



**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

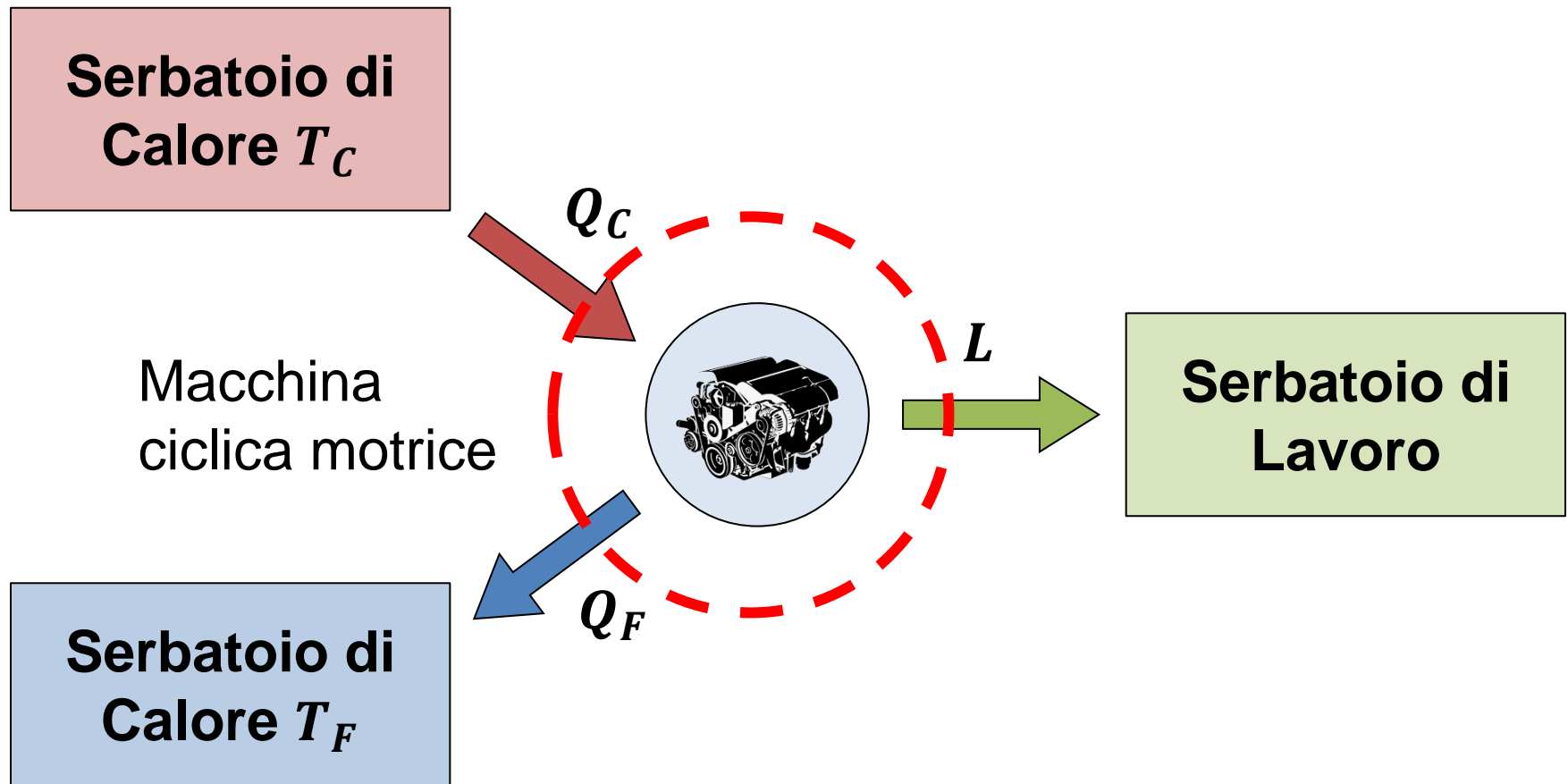
- Definire le caratteristiche di un **buon fluido di lavoro**
- Analizzare il **ciclo Rankine**
- Analizzare il **ciclo frigorifero a vapore**

## I cicli termodinamici a vapore

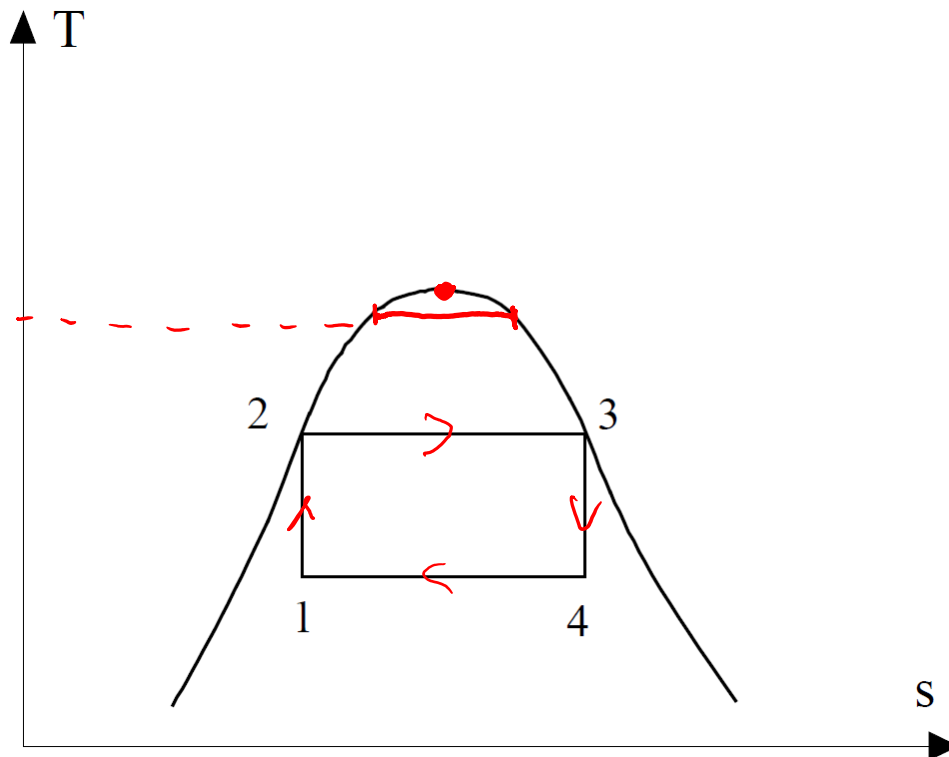
**Ciclo di Carnot**

**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  $\text{NH}_3$  → 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

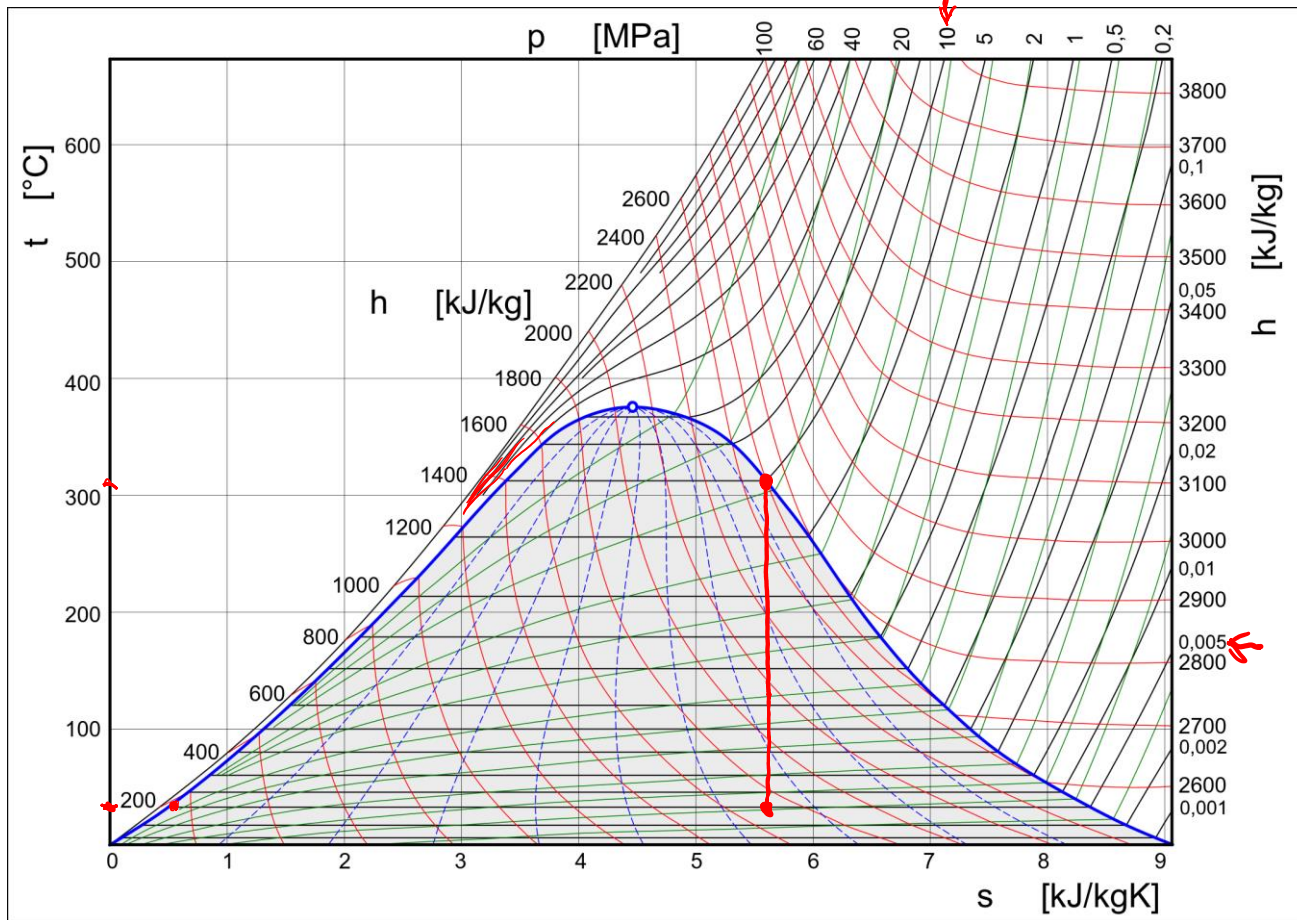
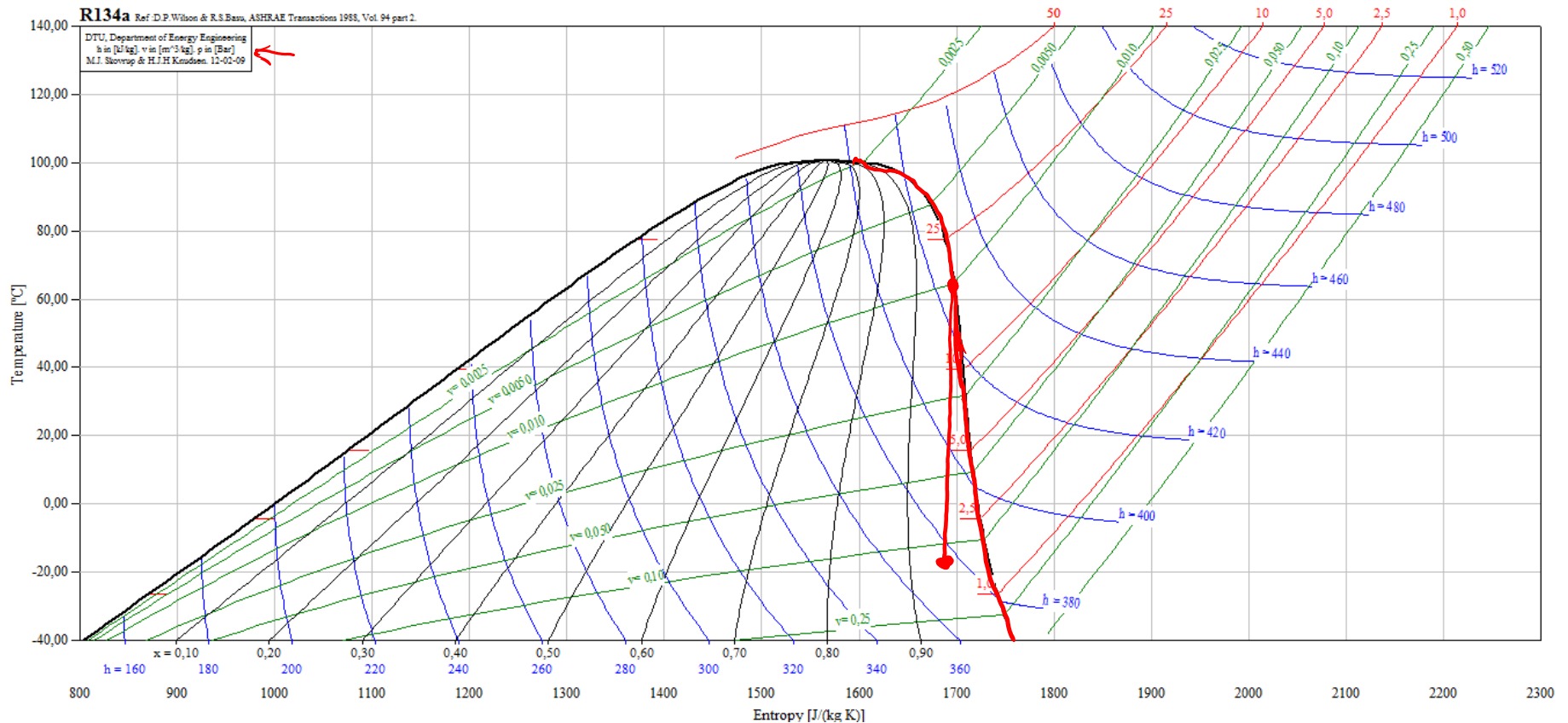
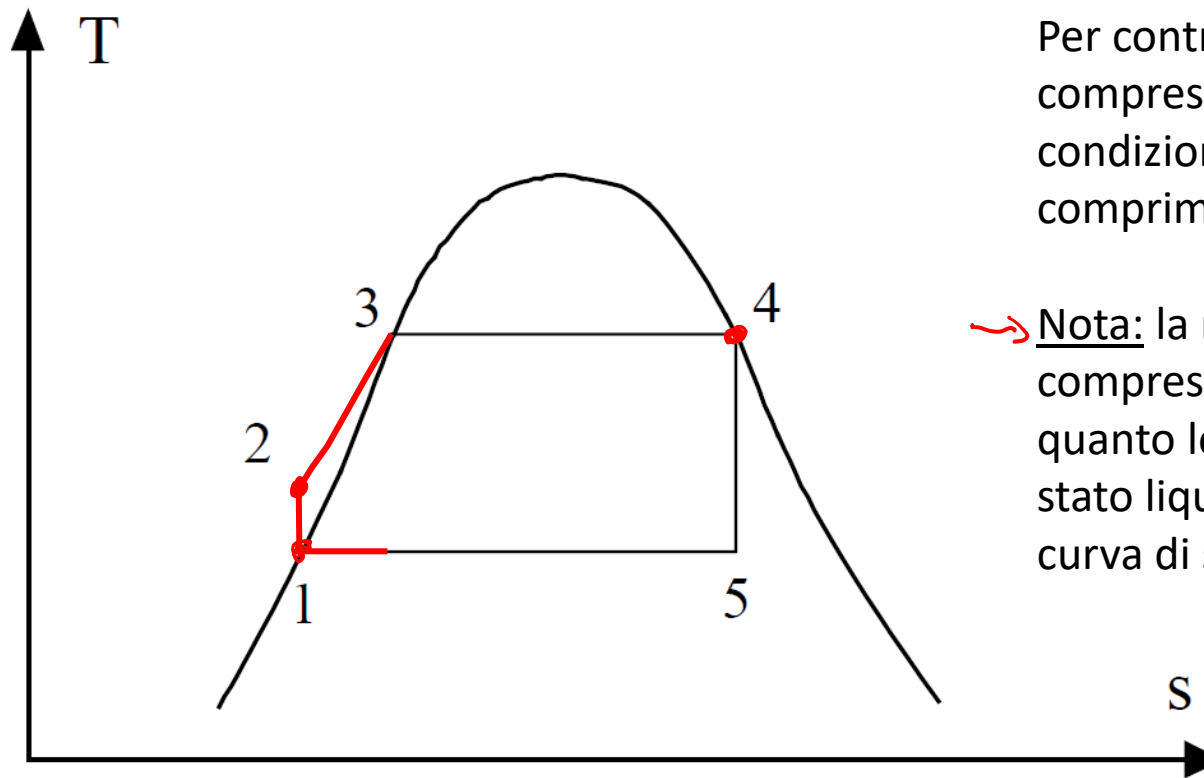


Diagramma  $T - s$  del fluido organico r134a



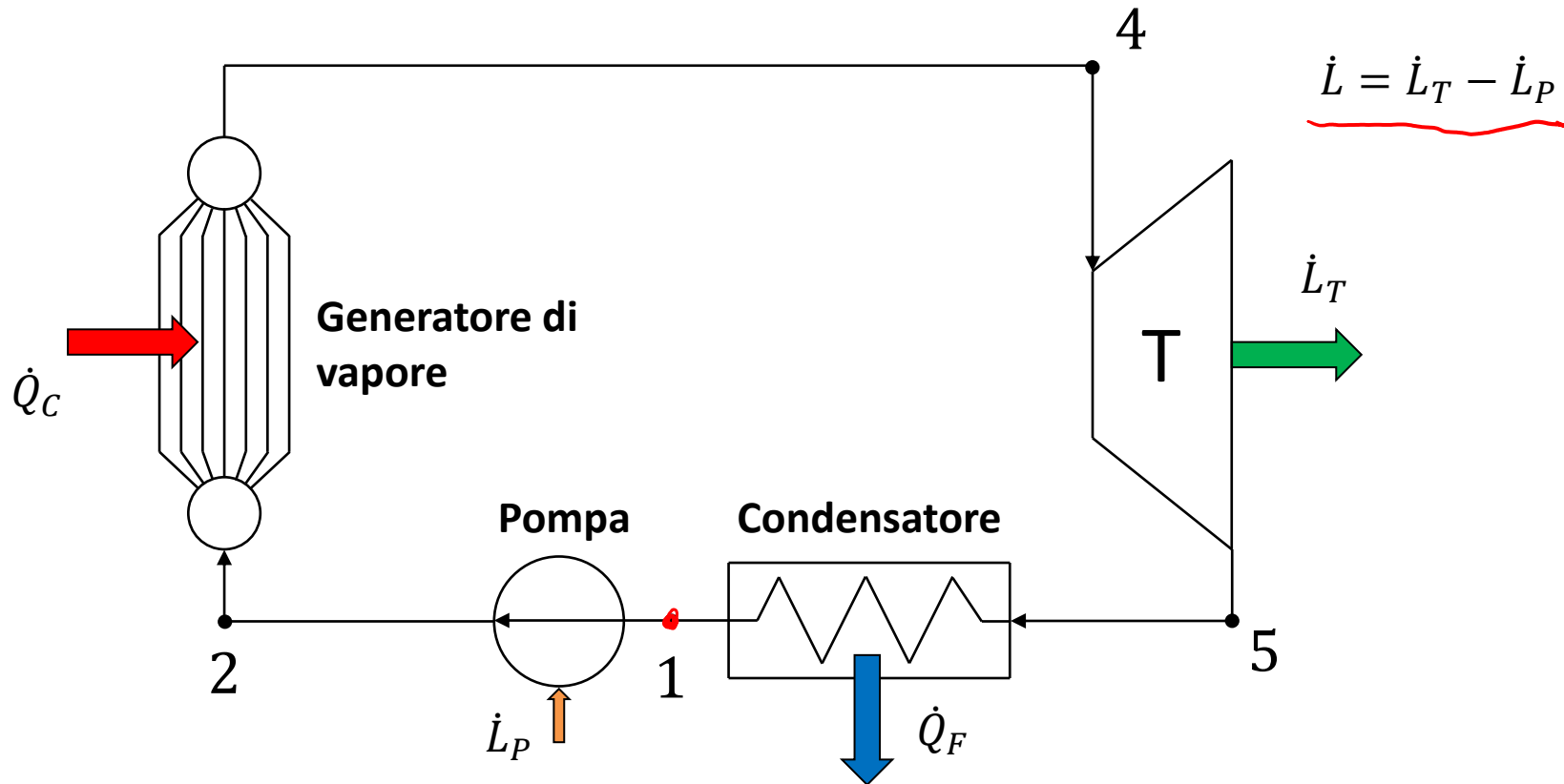
## Ciclo Rankine semplice (a vapore saturo)



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

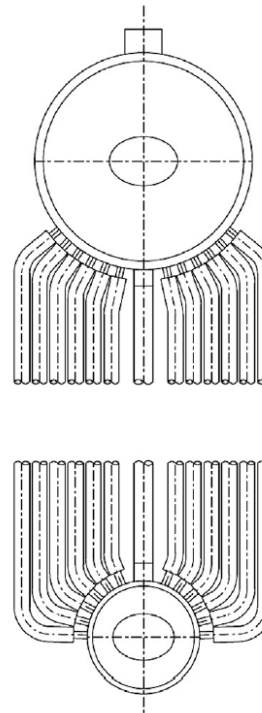
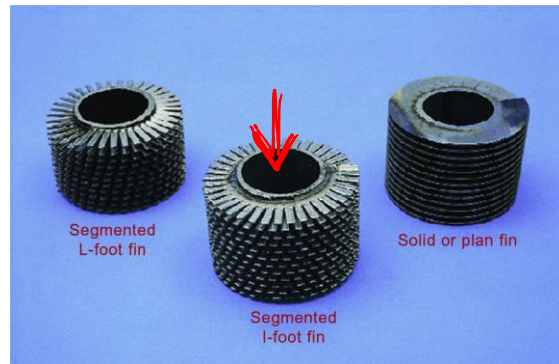
→ Nota: la rappresentazione della compressione 1-2 non è fedele in quanto le isobare, nella zona dello stato liquido, sono molto vicine alla curva di saturazione

## Ciclo Rankine semplice (a vapore saturo)

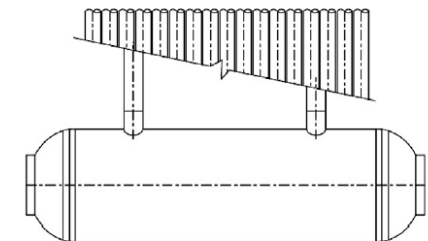
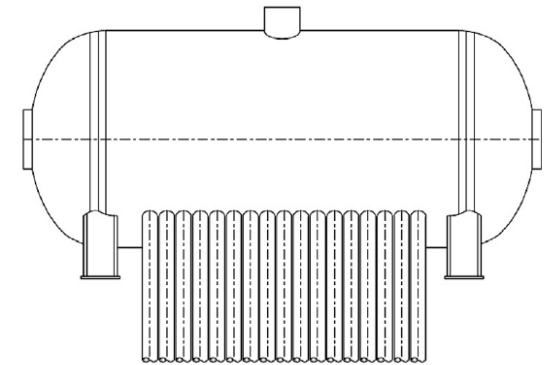


## Generatore di vapore

### Fascio tubiero alettato



### Corpo cilindrico superiore



### Corpo cilindrico inferiore

Source: Nooter Eriksen Inc.



### Generatore di vapore



*Source: Nooter Eriksen Inc.*

## Generatore di vapore



Source: Nooter Eriksen Inc.



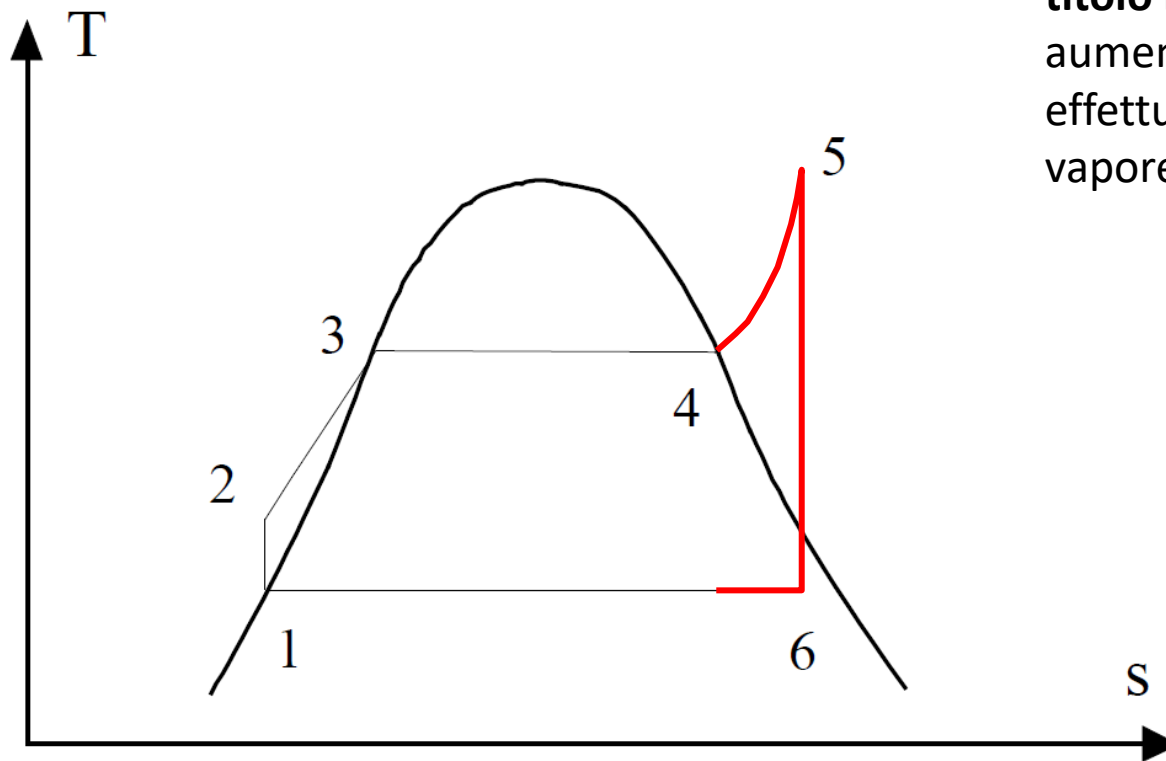


## Generatore di vapore



*Source: Nooter Eriksen Inc.*

## Ciclo Rankine

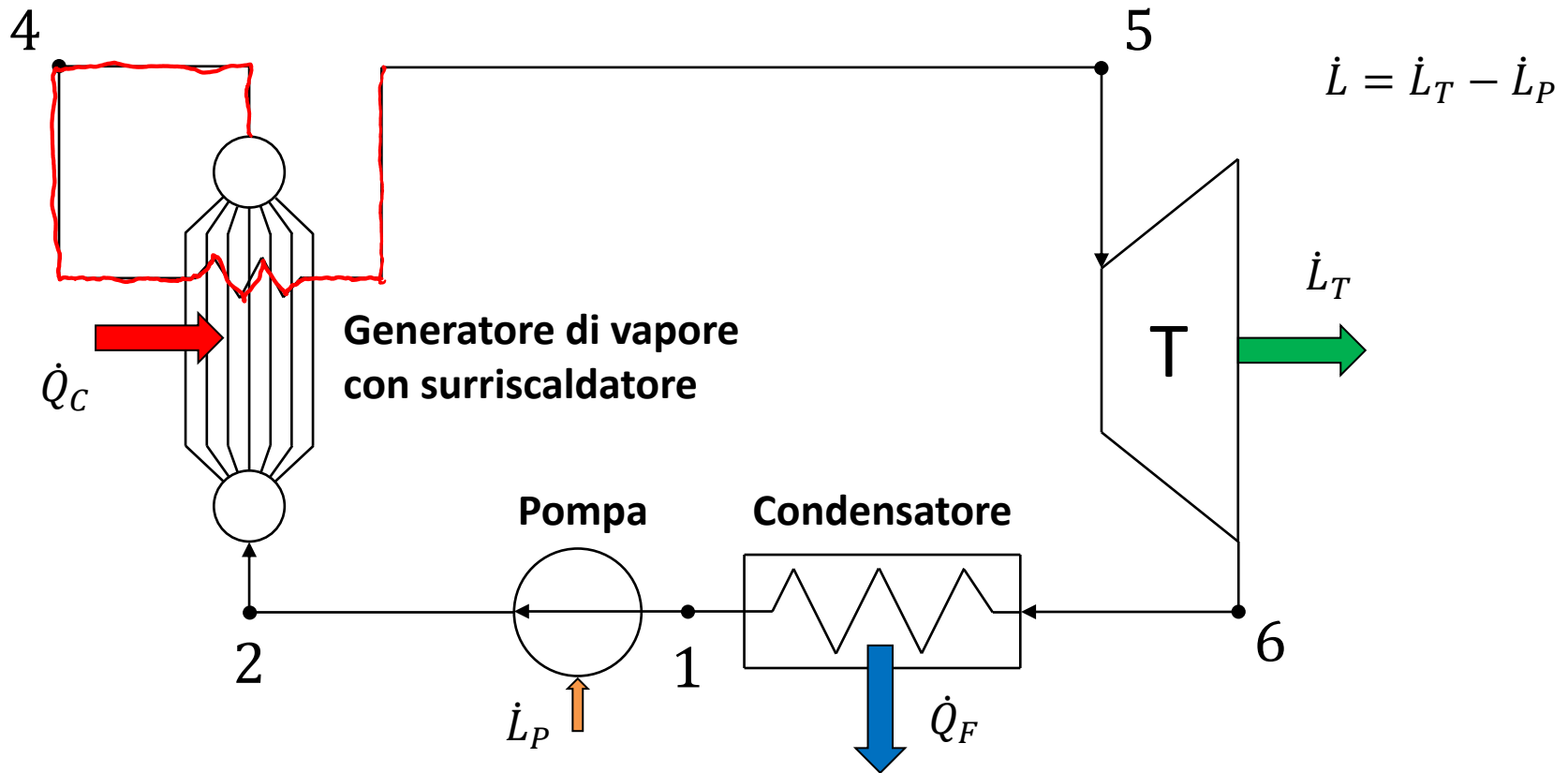


Per contrastare il problema del **titolo in uscita turbina**, ed aumentare il rendimento, si effettua il **surriscaldamento** del vapore (4-5)

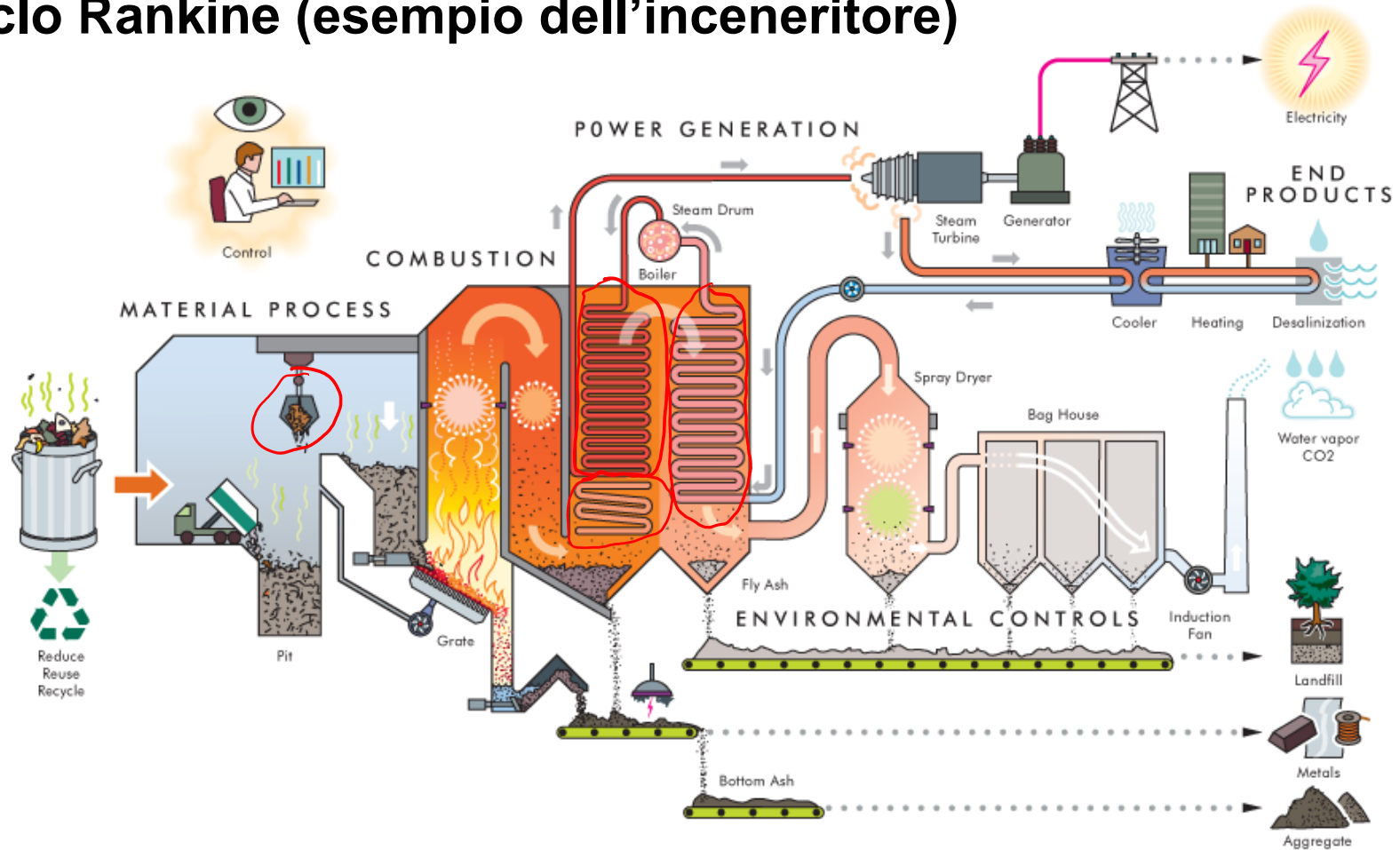
$$\eta = 1 - \frac{\dot{Q}_F}{\dot{Q}_C}$$

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

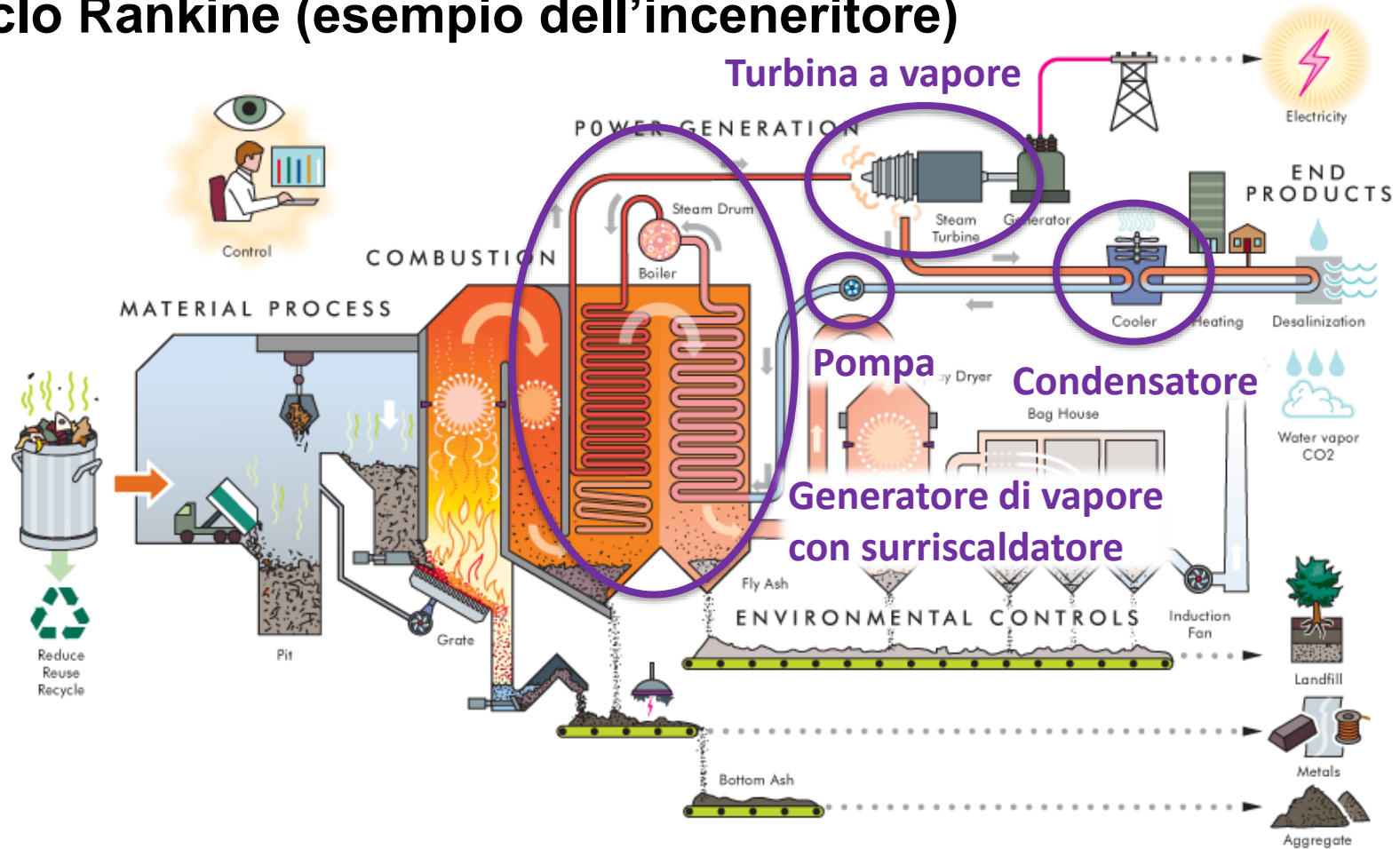
## Ciclo Rankine



## Ciclo Rankine (esempio dell'inceneritore)



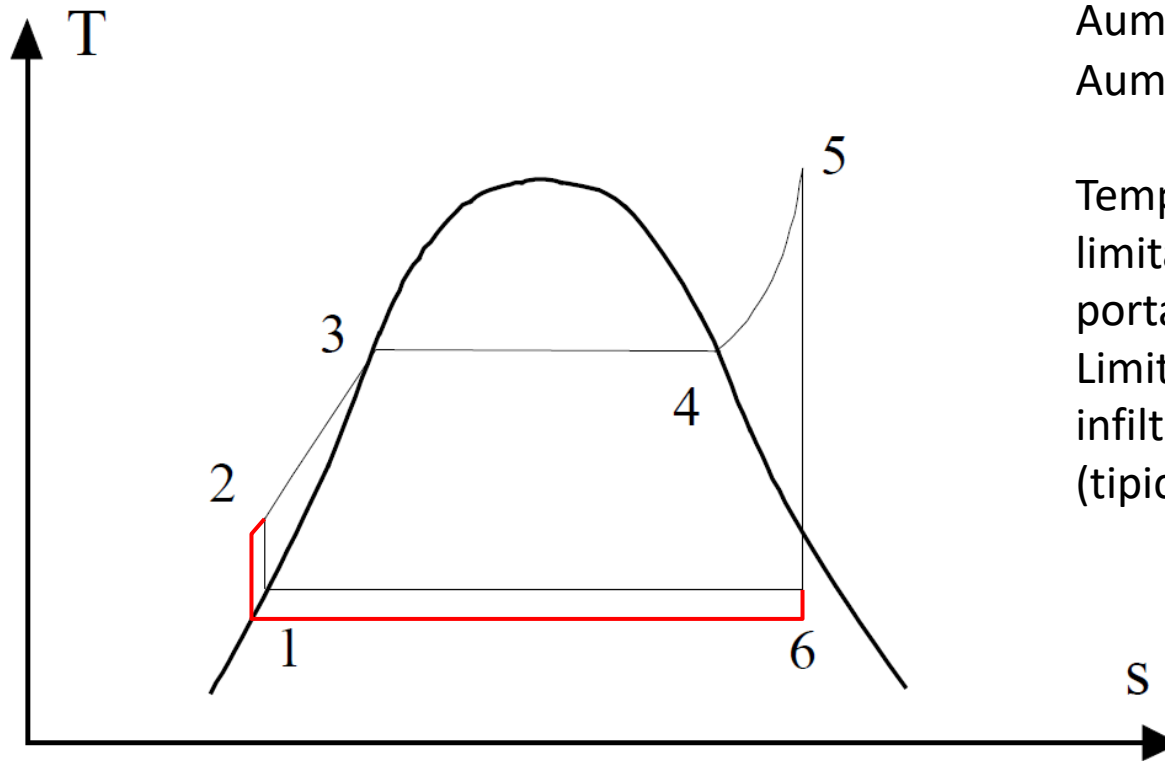
## Ciclo Rankine (esempio dell'inceneritore)



### **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**

## Riduzione della pressione di condensazione

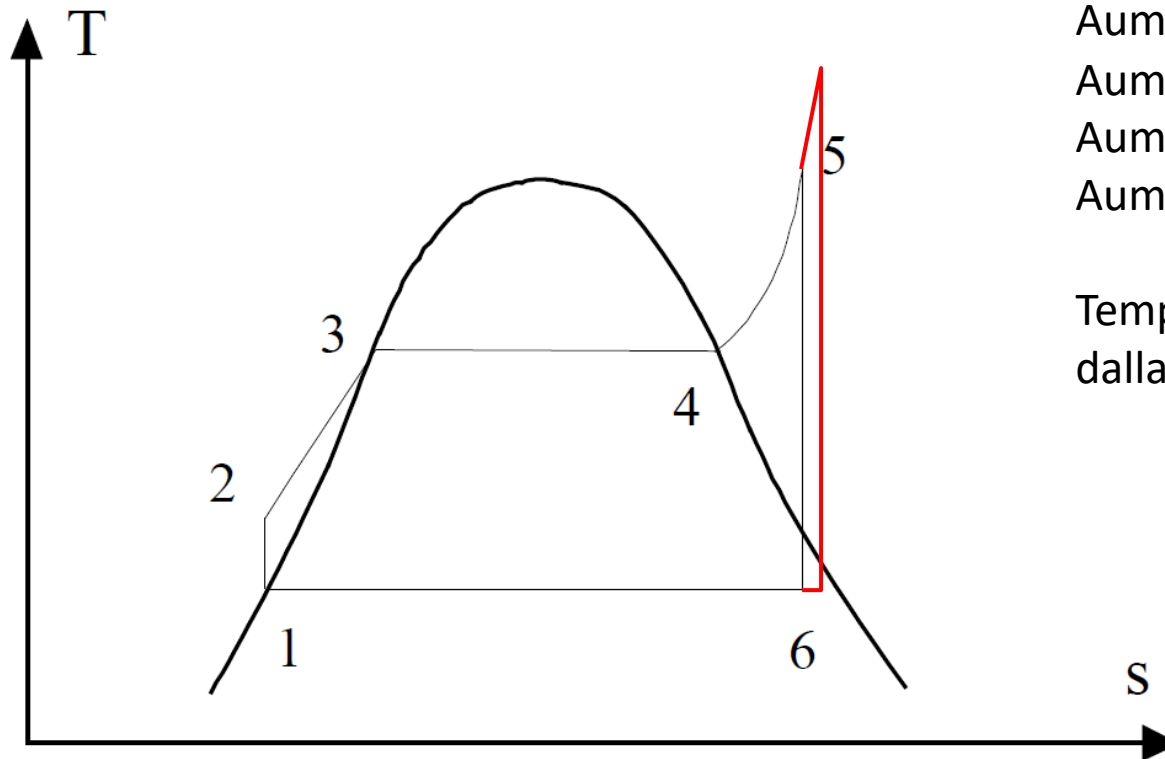


Aumenta il lavoro prodotto  
Aumenta il calore fornito  $\dot{Q}_C$

Temperatura di condensazione  
limitata dalla sorgente e dalla  
portata

Limiti tecnologici per le  
infiltrazioni quando  $P < P_{atm}$   
(tipico quando si utilizza acqua)

## Aumento della temperatura finale di surriscaldamento

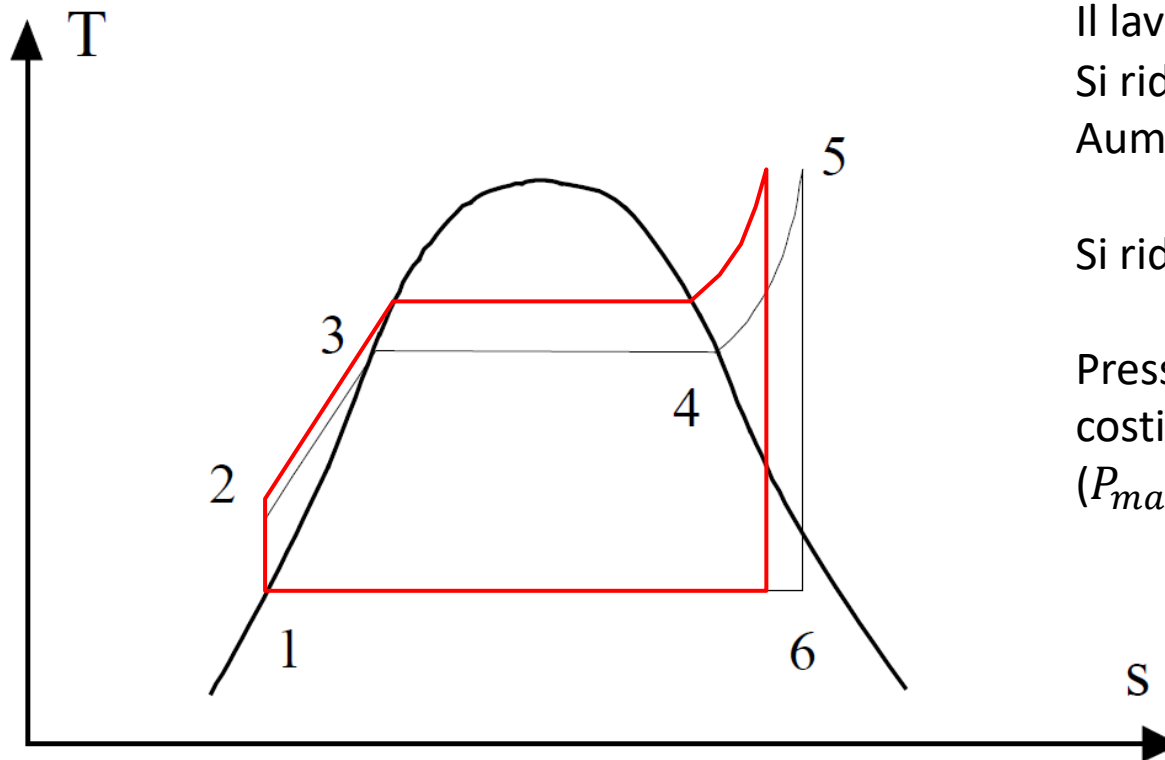


Aumenta il lavoro prodotto  
Aumenta il calore fornito  $\dot{Q}_C$   
Aumenta il rendimento  
Aumenta il titolo in uscita turbina

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



## Aumento della pressione di vaporizzazione



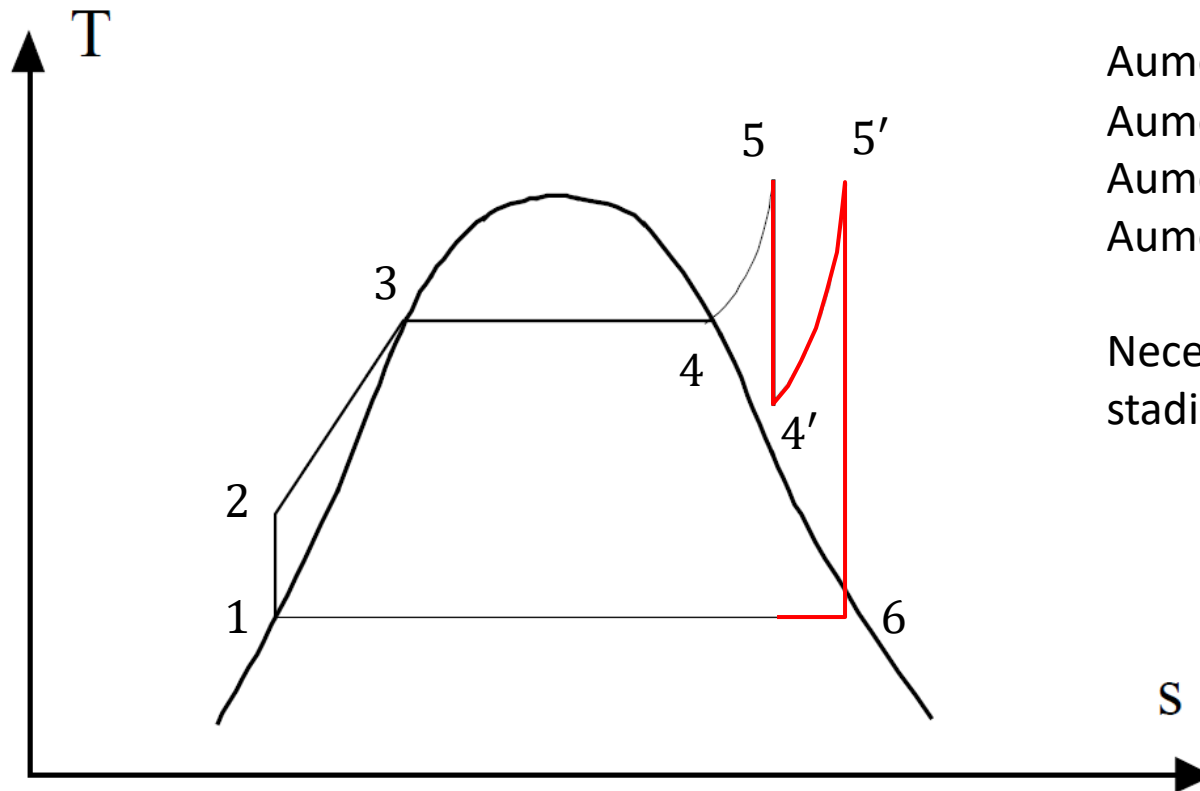
Il lavoro prodotto rimane simile  
Si riduce il calore fornito  $\dot{Q}_C$   
Aumenta il rendimento

Si riduce il titolo in uscita turbina

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

## Surriscaldamenti ripetuti

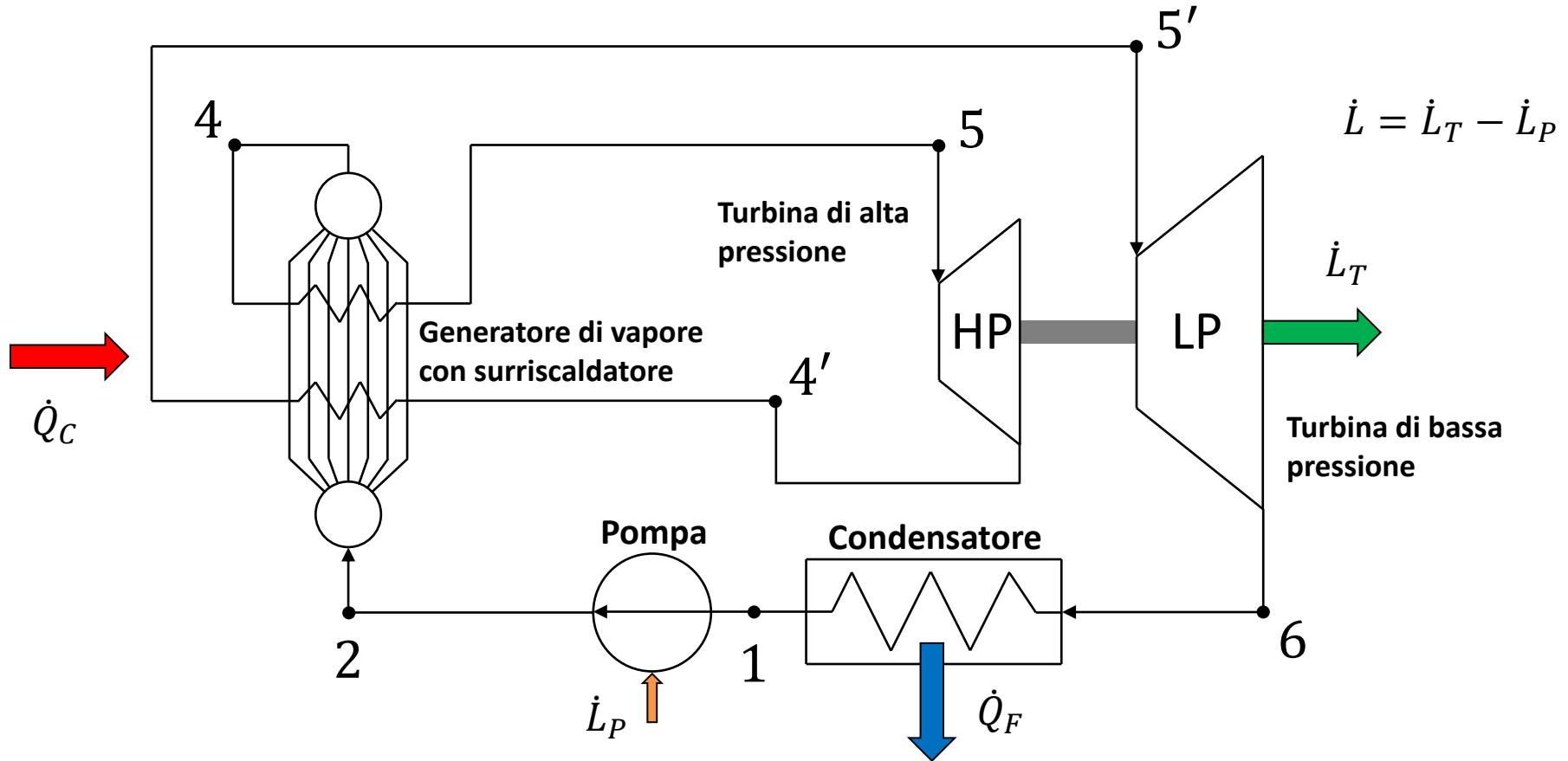
*(Rankine con risurriscaldamento)*

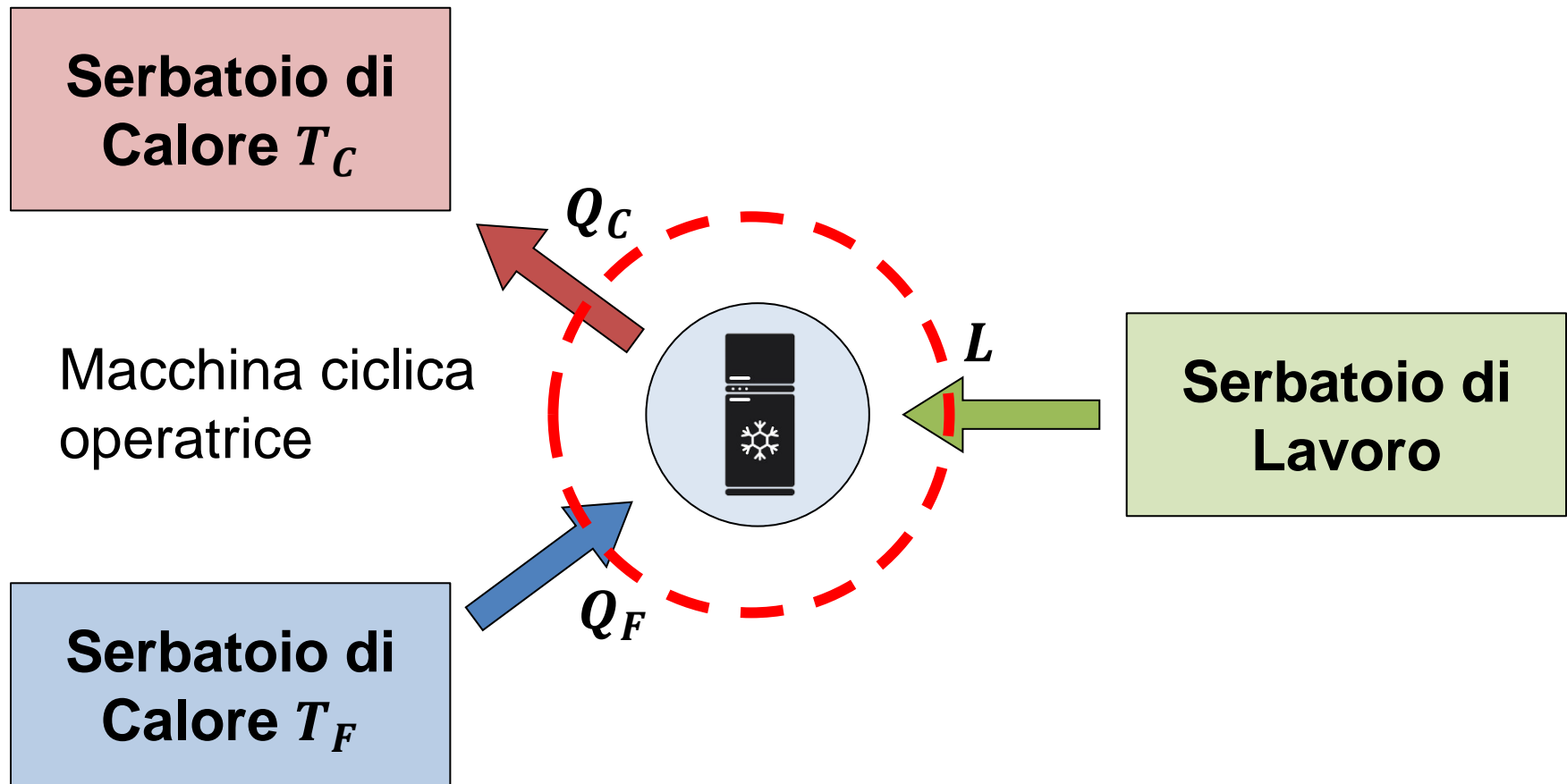


- Aumenta il lavoro prodotto
- Aumenta il calore fornito  $\dot{Q}_C$
- Aumenta il rendimento
- Aumenta il titolo in uscita turbina

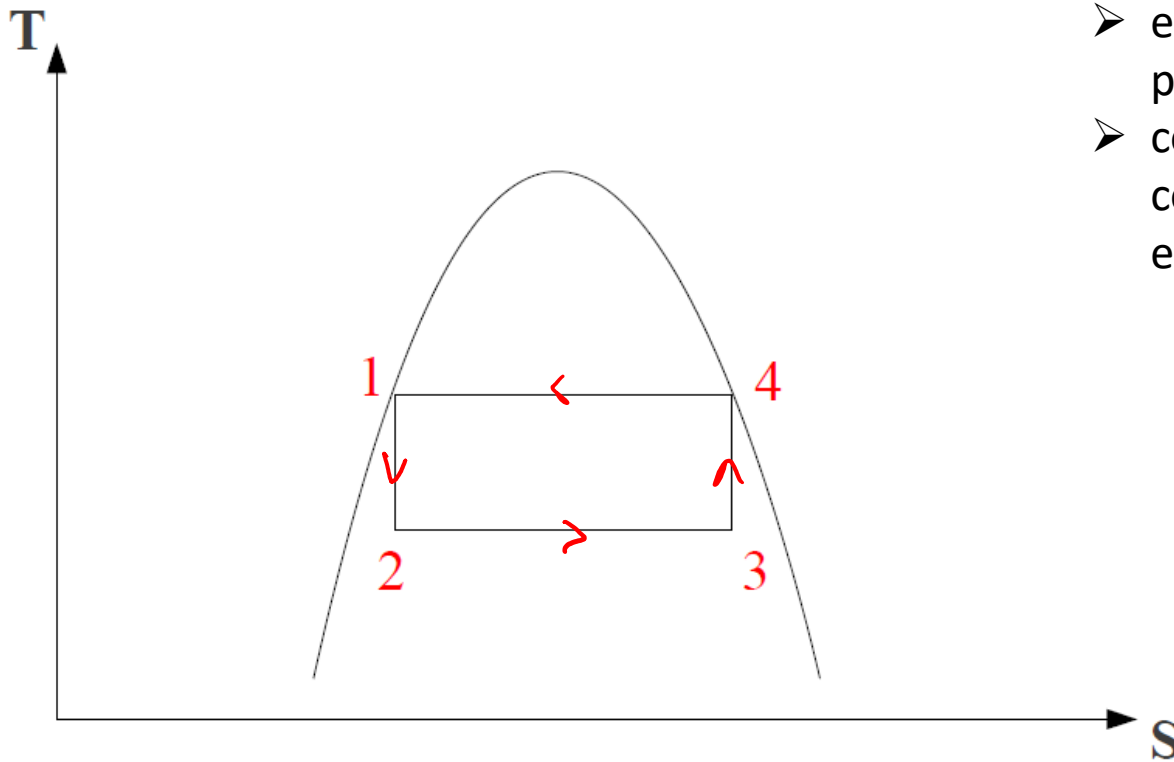
Necessità di una turbina a più stadi

## Surriscaldamenti ripetuti



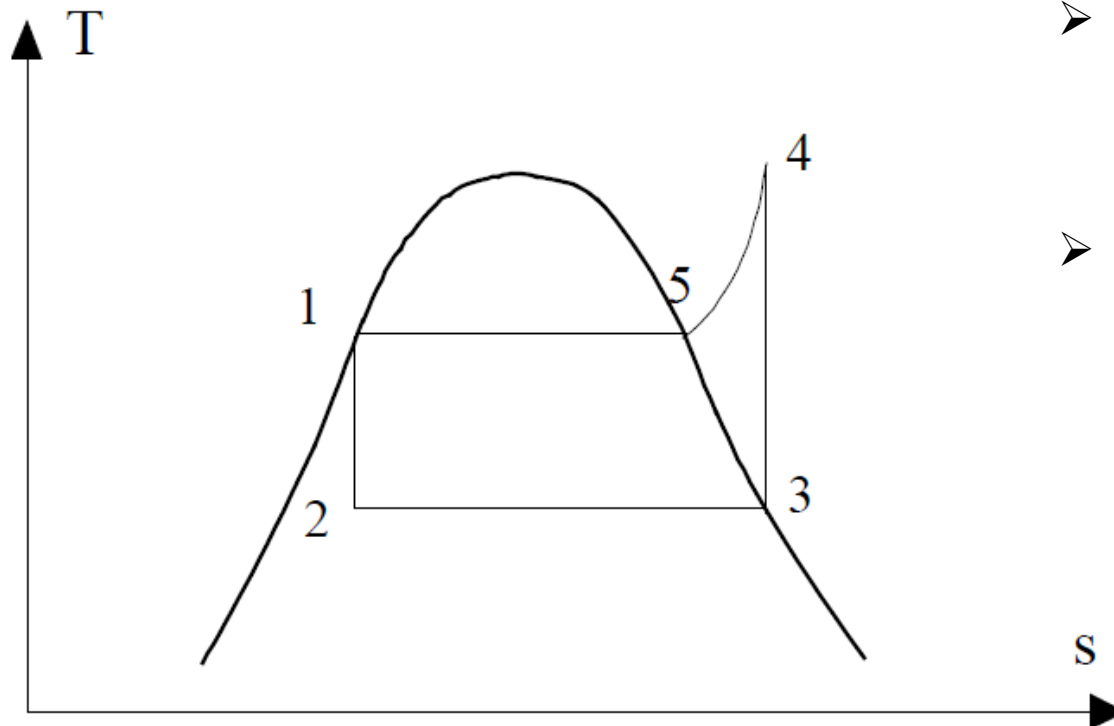


## Ciclo di Carnot inverso a vapore



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

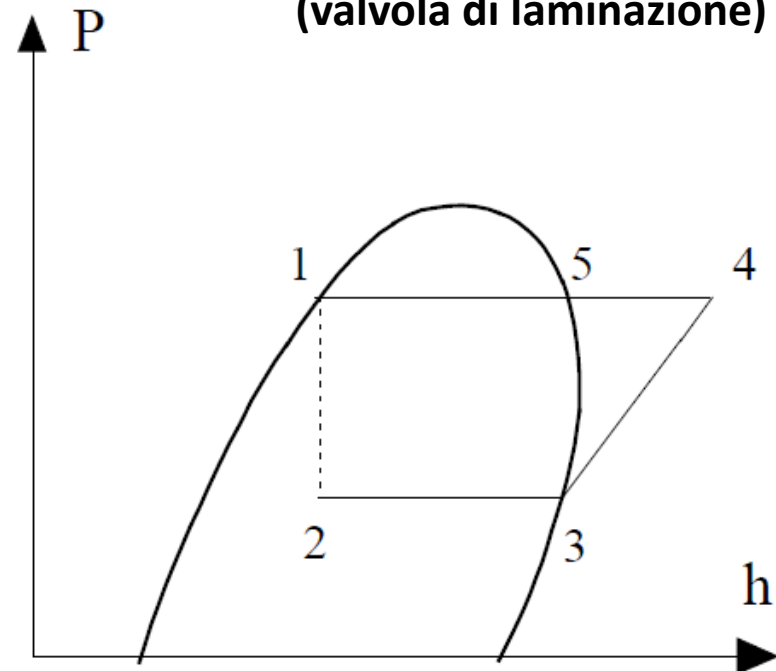
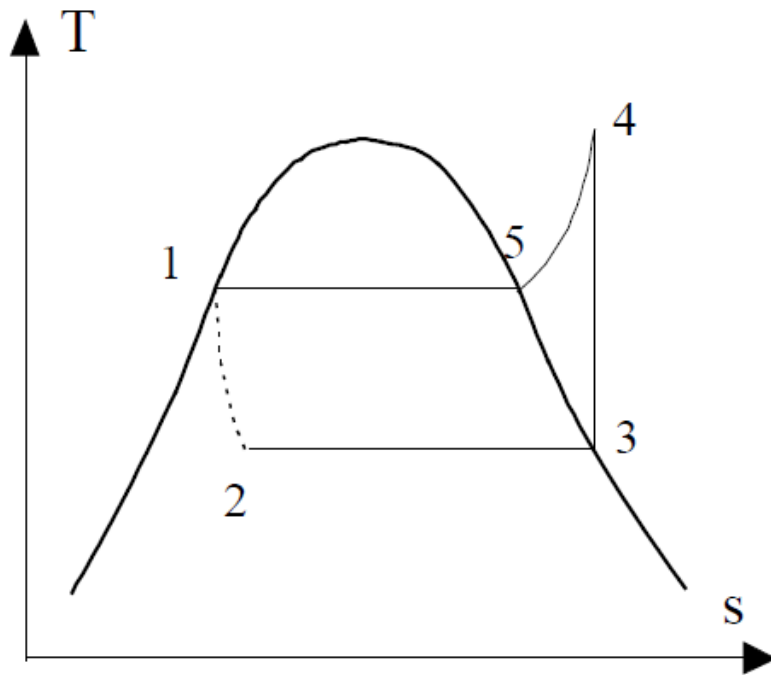
## Ciclo frigorifero a vapore teorico

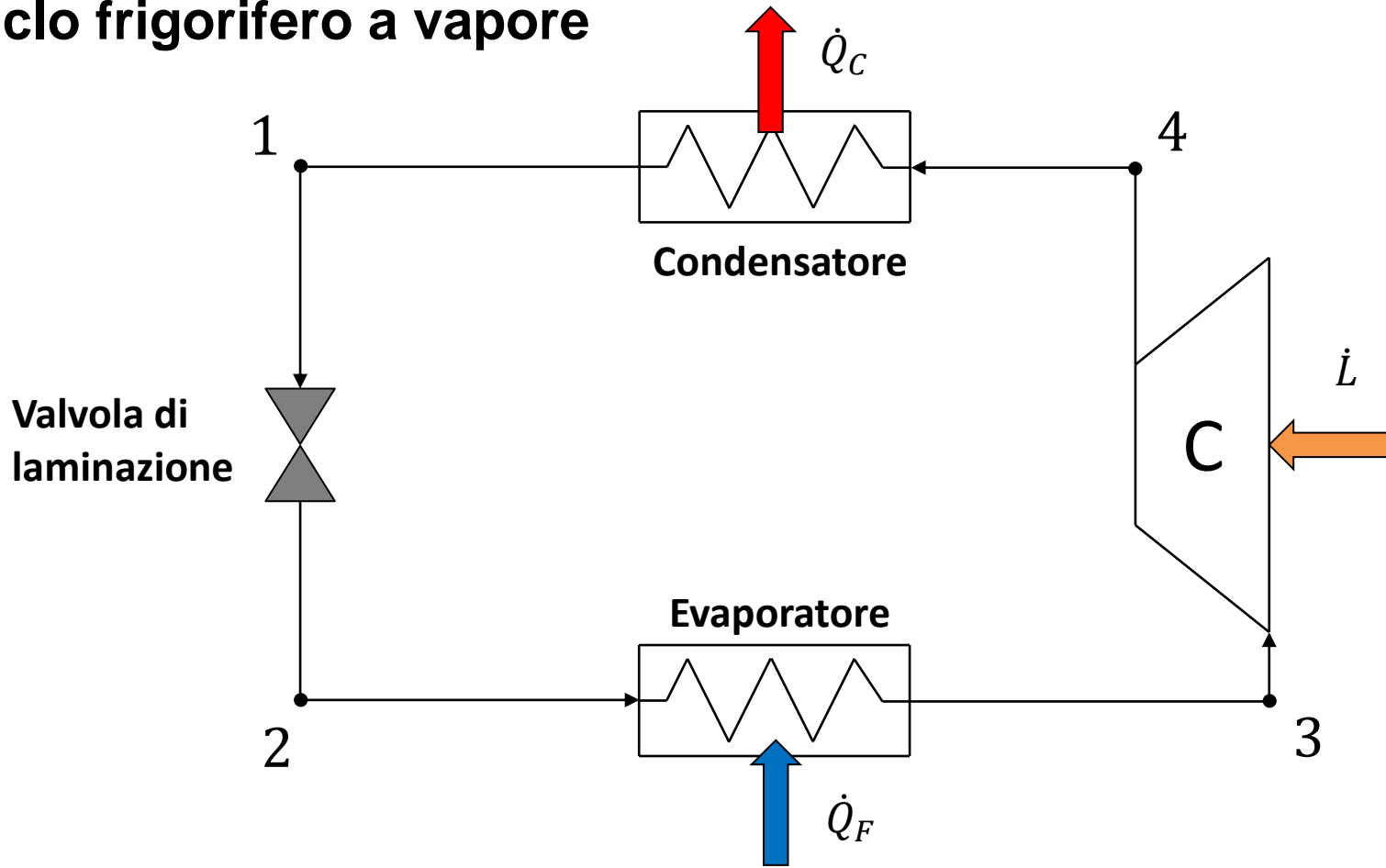


- compressione (3-4) di un vapore saturo/surriscaldato preferibile
- espansione (1-2) con una turbina non è conveniente (lavoro prodotto trascurabile) e difficile da realizzare

## 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

