



POLITECNICO
MILANO 1863

Lezione 08 - Cicli termodinamici a vapore

Corso di Fisica Tecnica
a.a. 2019-2020

Prof. Gaël R. Guédon
Dipartimento di Energia, Politecnico di Milano

Obiettivi della lezione

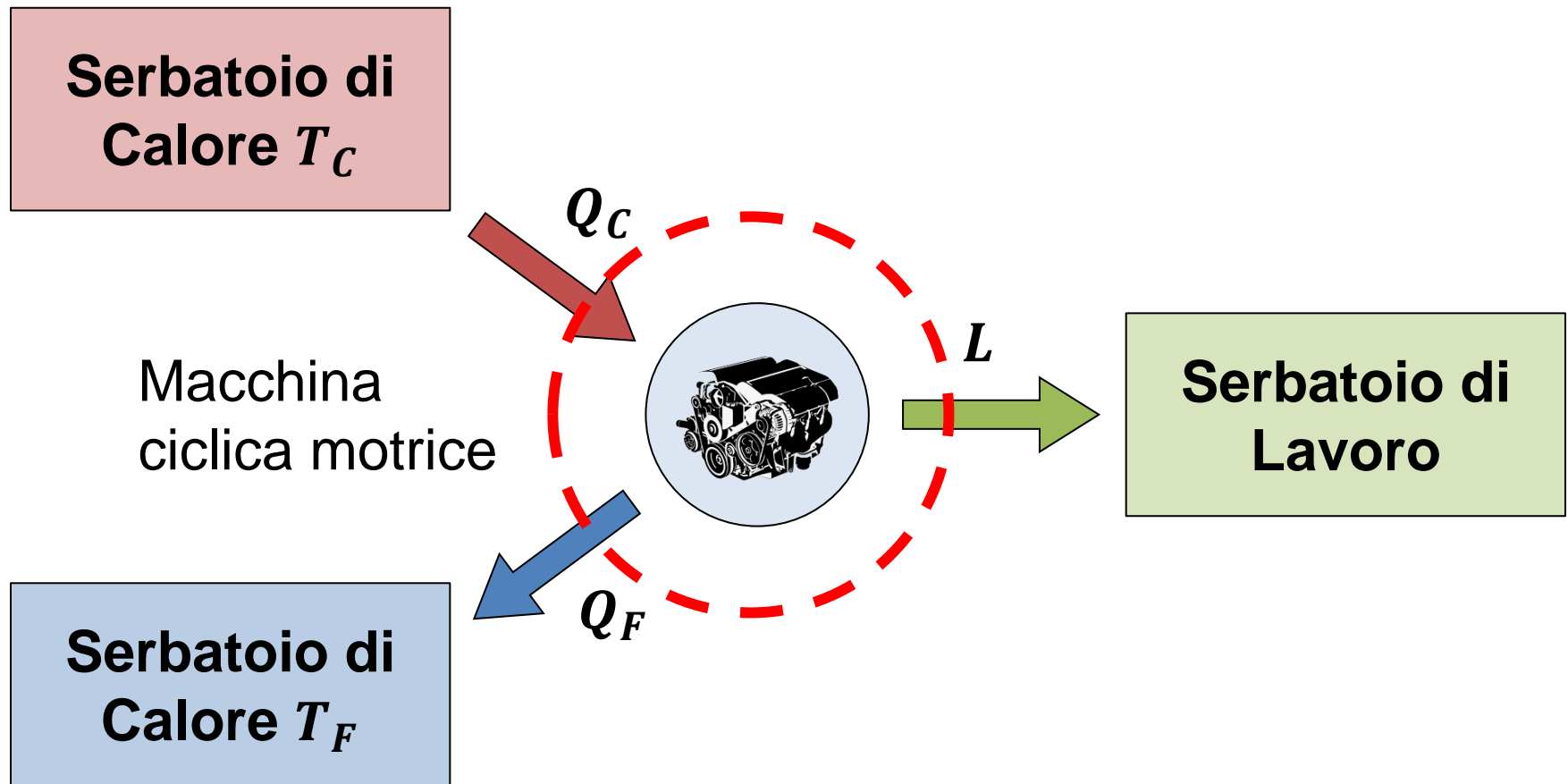
- Definire le caratteristiche di un **buon fluido di lavoro**
- Analizzare il **ciclo Rankine**
- Analizzare il **ciclo frigorifero a vapore**

I cicli termodinamici a vapore

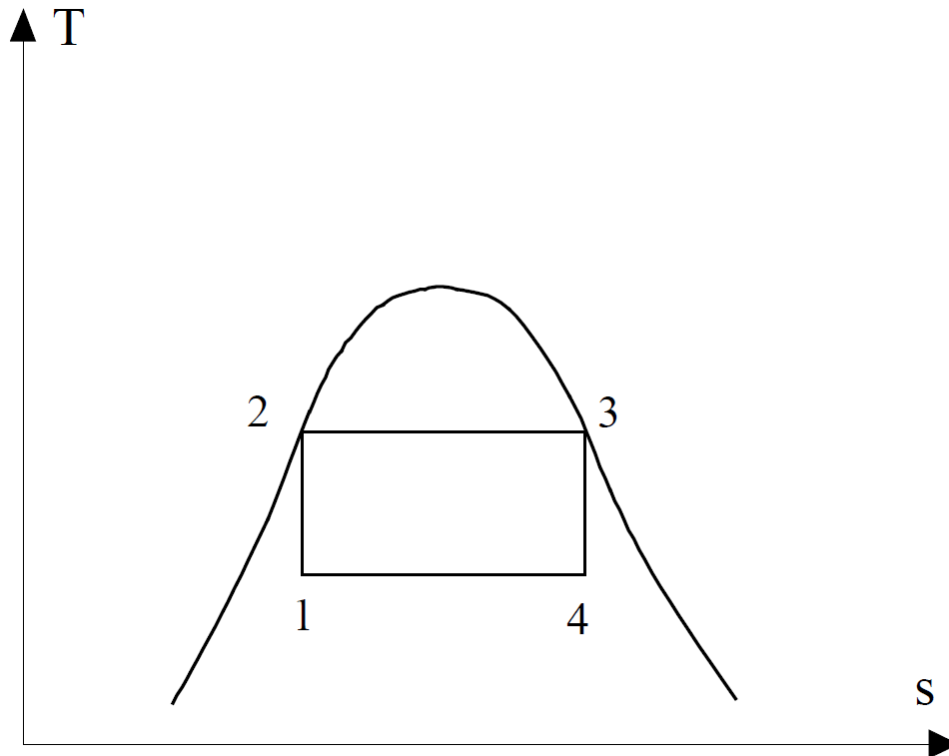
Ciclo di Carnot

Ciclo Rankine

Ciclo frigorifero a vapore



Ciclo di Carnot a vapore



Vantaggi:

- trasformazione isobara nel bifase è anche isoterma (riduzione irreversibilità)
- transizione di fase aumenta notevolmente la quantità di energia specifica scambiata lungo le isoterme (compattezza impianto)

Svantaggi:

- compressione (1-2) di un bifase è difficile da realizzare e soggetto a molte irreversibilità
- espansione (3-4) conveniente se $x_4 > 0.9$

Caratteristiche fluido di lavoro in cicli a vapore

- Elevata **massa volumica**
 - Elevata **entalpia di transizione di fase**
- } **Ridurre**, a parità di potenza, la **portata di fluido** e quindi le **dimensioni** (e **costo**) dell'impianto
- Elevata **temperatura critica** → Al punto critico l'entalpia di evaporazione è **nulla**
 - Temperatura del **punto triplo** inferiore alla temperatura minima del ciclo → **Evitare** la presenza di una **fase solida**
 - Fluido **non corrosivo** → **Ridurre costi** materiali e allungare ciclo di vita
 - Fluido **non tossico** → **Ridurre rischi** ambientali

Caratteristiche fluido di lavoro in cicli a vapore

- Fluido **chimicamente stabile** → Aumentare **sicurezza** impianto
- Facilmente **reperibile** e di **basso costo**
- **Elevata pendenza** nel piano $T - s$ della curva limite superiore → Vapore in **uscita turbina** con elevato titolo
- **Pressione di condensazione** superiore alla pressione atmosferica → **Evitare infiltrazioni di gas incondensabili** e conseguente necessità di apparecchiature atte al mantenimento dell'opportuno grado di vuoto (la temperatura al condensatore deve essere vicina a quella del serbatoi di calore inferiore per avere una limitazione delle irreversibilità)

Caratteristiche fluido di lavoro in cicli a vapore

Nessun fluido possiede tutte le proprietà citate.

- **Ciclo motore:** l'acqua possiede le principali proprietà
 - **Ciclo inverso (frigorifero):** funzione delle temperatura delle sorgenti
 - Ammoniaca NH_3 → Tossico
 - Clorofluorocarburi (CFC o freon) → Dannosi per l'ozono (R11, R12)
 - Clorofluoroidrocarburi (HCFC)
 - Fluoroidrocarburi (HFC)
- } Meno dannosi per l'ozono, conosciuti principalmente dal loro nome commerciale (R22, R123, **R134a**, etc.)

| Caratteristica | Acqua | r134a |
|--|---|---|
| Elevata massa volumica | $\rho_l = \sim 1000 \text{ kg/m}^3$ | $\rho_l = \sim 1300 \text{ kg/m}^3$ |
| Elevata entalpia di transizione di fase | $\rho_v = \sim 0.6 \text{ kg/m}^3$ $h_{lvt} = \sim 2500 \text{ kJ/kg}$ | $\rho_v = \sim 14 \text{ kg/m}^3$ $h_{lvt} = \sim 200 \text{ kJ/kg}$ |
| Elevata temperatura critica | $T_{cr} = 373.946 \text{ }^\circ\text{C}$ | $T_{cr} = 101.06 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| Temperatura del punto triplo inferiore alla temperatura minima del ciclo | $T_{triplo} = 0.01 \text{ }^\circ\text{C}$ | $T_{triplo} = -103.30 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| Fluido non corrosivo | OK | OK |
| Fluido non tossico | OK | Asfissiante |
| Fluido chimicamente stabile | SI | Non infiammabile in condizioni normali |
| Facilmente reperibile e di basso costo | SI | Prodotto sintetico |
| Elevata pendenza nel piano $T - s$ della curva limite superiore | NO | SI |
| Pressione di condensazione superiore alla pressione atmosferica | NO | SI |

Diagramma $T - s$ dell'acqua

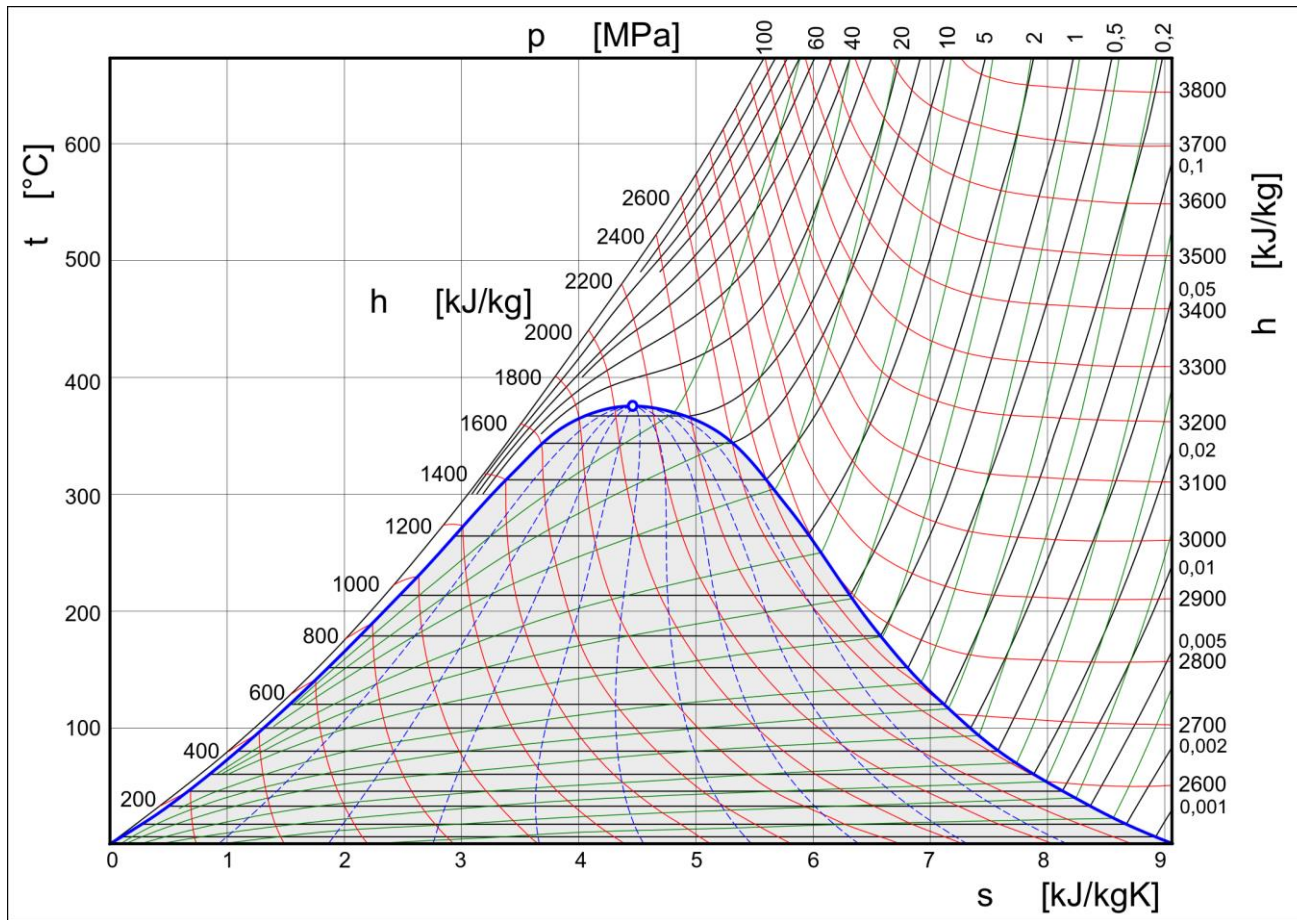
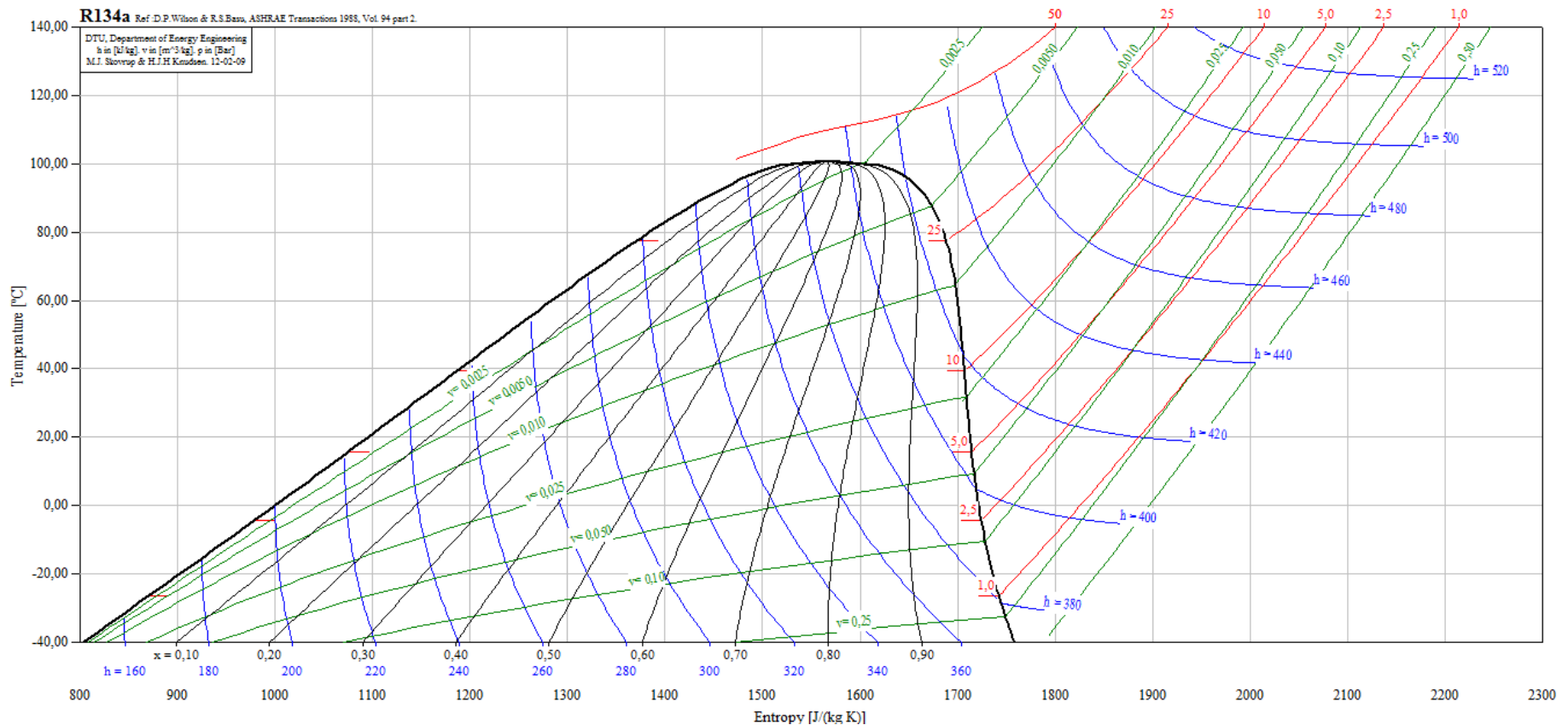
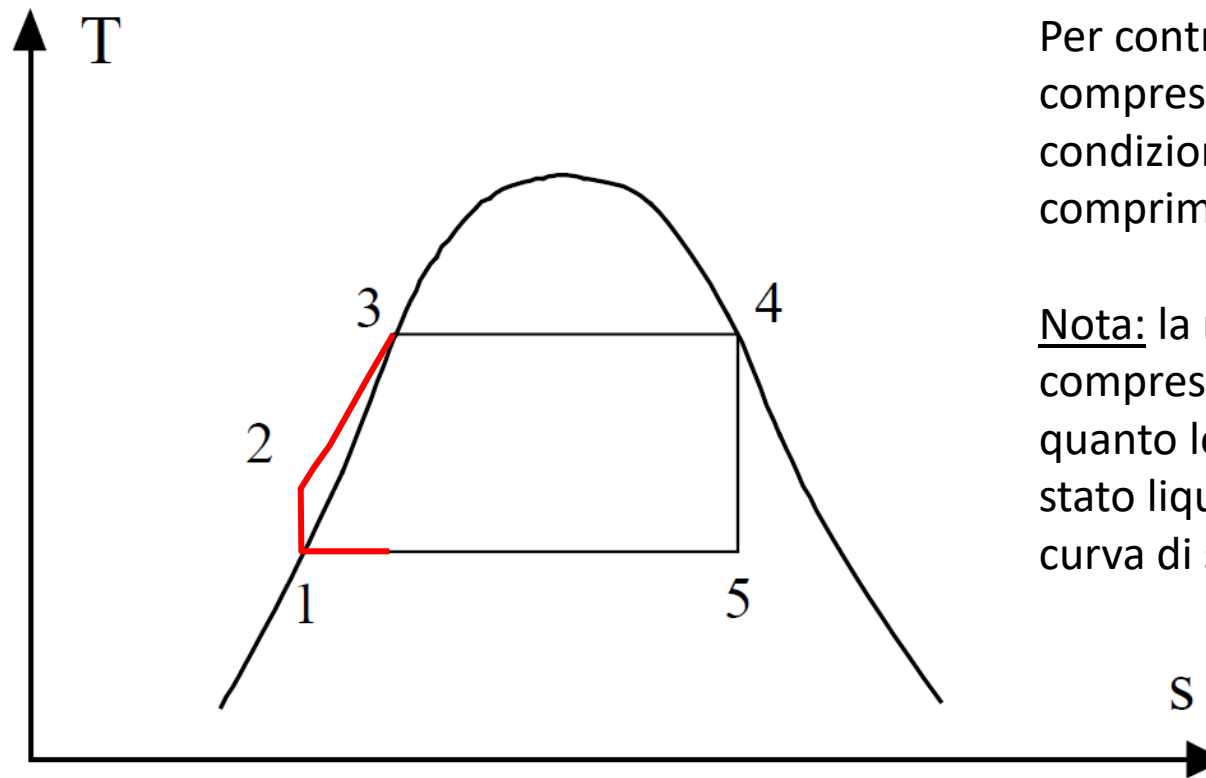


Diagramma $T - s$ del fluido organico r134a



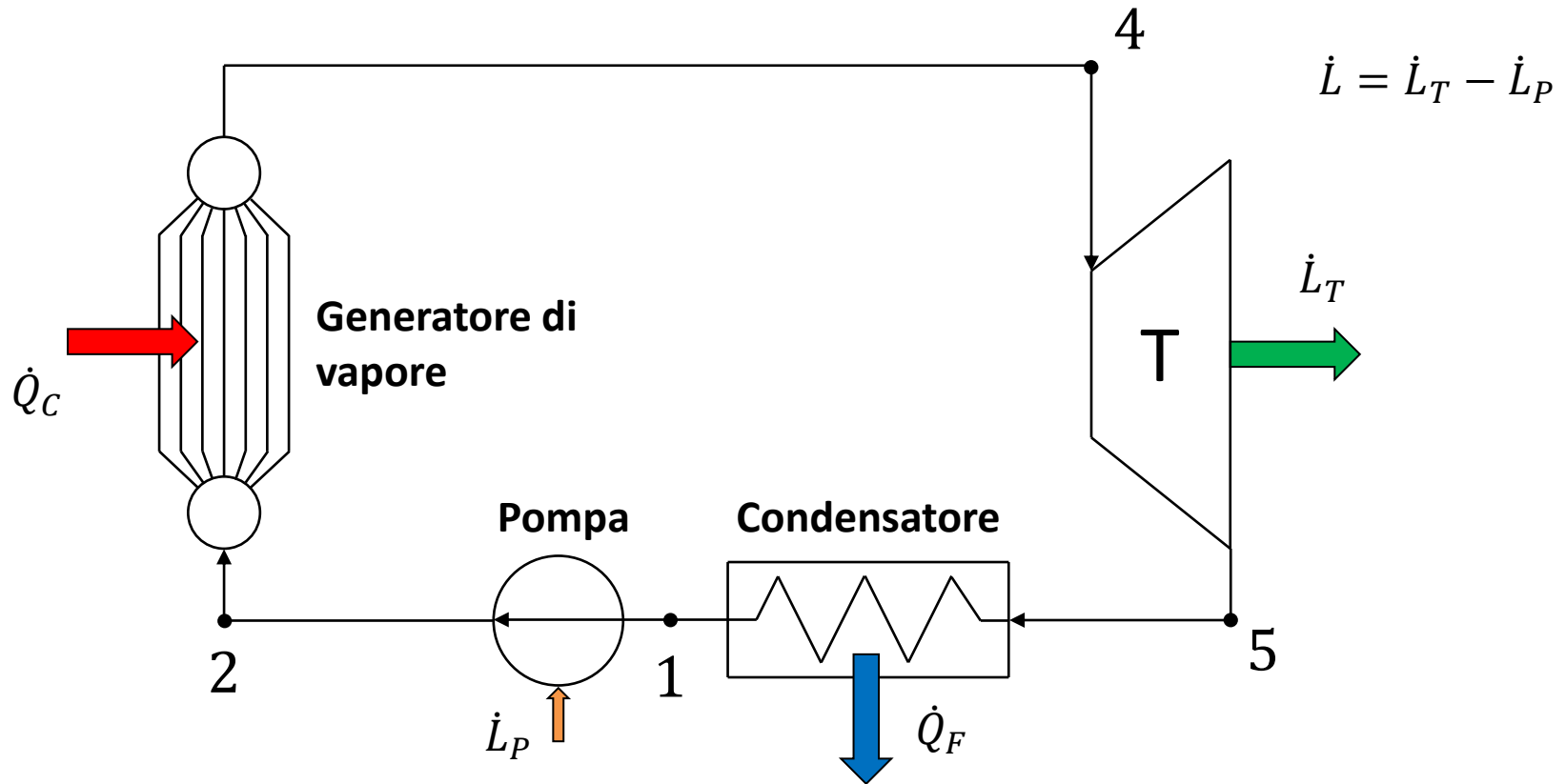
Ciclo Rankine semplice (a vapore saturo)



Per contrastare il problema della compressione, si porta il fluido in condizioni di liquido saturo e si comprime tramite una **pompa** (1-2)

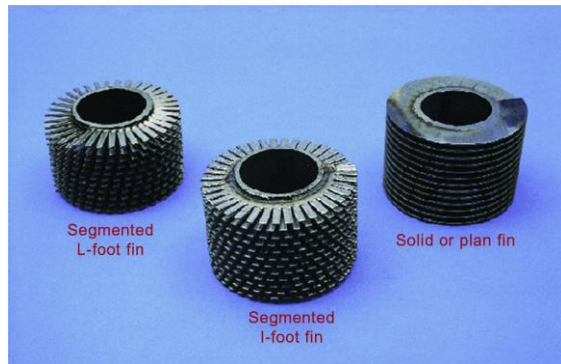
Nota: la rappresentazione della compressione 1-2 non è fedele in quanto le isobare, nella zona dello stato liquido, sono molto vicine alla curva di saturazione

Ciclo Rankine semplice (a vapore saturo)

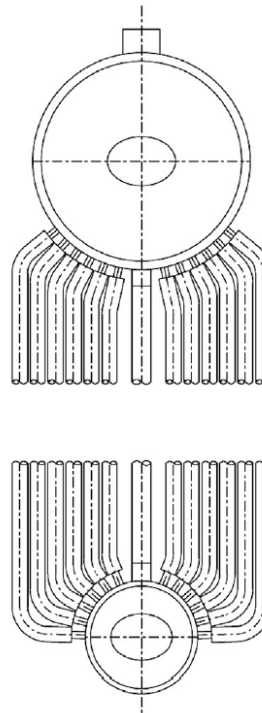


Generatore di vapore

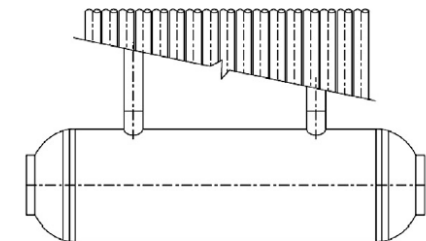
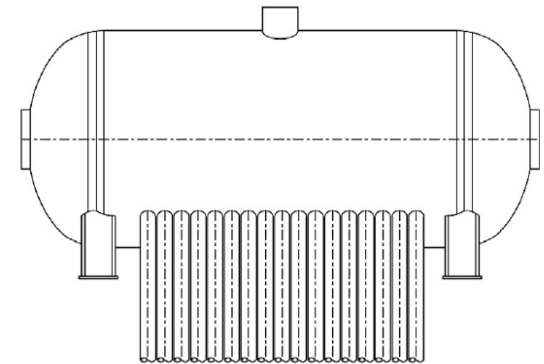
Fascio tubiero alettato



Source: Nooter Eriksen Inc.



Corpo cilindrico superiore



Corpo cilindrico inferiore

Generatore di vapore



Source: Nooter Eriksen Inc.

Generatore di vapore



Source: Nooter Eriksen Inc.

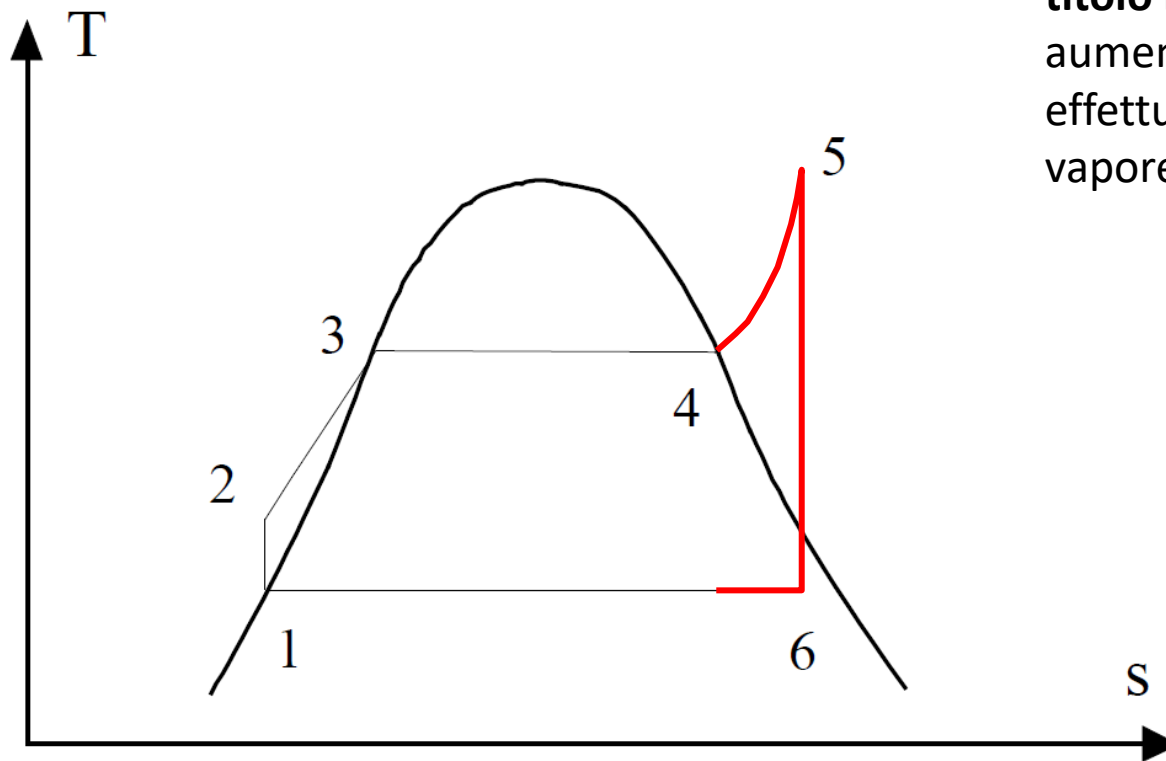


Generatore di vapore



Source: Nooter Eriksen Inc.

Ciclo Rankine

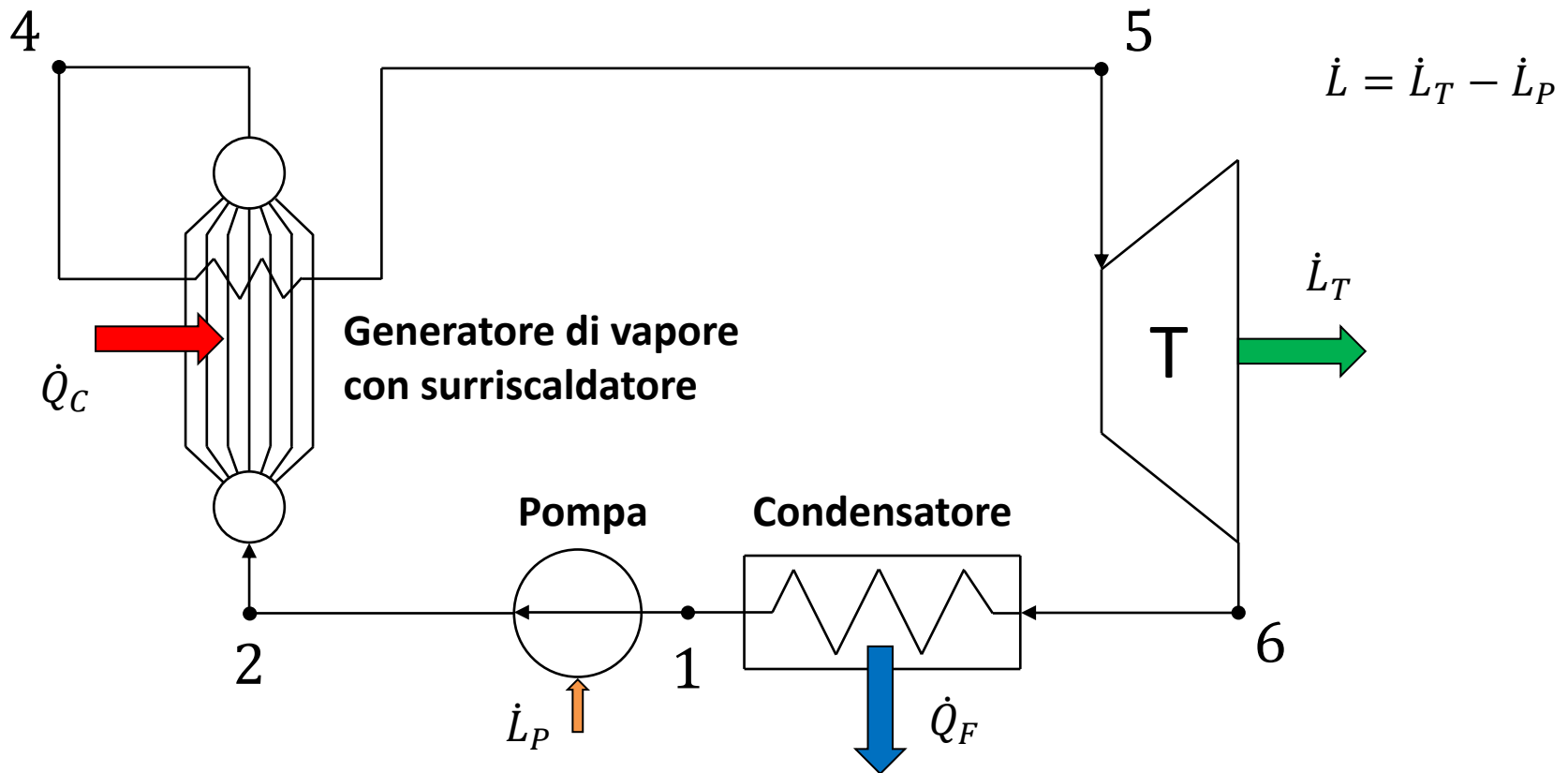


Per contrastare il problema del **titolo in uscita turbina**, ed aumentare il rendimento, si effettua il **surriscaldamento** del vapore (4-5)

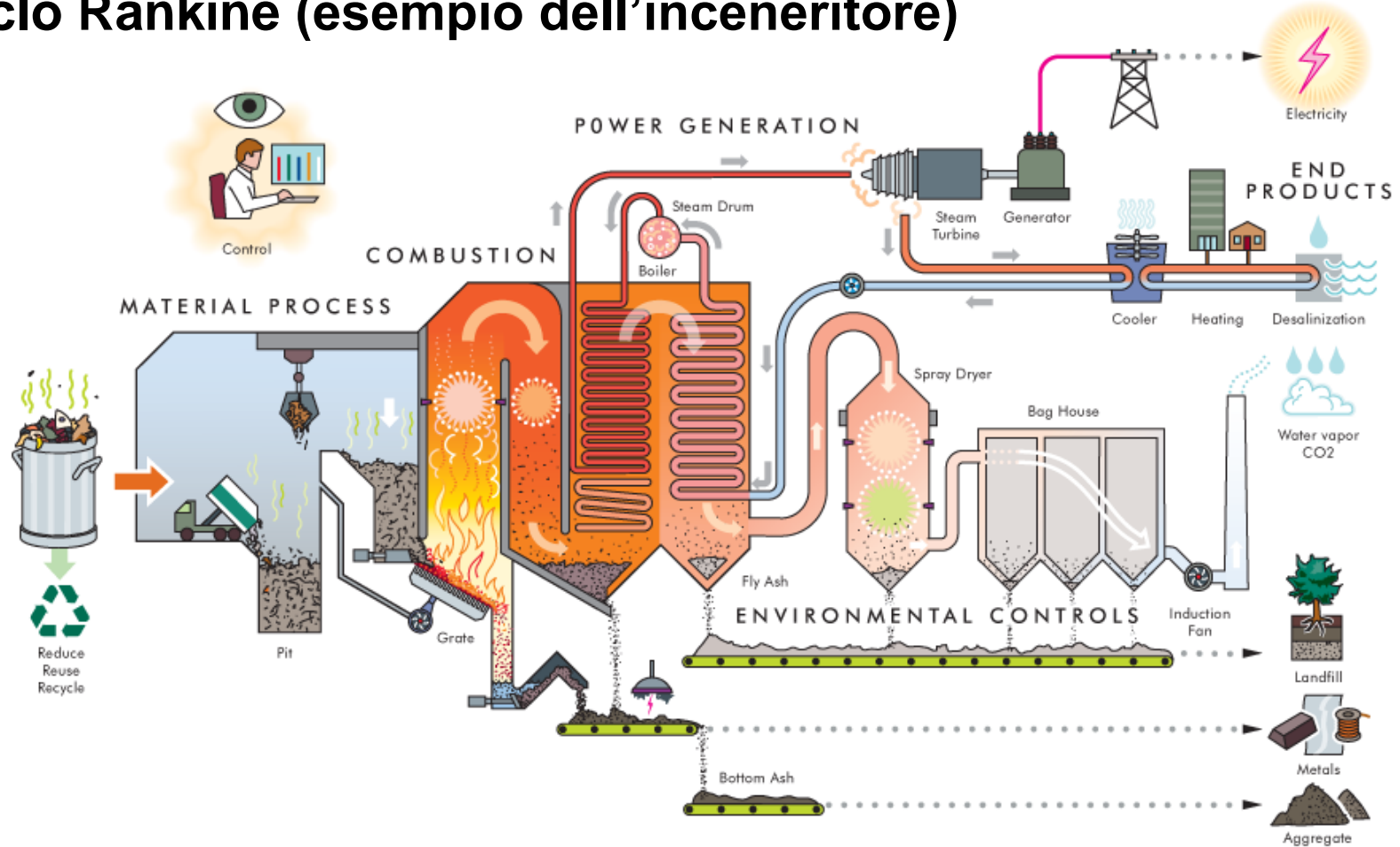
$$\eta = 1 - \frac{\dot{Q}_F}{\dot{Q}_C}$$

$$\eta = 1 - \frac{h_6 - h_1}{h_5 - h_2}$$

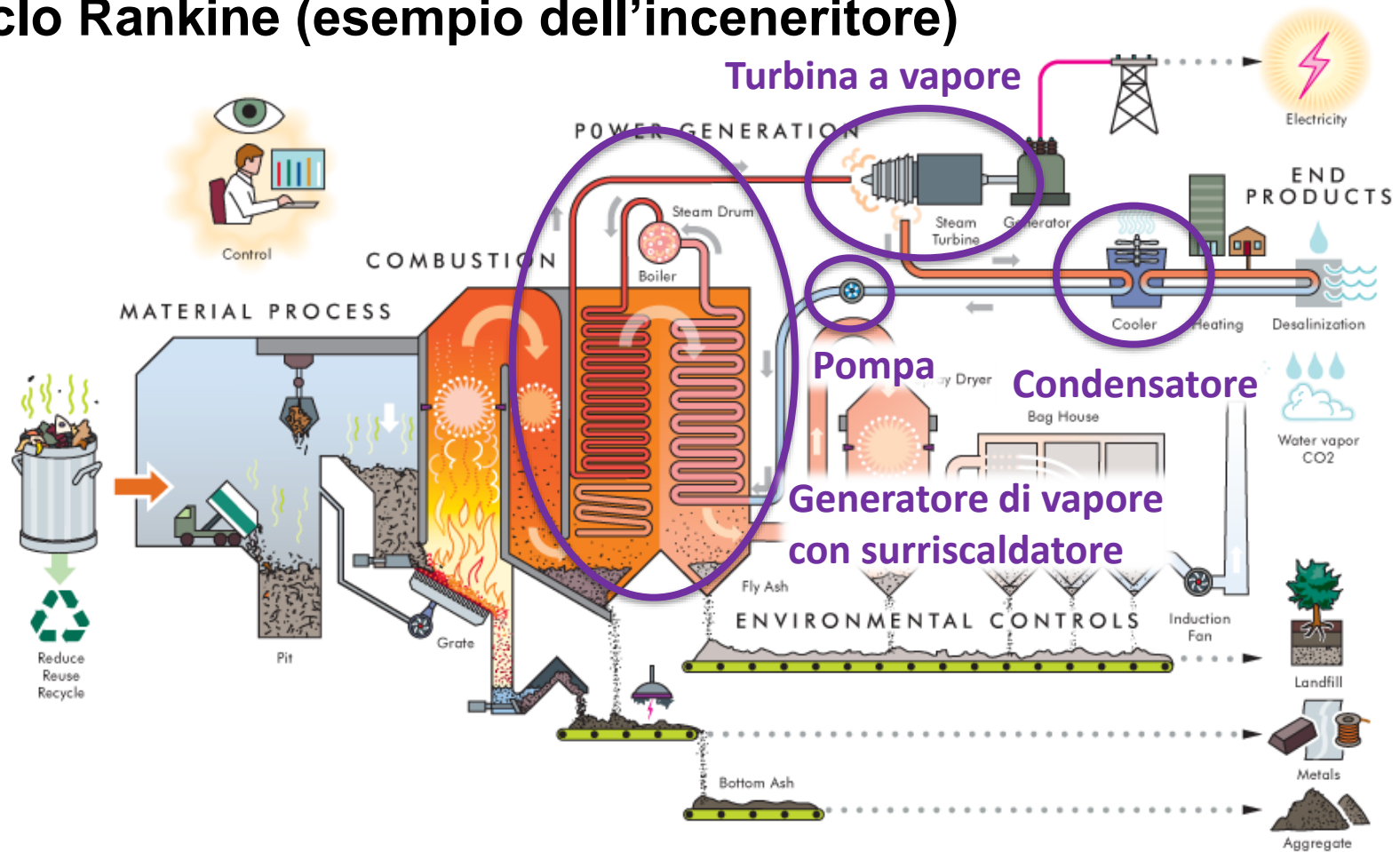
Ciclo Rankine



Ciclo Rankine (esempio dell'inceneritore)



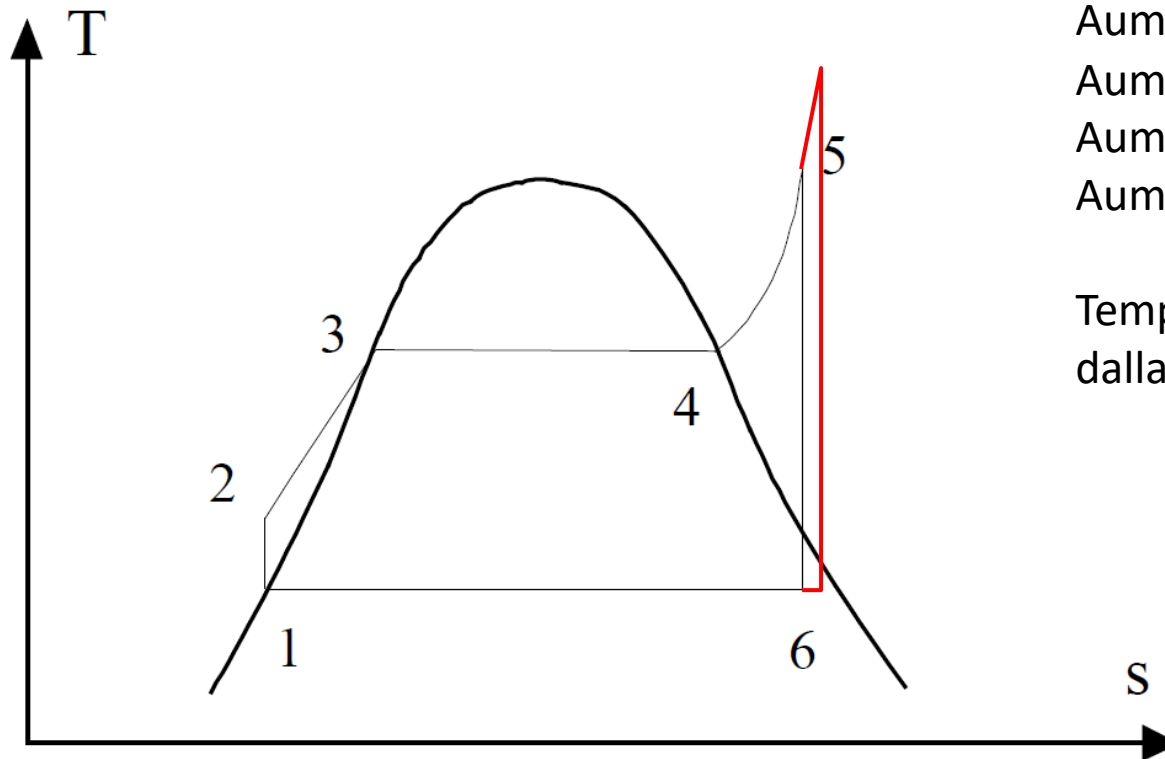
Ciclo Rankine (esempio dell'inceneritore)



Soluzioni per migliorare il rendimento del ciclo Rankine

- **Riduzione della pressione di condensazione**
- **Aumento della temperatura finale di surriscaldamento**
- **Aumento della pressione di vaporizzazione**
- **Surriscaldamenti ripetuti**
- **Rigenerazione**

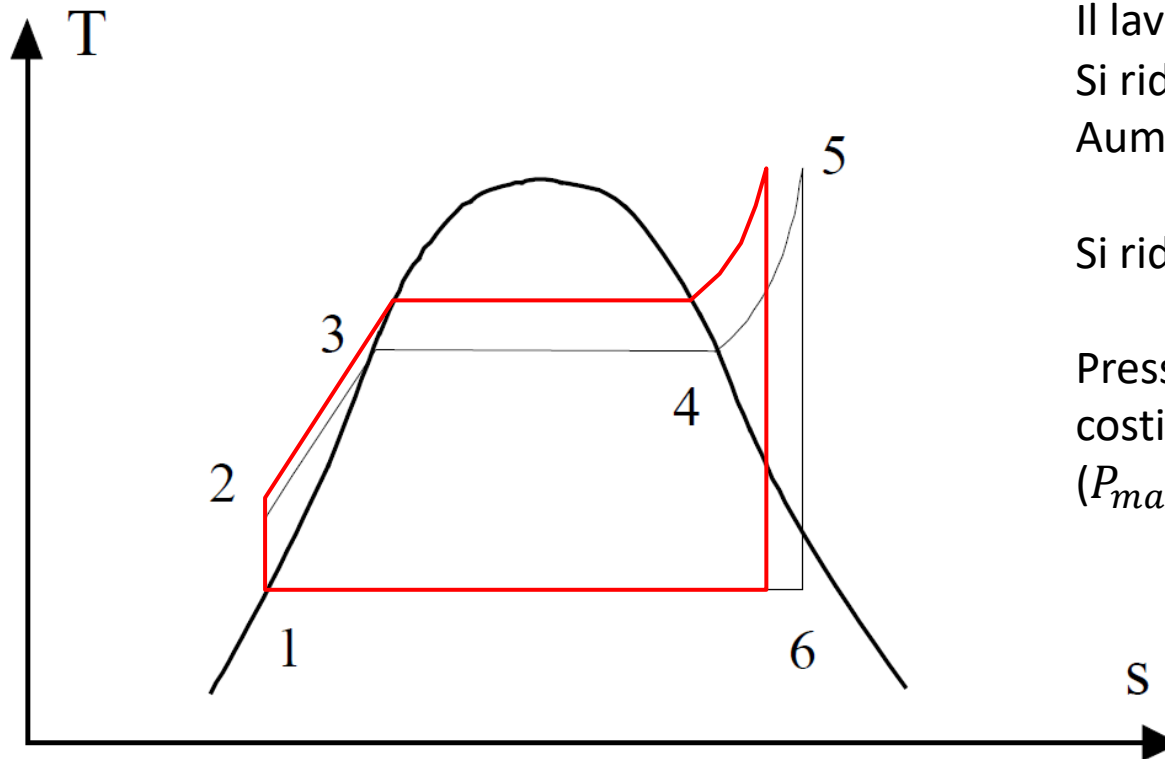
Aumento della temperatura finale di surriscaldamento



Aumenta il lavoro prodotto
Aumenta il calore fornito \dot{Q}_C
Aumenta il rendimento
Aumenta il titolo in uscita turbina

Temperatura massima limitata
dalla tecnologia ($T_{max} \approx 650\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Aumento della pressione di vaporizzazione

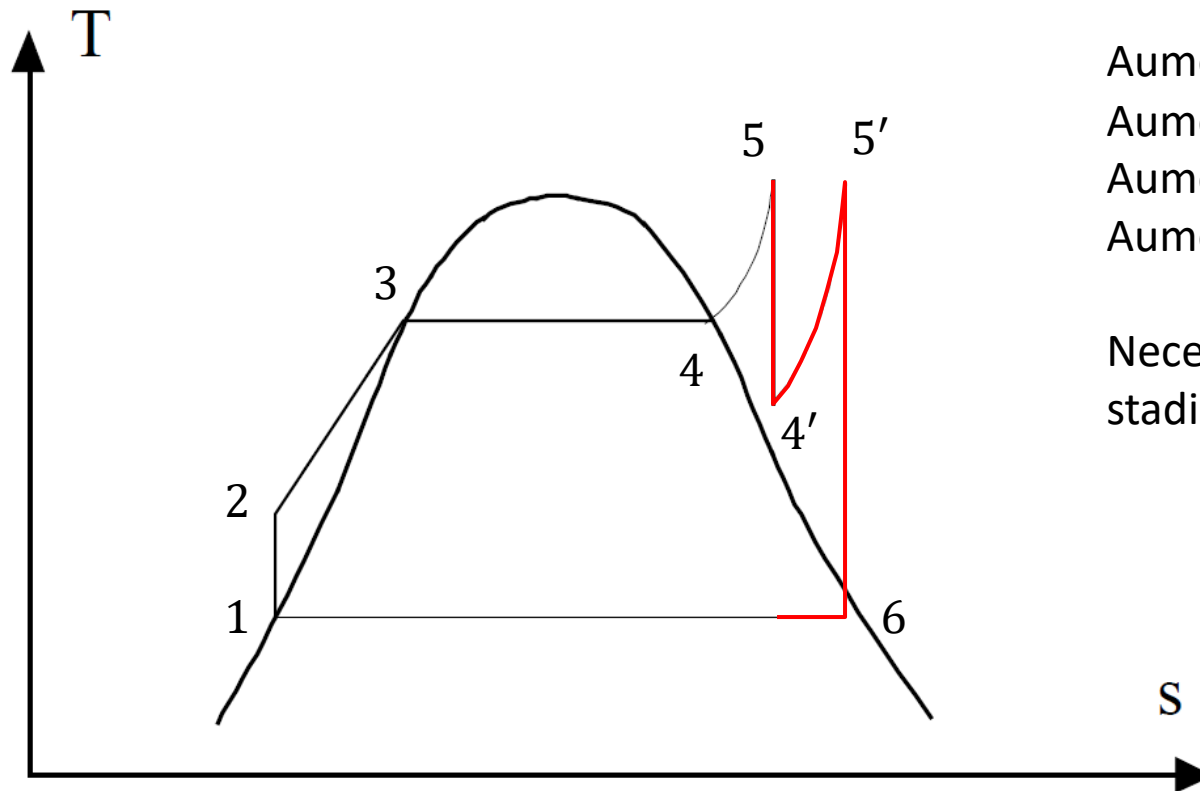


Il lavoro prodotto rimane simile
Si riduce il calore fornito \dot{Q}_C
Aumenta il rendimento

Si riduce il titolo in uscita turbina

Pressione massima limitata dai
costi e dal punto critico
($P_{max} \approx 200 \text{ bar}$)

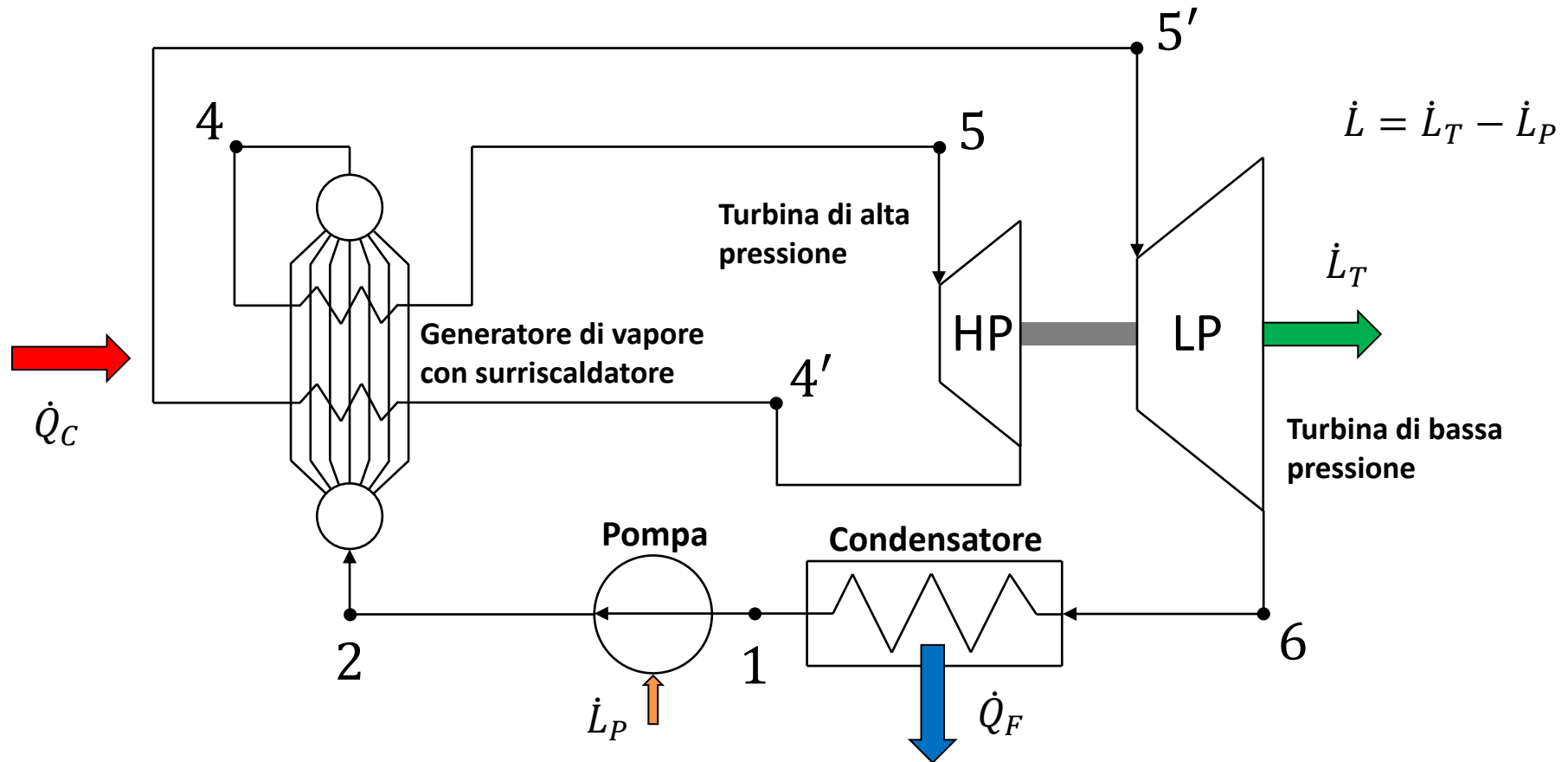
Surriscaldamenti ripetuti (detto anche ciclo Rankine con risurriscaldamento)

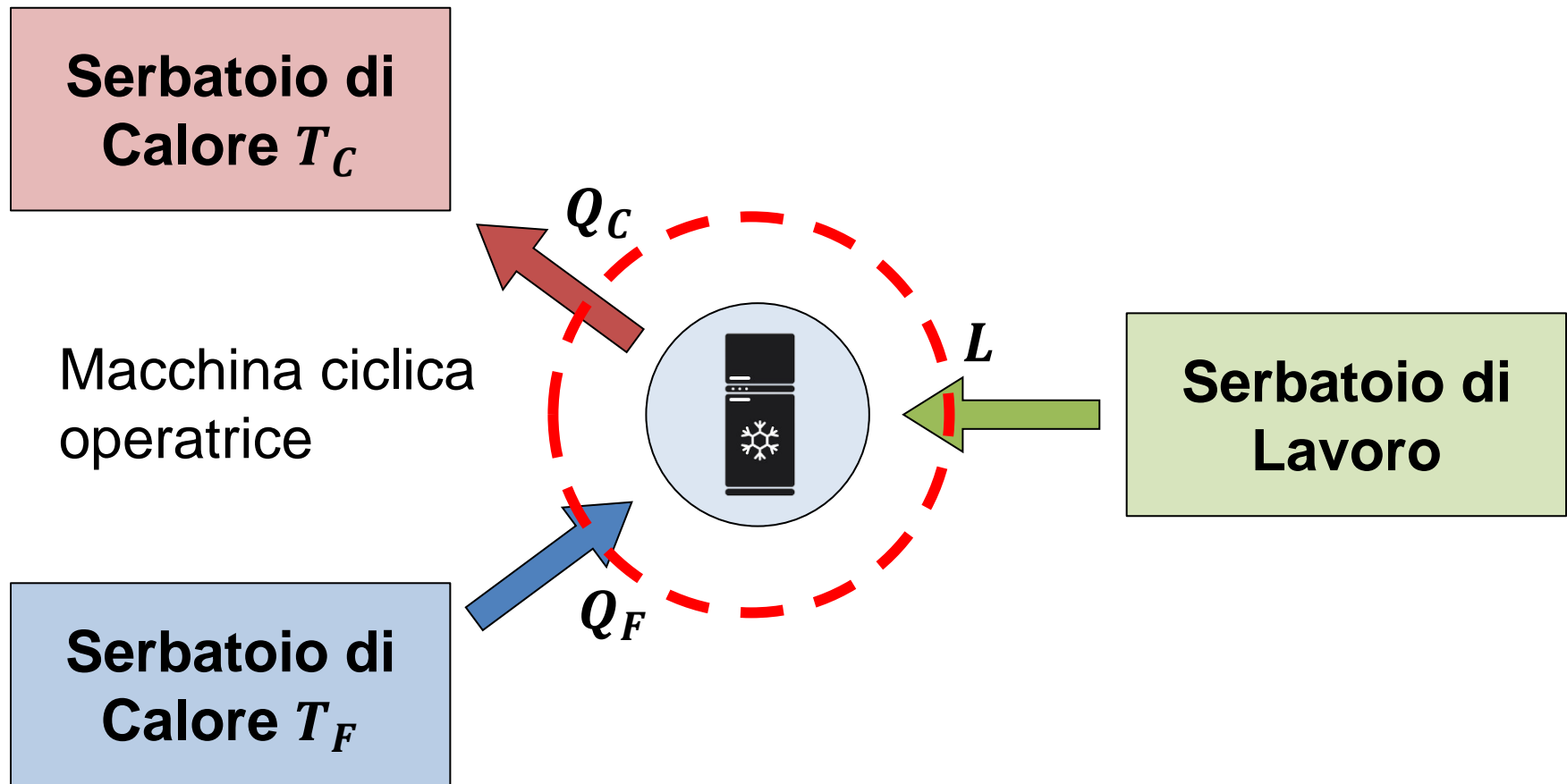


Aumenta il lavoro prodotto
Aumenta il calore fornito \dot{Q}_C
Aumenta il rendimento
Aumenta il titolo in uscita turbina

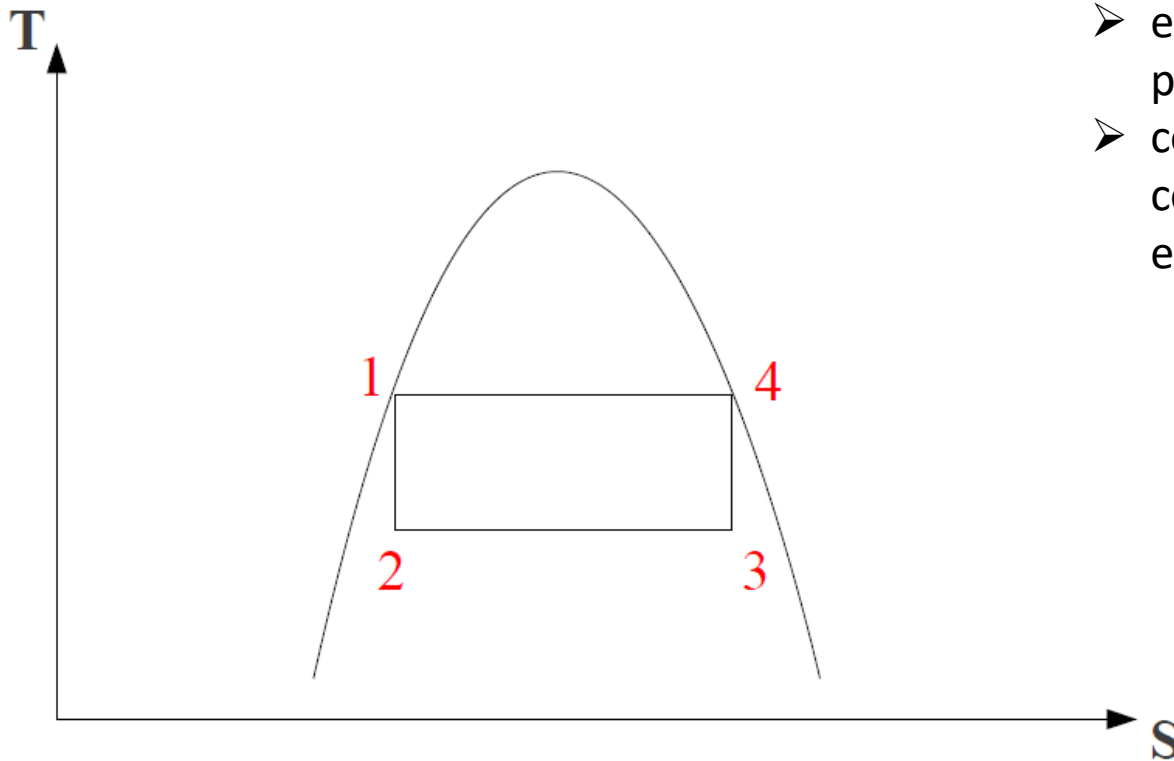
Necessità di una turbina a più stadi

Surriscaldamenti ripetuti



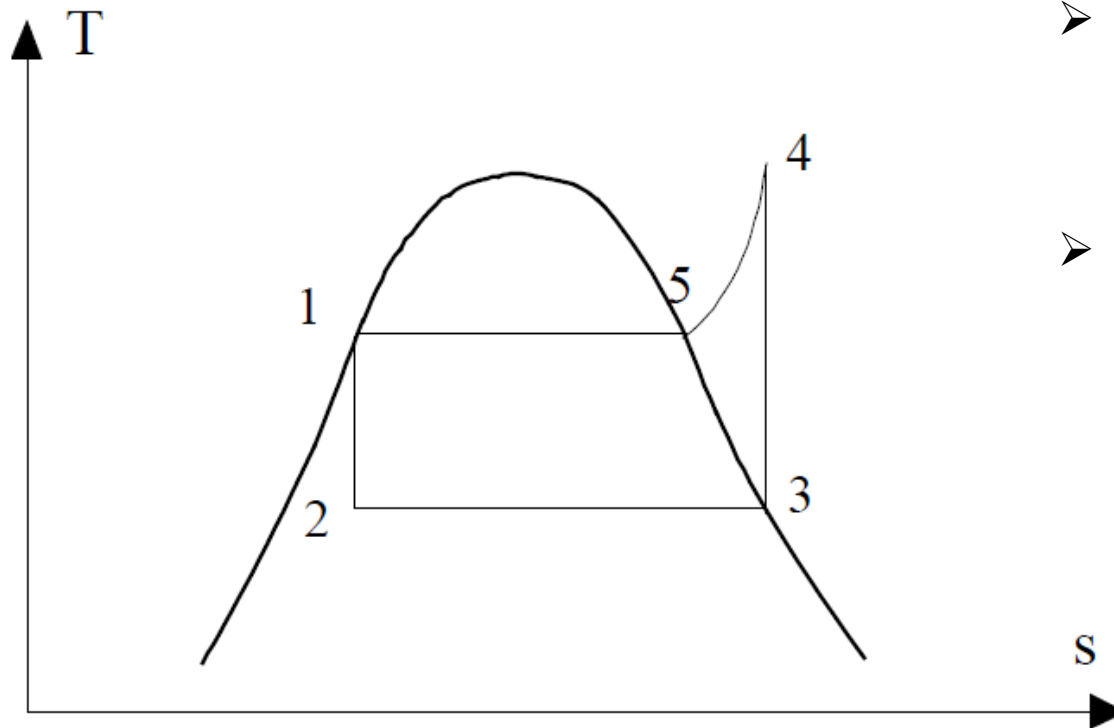


Ciclo di Carnot inverso a vapore



- espansione (1-2) non è problematica
- compressione (3-4) può condurre ad un'elevata erosione del compressore

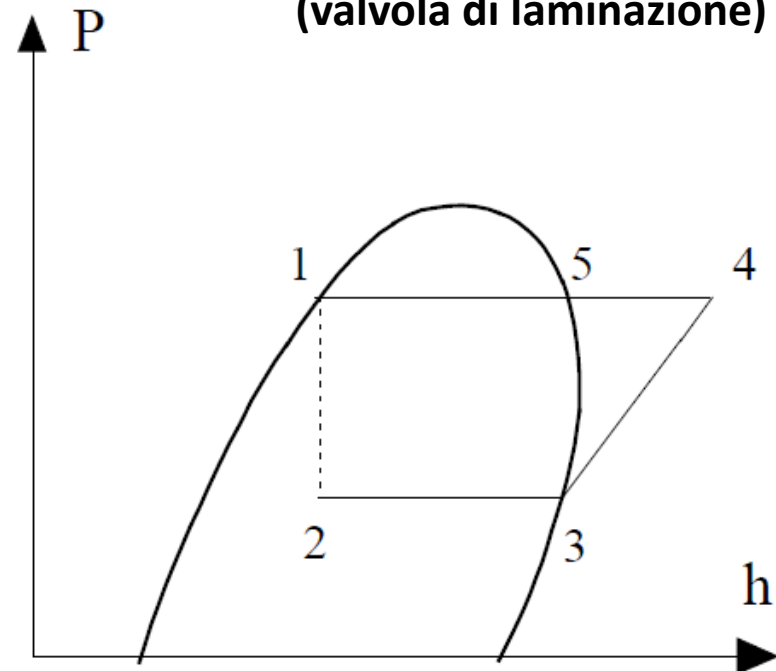
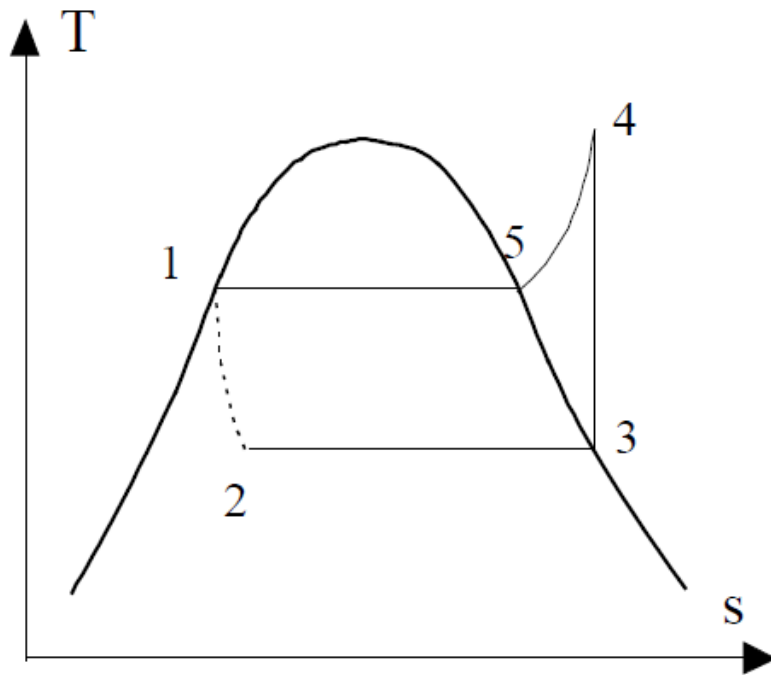
Ciclo frigorifero a vapore **teorico**

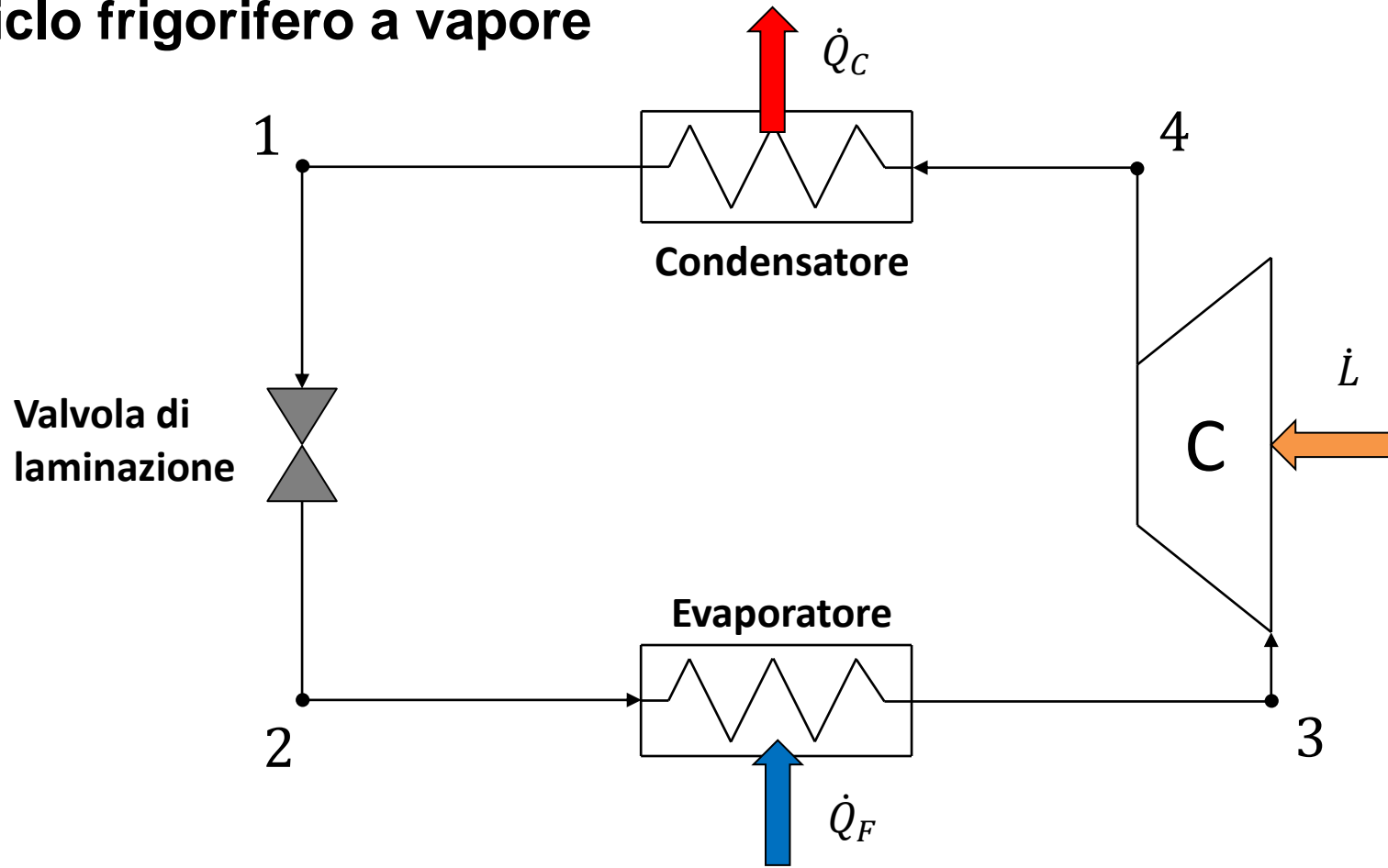


- compressione (3-4) di un vapore saturo/surriscaldato preferibile
- espansione (1-2) con una turbina non è conveniente (lavoro prodotto trascurabile) e difficile da realizzare

Ciclo frigorifero a vapore

- espansione (1-2) isoentropica
sostituita da un'espansione
adiabatica isoentalpica
(valvola di laminazione)



Ciclo frigorifero a vapore

Ciclo frigorifero a vapore

