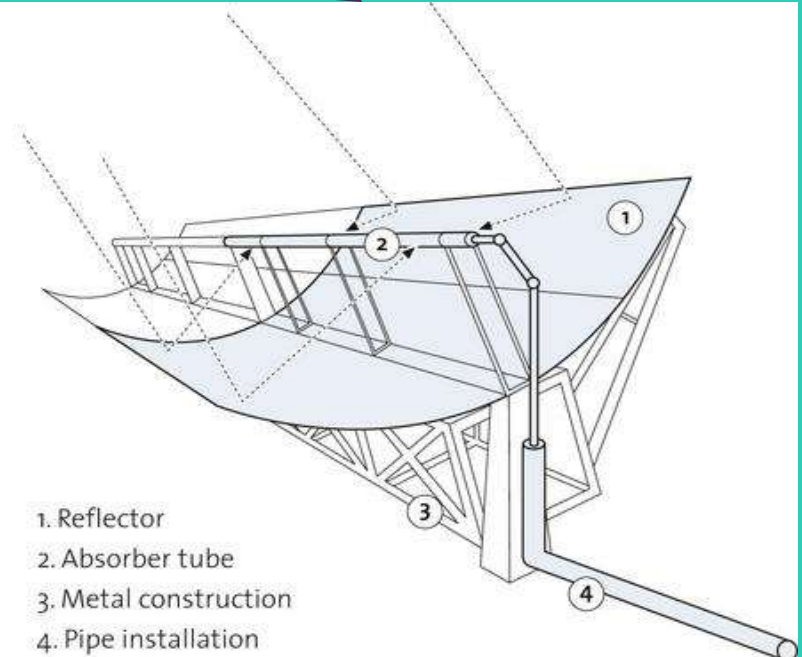
$$N_{\text{corretto}} = N \sqrt{\frac{k_{rif} R_{rif} T_{rif}}{k R T_3}}$$

Sorgente termica



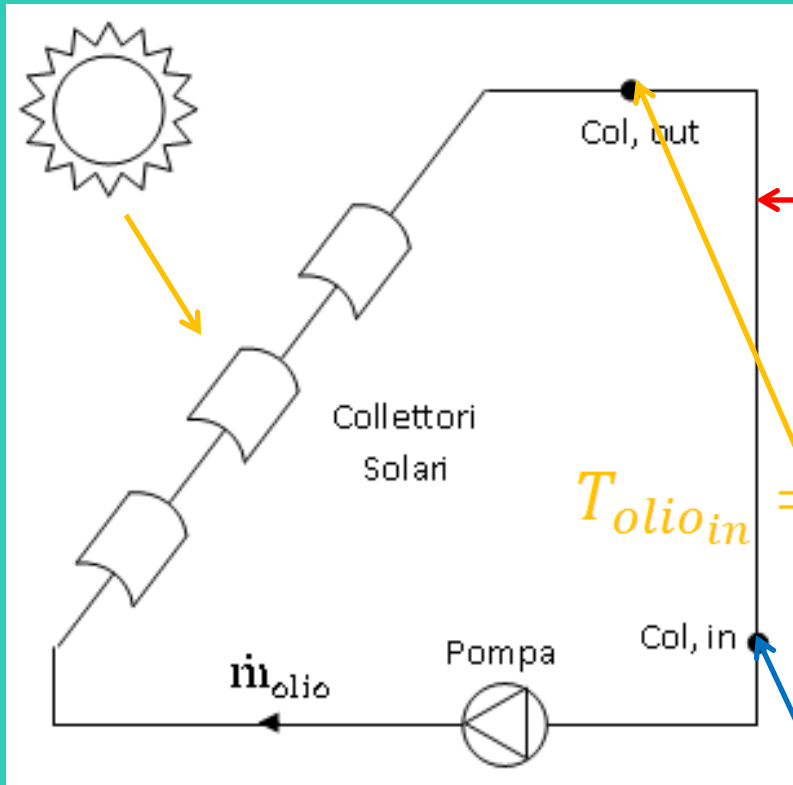
in ●

**Collettori solari a
concentrazione
(CSP)**



Fluido termovettore

Circuito ad
olio diatermico



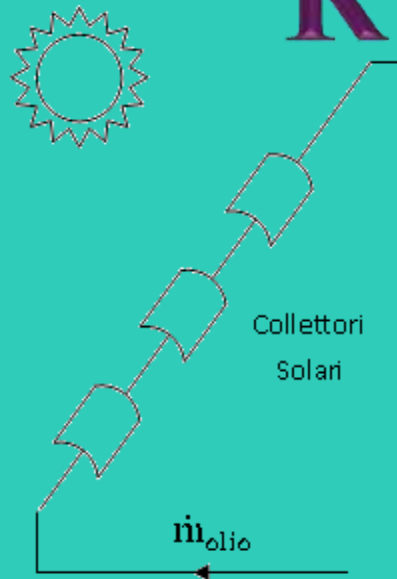
AGIP ALARIA 2

$$T_{olio_{in}} = 270 \text{ C}$$

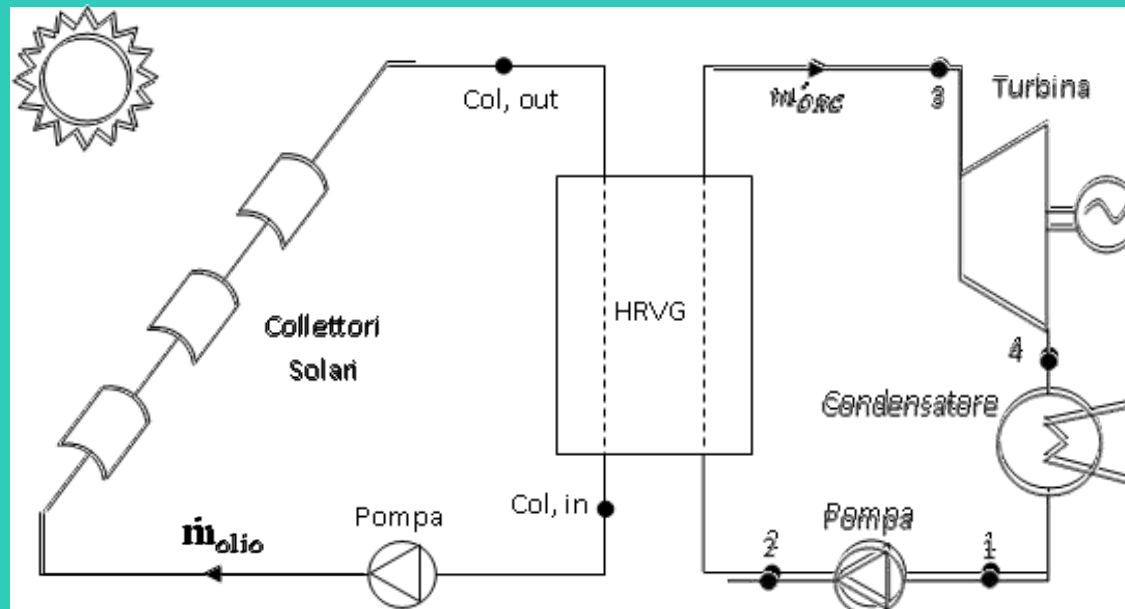
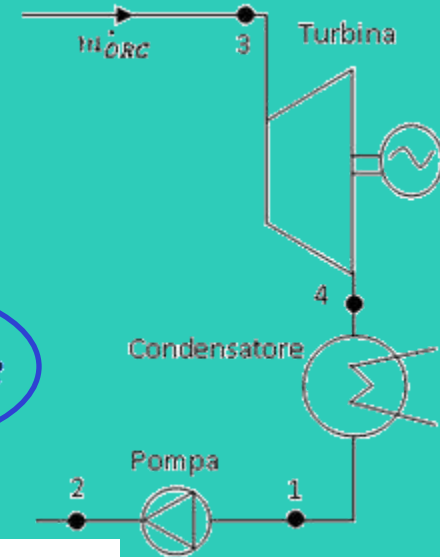
$$T_{olio_{out}}$$

$$T_f = \frac{T_{olio_{in}} + T_{olio_{out}}}{2}$$

Rendimento totale



$$\eta_{totale} = \eta_{collettore} \cdot \eta_{globale}$$



Rendimento del collettore

$$\eta_{\text{collettore}} = \eta_0 - a_1 \cdot \left(\frac{T_f - T_a}{I_{\text{Solare}}} \right) - a_2 \cdot \left(\frac{T_f - T_a}{I_{\text{solare}}} \right)^2 \cdot I_{\text{Solare}}$$

$$\eta_0 = 0,75$$

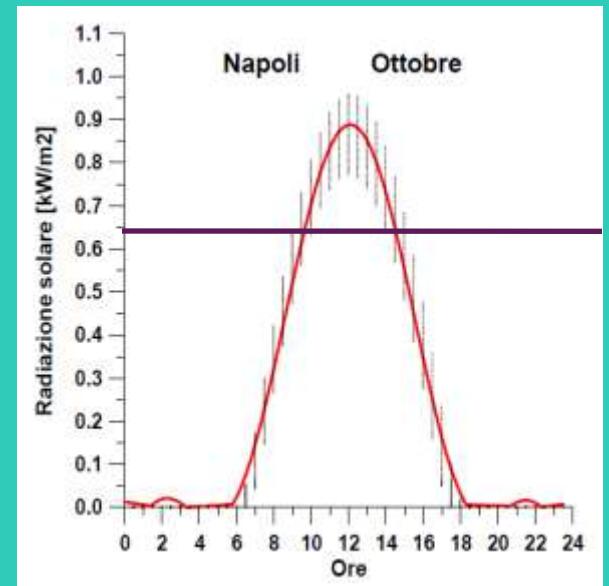
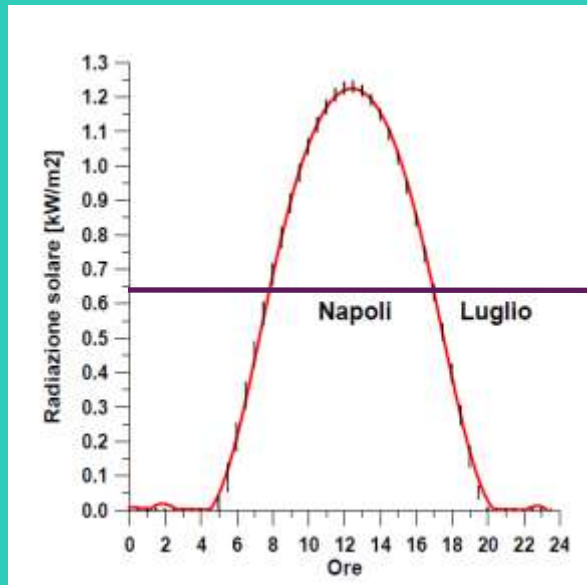
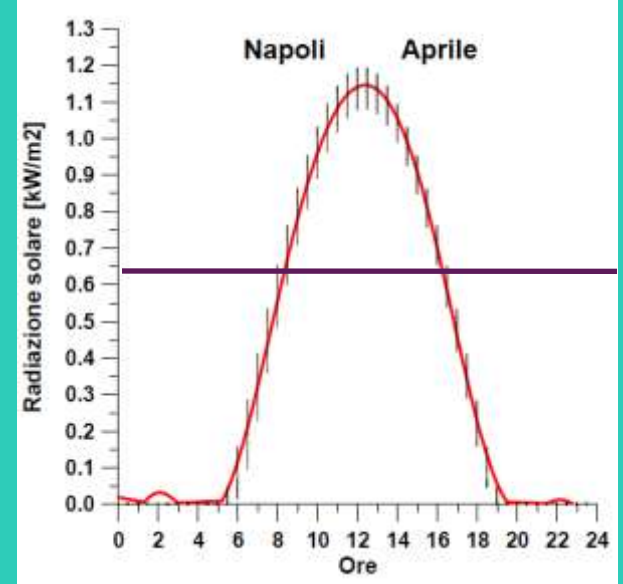
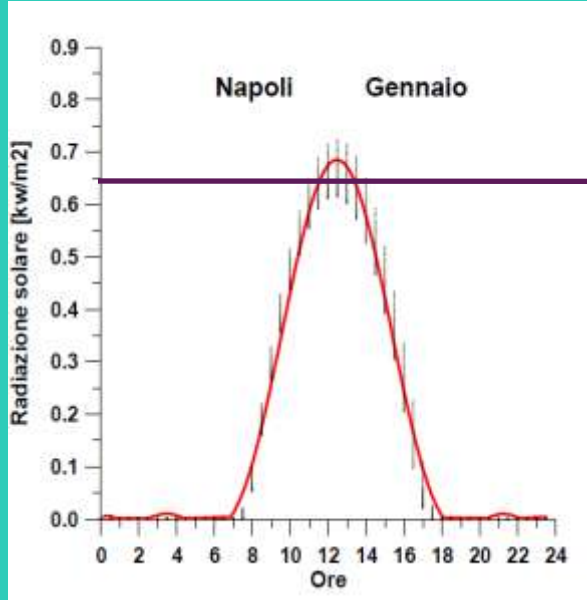
$$a_1 = 0,11232 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$$

$$a_2 = 0,00128 \text{ W/m}^2 \cdot \text{C}$$

$$T_a = 18 \text{ C}$$

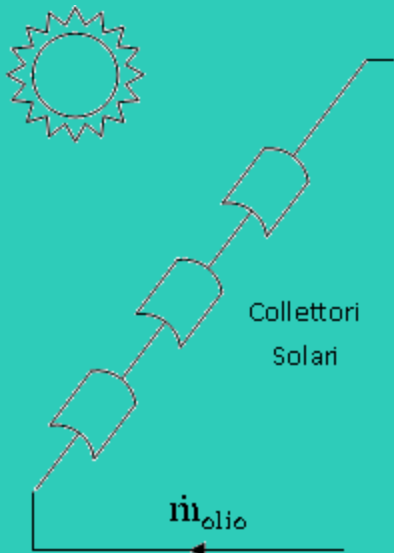
$$I_{\text{solare}} = 650 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

I Solare



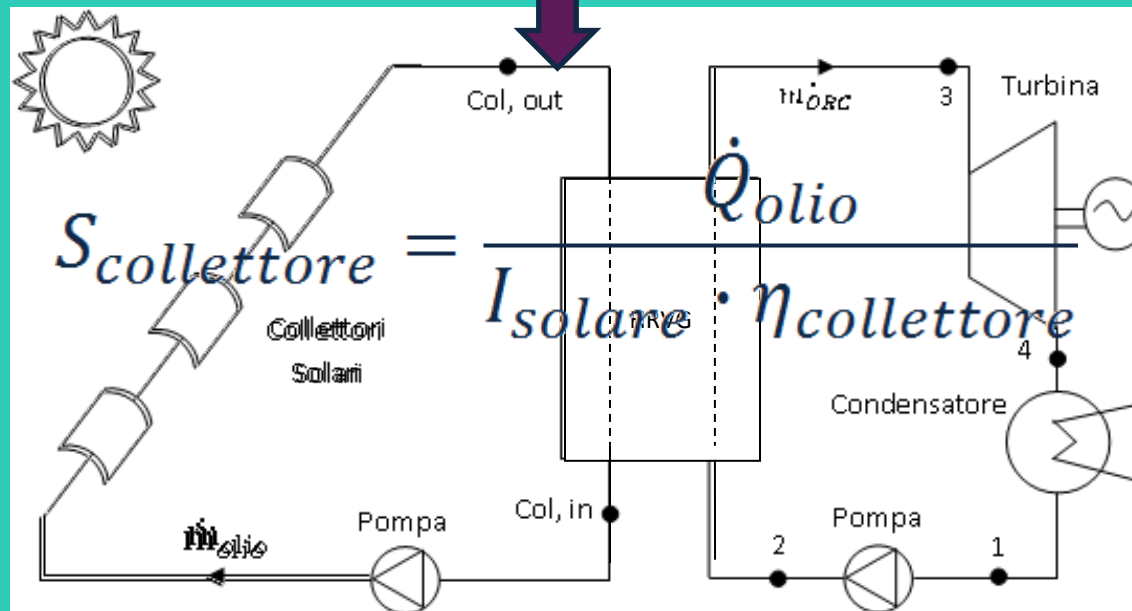
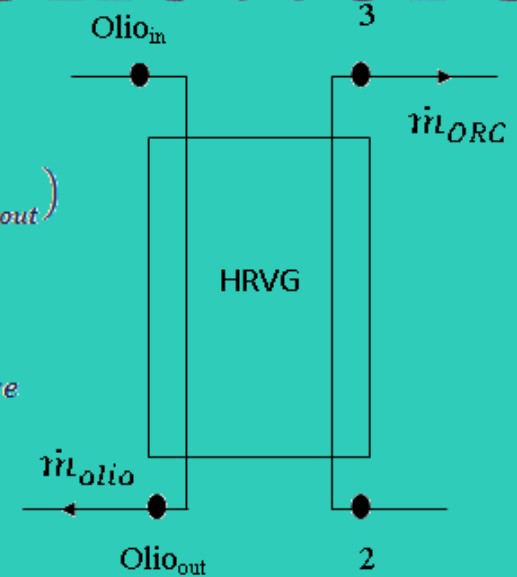
$$I_{solare} = 650 \frac{W}{m^2}$$

Superficie del collettore



$$\dot{Q}_{olio} = \dot{m}_{olio} \cdot c_{p,olio} \cdot (T_{olio,in} - T_{olio,out})$$

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



Opportune scelte impiantistiche

1. MINIMIZZARE I COSTI DELL'ESPANSORE

Utilizzare come espansore uno già esistente



β_{aria}

Contenuto

η_{totale}

Molto basso

Opportune scelte impiantistiche

2. MINIMIZZARE I COSTI DEL COLLETTORE

Minimizzare la superficie riflettente del collettore

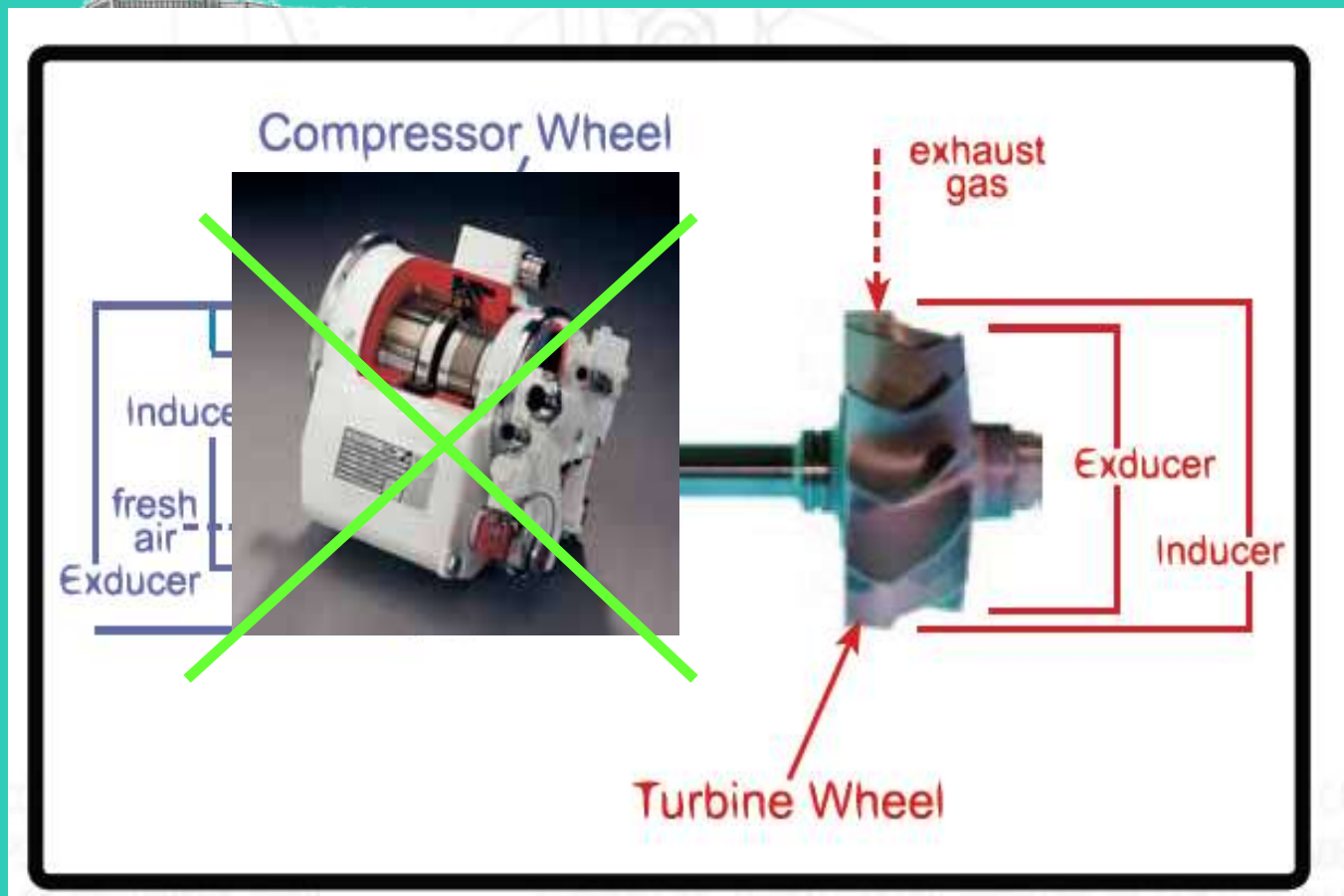
β_{aria}

Alto

η_{totale}

Migliore

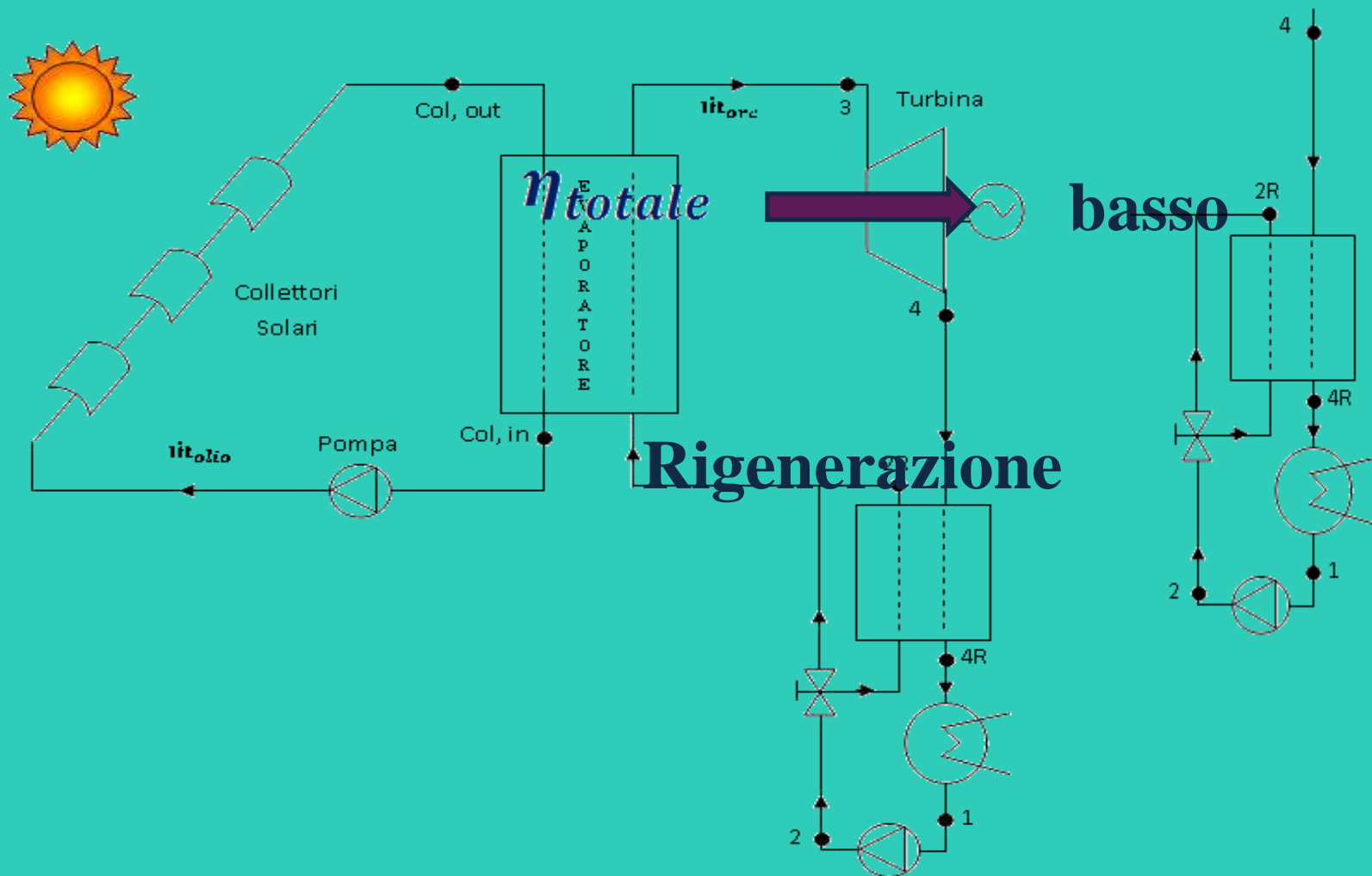
1) Minimizzare i costi dell'espansore



Cicli simulati senza rigenerazione

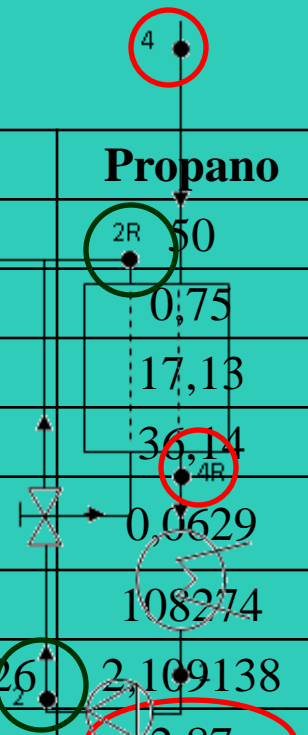
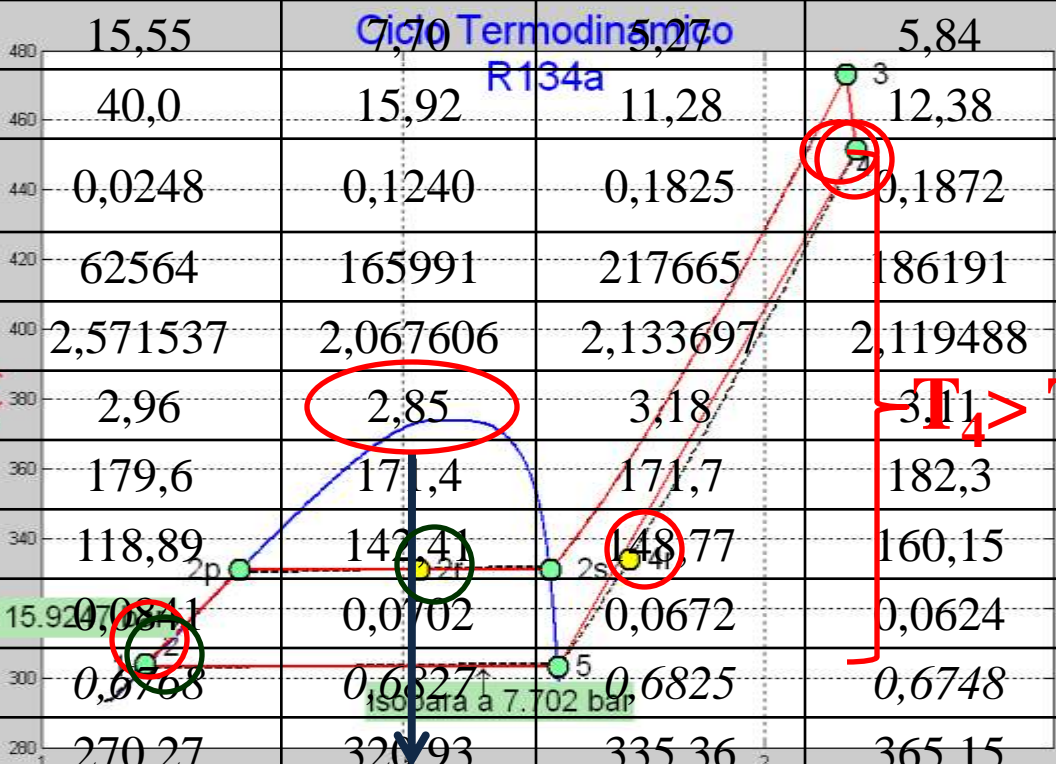
Fluido	Ammoniaca	R134a	R227ea	R236fa	RC318	Propano
T_1 [C]	40	30	30	50	40	50
X_p	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,75
P_1 [bar]	15,55	7,70	5,29	5,84	4,92	17,13
P_3 [bar]	40,00	15,93	11,28	12,38	10,63	36,14
$\dot{m}_{corretta}$ [kg/s]	0,0248	0,1240	0,1825	0,1872	0,2023	0,0629
$N_{corretto}$	62564	165991	217665	186191	236846	108274
β_{orc}	2,57	2,07	2,13	2,12	2,16	2,11
β_{aria}	2,97	2,86	3,18	3,11	3,30	2,87
T_f [C]	171,38	160,76	160,06	170,76	165,14	169,37
\dot{Q}_{olio} [kW]	132,77	221,11	270,06	259,27	285,74	184,21
$\eta_{globale}$	0,0753	0,0452	0,0559	0,0386	0,035	0,0509
$\eta_{collettore}$	0,6827	0,690	0,6904	0,6831	0,6870	0,6841
$S_{collettore}$ [m ²]	299,21	493,02	601,76	583,92	639,82	414,28
η_{totale}	0,0514	0,0312	0,0386	0,0264	0,0240	0,0348

Ciclo rigenerativo



Cicli simulati con rigenerazione

Fluido	Ammoniaca	R134a	R227ea	R236fa	RC318	Propano
T_1 [C]	40	30	30	50	40	50
X_p	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,75
P_1 [bar]	15,55	7,70	5,27	5,84	4,92	17,13
P_3 [bar]	40,0	15,92	11,28	12,38	10,63	36,14
$m_{corretta}$	0,0248	0,1240	0,1825	0,1872	0,2023	0,0629
$N_{corretto}$	62564	165991	217665	186191	236846	108274
β_{arc}	2,571537	2,067606	2,133697	2,119488	2,16203026	2,109138
β_{aria}	2,96	2,85	3,18	3,11	3,30	2,87
T_f [C]	179,6	171,4	171,7	182,3	177,4	185,4
Q_{olio} [kW]	118,89	147,41	148,77	160,15	156,76	128,64
$\eta_{globale}$	0,0841	0,0702	0,0672	0,0624	0,0638	0,0777
$\eta_{collettore}$	0,6768	0,6827	0,6825	0,6748	0,6784	0,6717
$S_{collettore}$	270,27	327,93	335,36	365,15	355,51	297,64
η_{totale}	0,0569	0,0479	0,0459	0,0421	0,0433	0,0522



Scambi termici

R134a

Diagramma di scambio termico RIGENERATORE

460 4 R134a

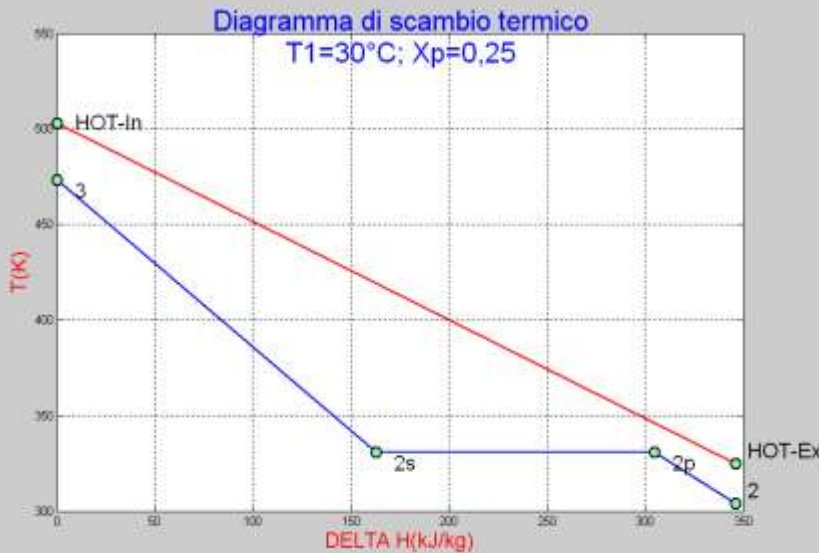


Diagramma di scambio termico HRSG

R134a



300 0 2 4 6 8 10 12 14 DELTA H(kJ/kg)

$T_{olio_{out}}$ [C] 51,52

$T_{olio_{out}[RIG]}$ [C] 72,709

Accoppiamento con l'espansore

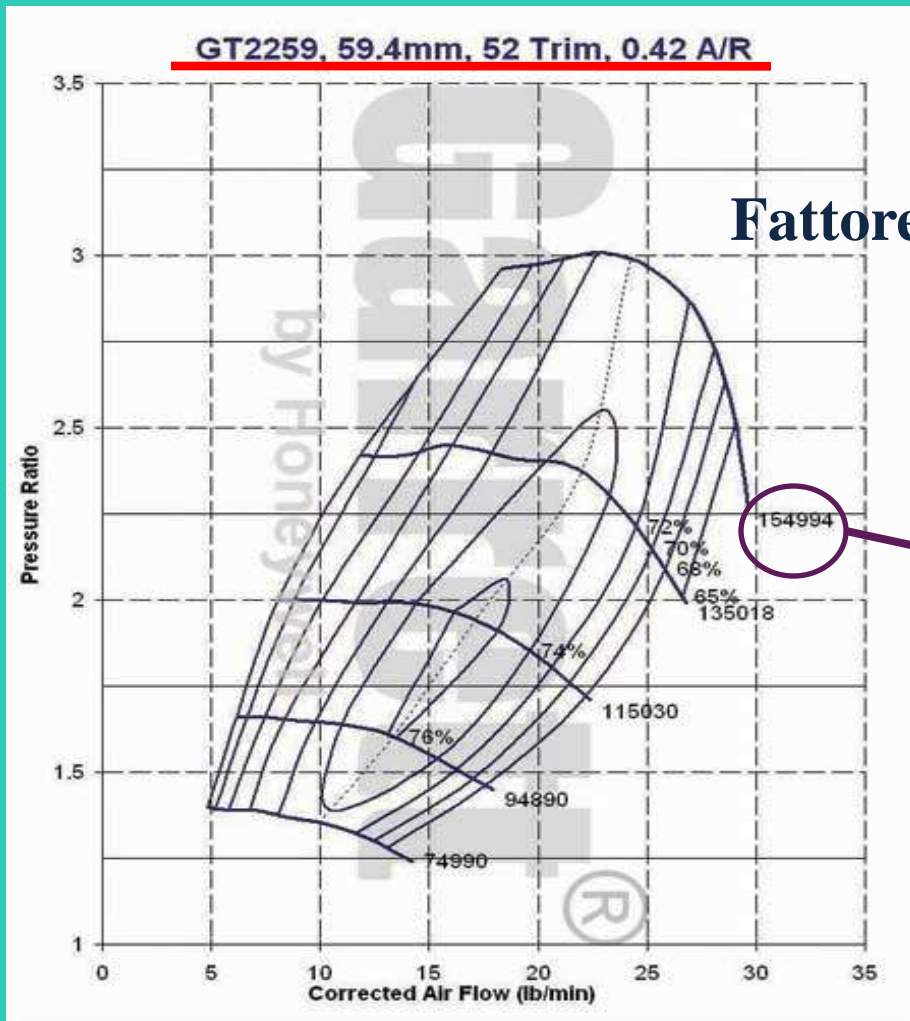
R134a



GT2259

Mappe caratteristiche

COMPRESSORE



Fattore di riduzione del numero di giri

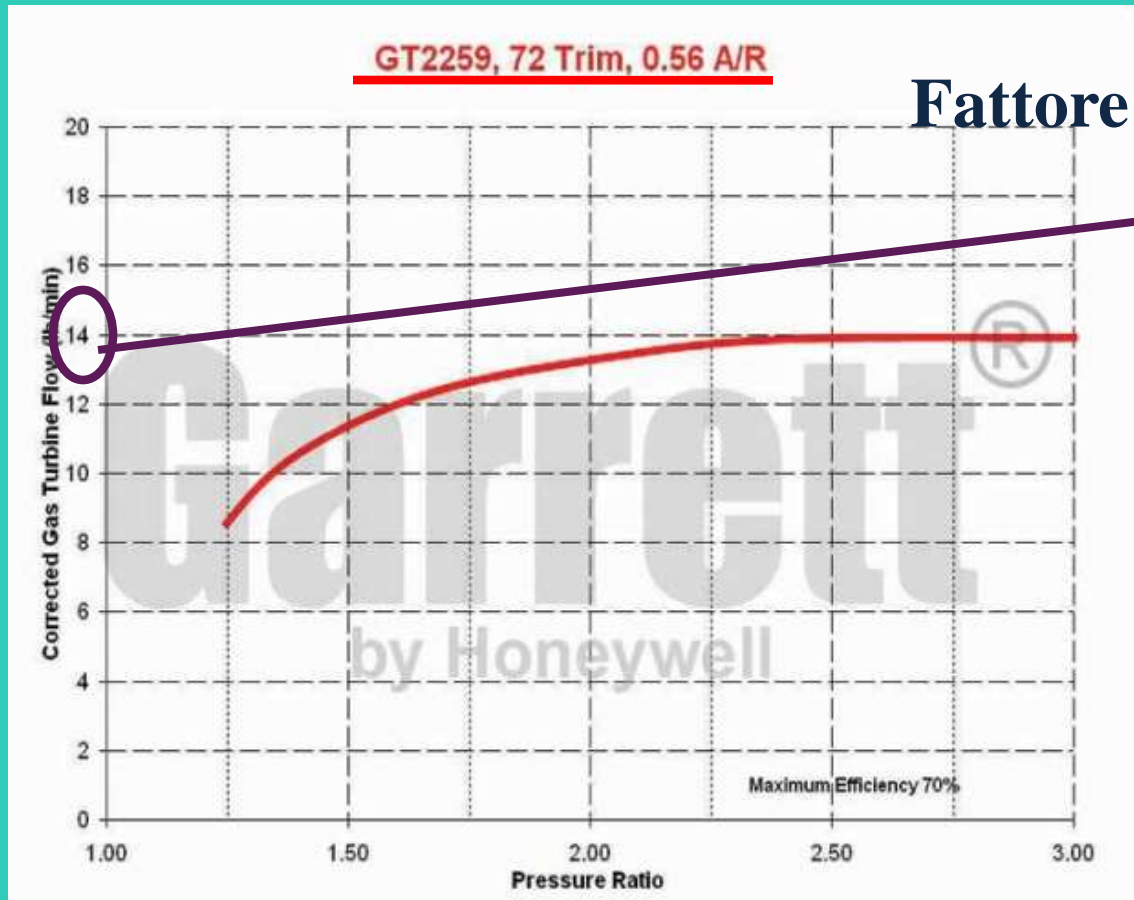
$$\varphi = \frac{N_{nom}}{N_{corretto}} \Rightarrow 165991 \text{ giri/min}$$

$$N_{effettivo} \Rightarrow N_{max} \cdot \varphi$$

93375
giri/min

Mappe caratteristiche

▪ TURBINA



Fattore di correzione di potenza

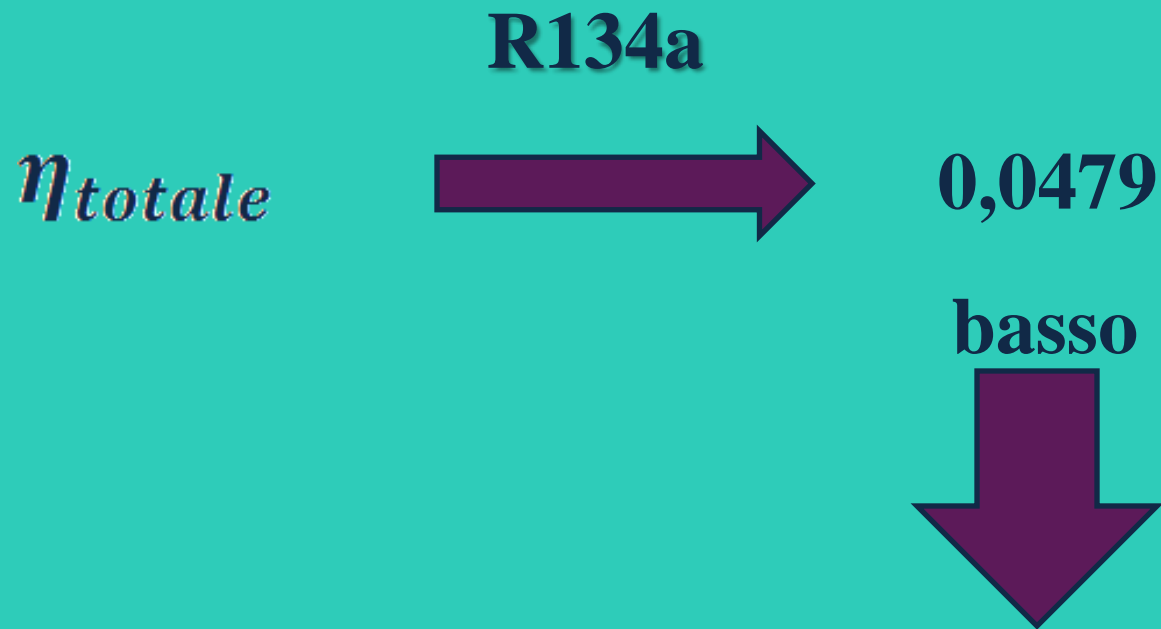
$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_{nom}}{N_{corretta}}$$

8,47 kW 10 kW

$$P_{effettiva} = \varepsilon \cdot P_{nom}$$

8,47 kW 10 kW

Rendimento totale



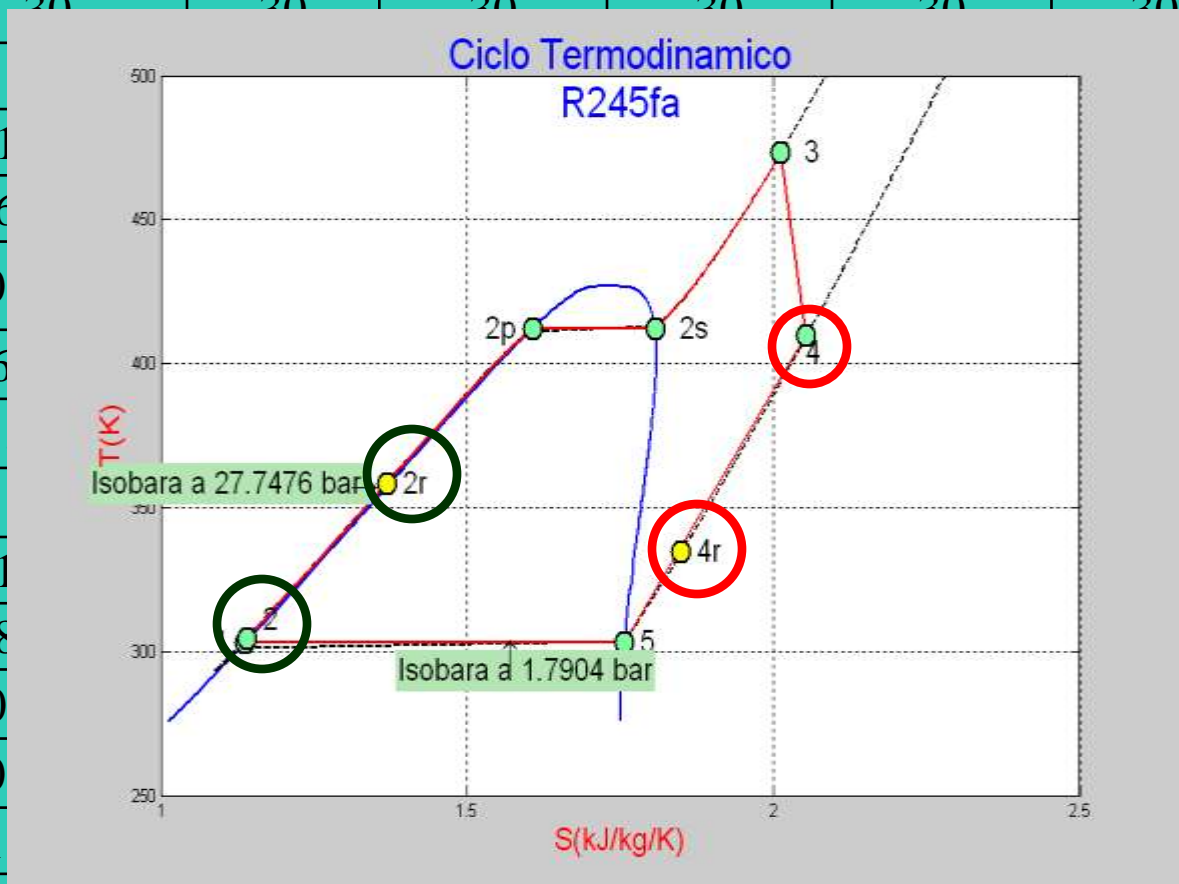
2) Minimizzare i costi del collettore

Cicli simulati senza rigenerazione

Fluido	Ammoniaca	R134a	R227ea	R236fa	R245fa	RC318	Propano
T_1 [C]	30	30	30	30	30	30	30
X_p	0,5	0,75	0,75	0,75	0,75	0,5	0,75
P_1 [bar]	11,67	7,70	5,29	3,21	1,79	3,66	10,79
P_3 [bar]	62,50	32,37	23,27	24,80	27,75	15,72	34,55
$\dot{m}_{corretta}$	0,0127	0,0489	0,0711	0,0526	0,0322	0,0909	0,0394
$N_{corretto}$	62320	165351	217172	185761	191802	236686	108370
β_{ore}	5,35	4,20	4,40	7,73	15,50	4,30	3,20
β_{aria}	7,3	11	15	87	13864	15	5,94
T_f [C]	173,6	161,5	160,1	164,0	175,3	162,1	161,4
\dot{Q}_{clio}	85,88	120,47	147,24	109,32	84,93	161,56	136,25
$\eta_{collettore}$	0,6811	0,6895	0,6904	0,6888	0,6799	0,6890	0,6895
$S_{collettore}$	193,99	268,81	328,11	244,54	192,19	360,73	304,01
η_{totale}	0,0793	0,0572	0,0469	0,0629	0,0800	0,0427	0,0522

Cicli simulati con rigenerazione

Fluido	Ammoniaca	R134a	R227ea	R245fa	R236fa	R245fa	RC318	Propano
T_1 [C]	30	30	30	30	30	30	30	30
X_p								0,75
P_1 [bar]	1	1	1	1	1	1	1	10,79
P_3 [bar]	6	6	6	6	6	6	6	34,55
$\dot{m}_{corretta}$	0	0	0	0	0	0	0	0,0394
$N_{corretta}$	6	6	6	6	6	6	6	108370
β_{orc}								3,20
β_{aria}								5,94
T_f [C]	1	1	1	1	1	1	1	185,1
\dot{Q}_{alia}	8	8	8	8	8	8	8	89,80
$\eta_{globale}$	0	0	0	0	0	0	0	0,1114
$\eta_{collettore}$	0	0	0	0	0	0	0	0,6726
$S_{collettore}$	1	1	1	1	1	1	1	205,39
η_{totale}	0,0815	0,0780	0,0752	0,0886	0,0886	0,1011	0,0809	0,0749



R245fa

R134a

Accoppiam



$\beta_{aria} = 10,6$
l'espansore

R227ea

$\beta_{aria} = 14,7$

RC318m

$N_{corretto}$

Progettazione di
espansore ad β_{g}

Espansori di piccola taglia in serie



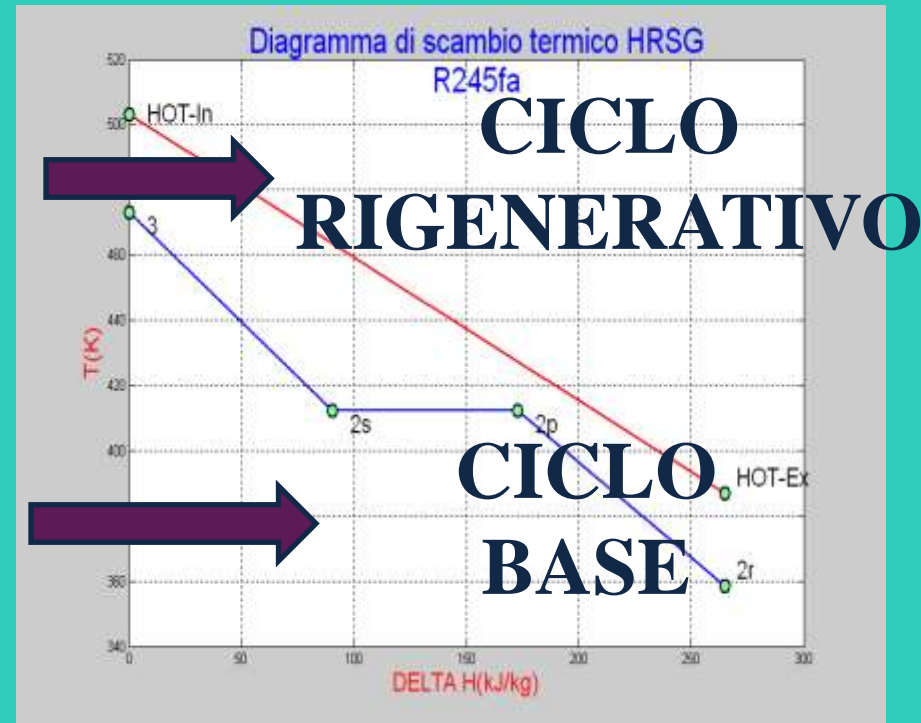
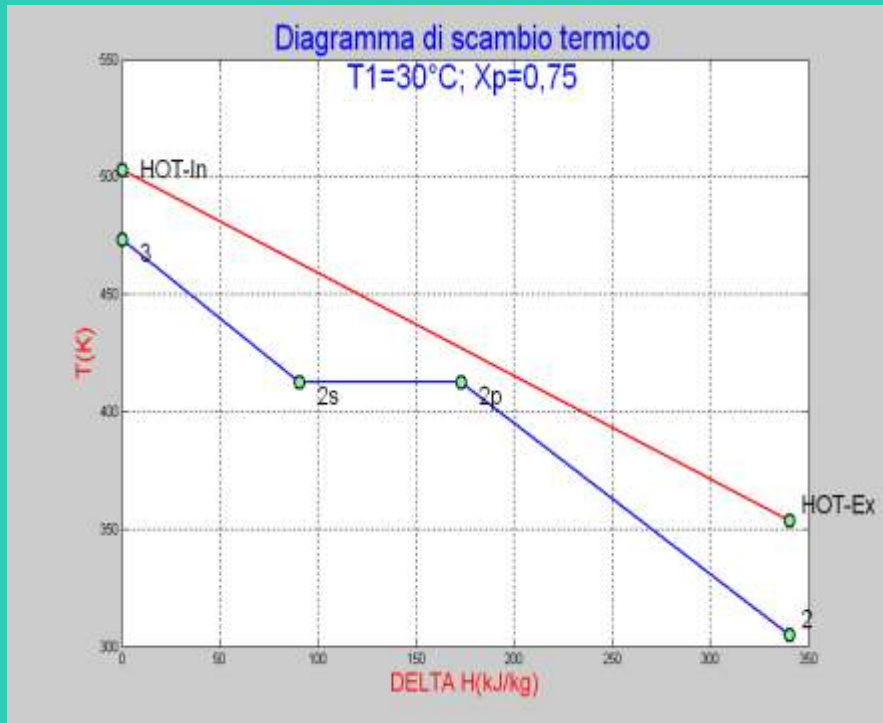
$\beta_{aria} = 14,7$

0,0322,7
191806
15,5
13865

Espansore scroll

Scambi termici

R245fa



$T_{olio_{out}}$ [C] 80,6413

$T_{olio_{out}}$ [C] 113,8834

Rendimento totale

$$\dot{Q}_{olio} = \dot{m}_{olio} \cdot c_{p_{olio}} \cdot (T_{olio_{in}} - T_{olio_{out}})$$

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

$\eta_{collettore}$	0,667438
η_{totale}	0,080028
$\eta_{collettore}$	0,679865
η_{totale}	0,101117

Tabelle riassuntive

Fluidi	Fluido	R245fa	R134a	R11	R123
T_1 [C]	T_1 [C]	30	30	30	30
X_p	X_p	0,75	0,25	0,75	0,5
P_1 [bar]	P_1 [bar]	1,7904	7,702	17,1333	3,6556
	P_3 [bar]		15,92	36,13	
	P_2 [bar]	27,7476		15,715	
$m_{corretta}$	$m_{corretta}$		0,124	0,0629	
$N_{corretto}$ [giri/min]	$N_{corretto}$ [giri/min]	0,0322	230247	0,0909	4845
	[kg/s]		165991		108274
β_{orc}	β_{aria}	191805	2807	23668	61145
β_{orc}		15,4979	985	4,2988	8839
β_{aria}	$\eta_{globale}$	13864,6	171,35	14,7448	38342
$T_{collettore}$ [C]	$T_{collettore}$ [C]	191,94	170,07	193,94	157,02
$Q_{collettore}$ [kW]	$Q_{collettore}$ [m ²]	66,028	0,683	82,33	0,672
$\eta_{globale}$		0,1515	320,93	0,1215	294,64
			0,048		0,052
$\eta_{collettore}$		0,6674	138	0,6658	75
$S_{collettore}$ [kW]	Tipo di turbina	GT2259	GT2554R	GT1548	GT2056
		152,1963		190,2183	
N_{totale} [giri/min]		8,47	9,07	9,54	11,93
		0,1011	117	0,0809	04
		93375	100885	166288	175481

Possibilità di cogenerazione

$T_{olio_{out}} > 100\text{ C}$

