

# Corso di impiego industriale dell'energia



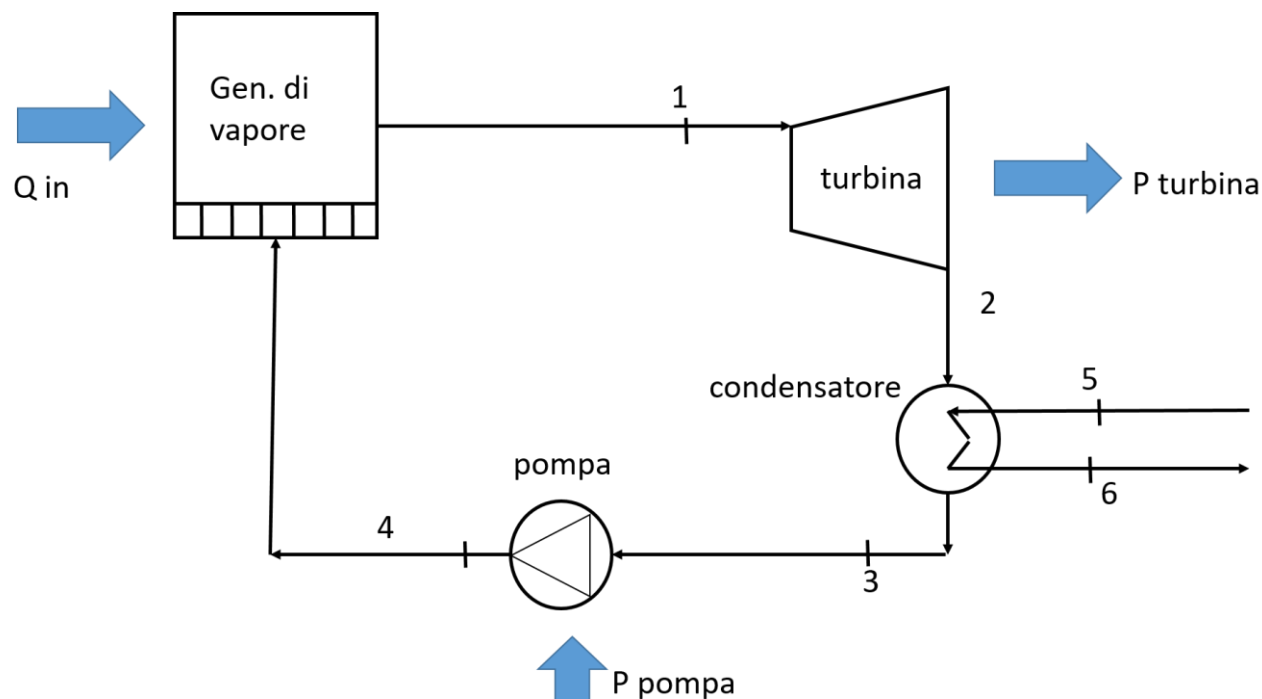
EES – Analisi di secondo principio di impianti a vapore

Prof. Rodolfo Taccani

Ing. Chiara Dall'Armi

A.A. 2020-21

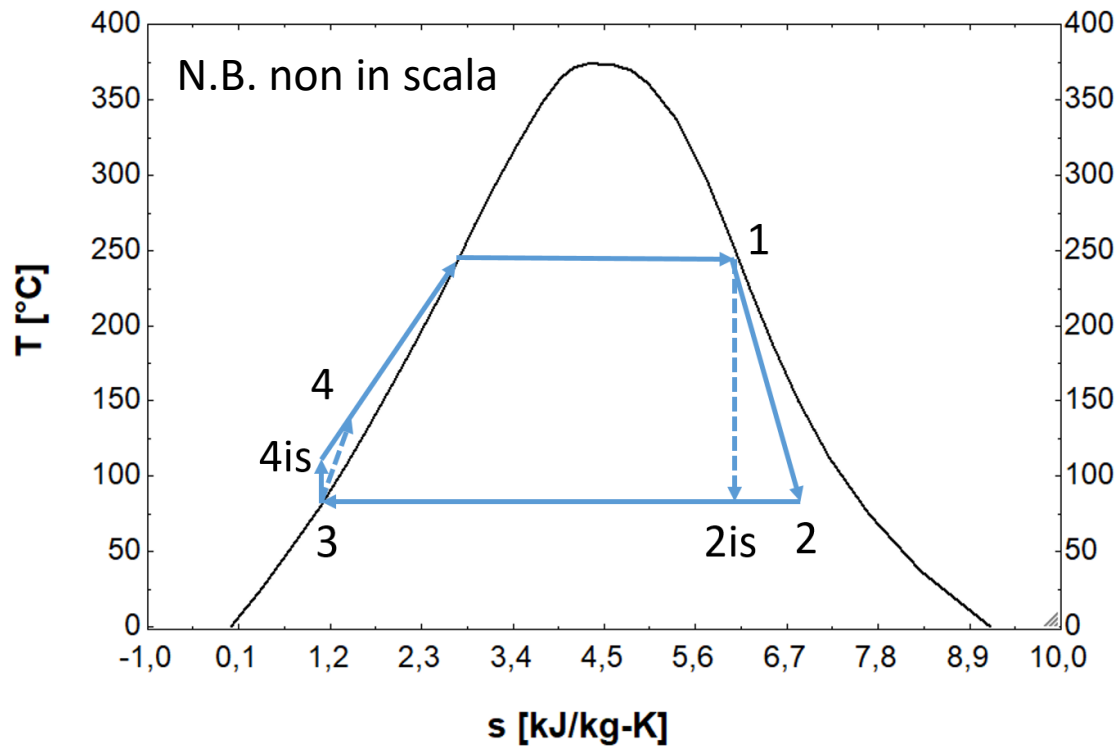
# Esercizio 10 – Analisi exergetica di un ciclo Rankine



Riprendere  
Esercizio 7

- Pressione al condensatore 0.08 bar
- Pressione all'ingresso in turbina 80 bar
- Lavoro netto richiesto 100 MW
- Rendimenti isoentropici pompa e turbina 85%
- Vapore saturo all'ingresso in turbina
- Liquido saturo all'uscita del condensatore
- Si trascurano le perdite di carico
- Temperature dell'acqua al condensatore ingresso e uscita: 15°C e 35°C

# Esercizio 10 – Analisi exergetica di un ciclo Rankine

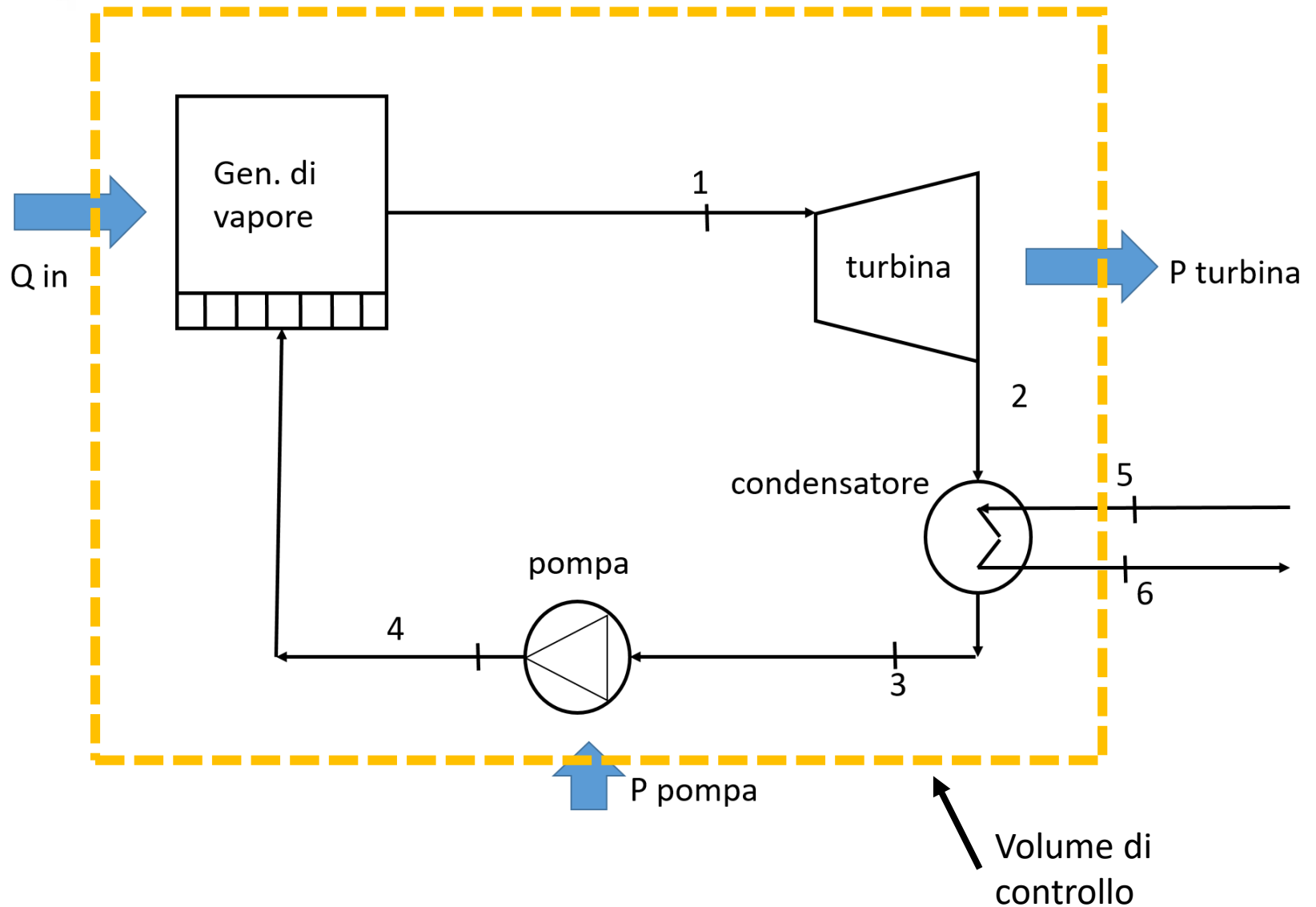


$$\eta_{is\ turbina} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2is}}$$

$$\eta_{is\ pompa} = \frac{h_{4is} - h_3}{h_4 - h_3}$$

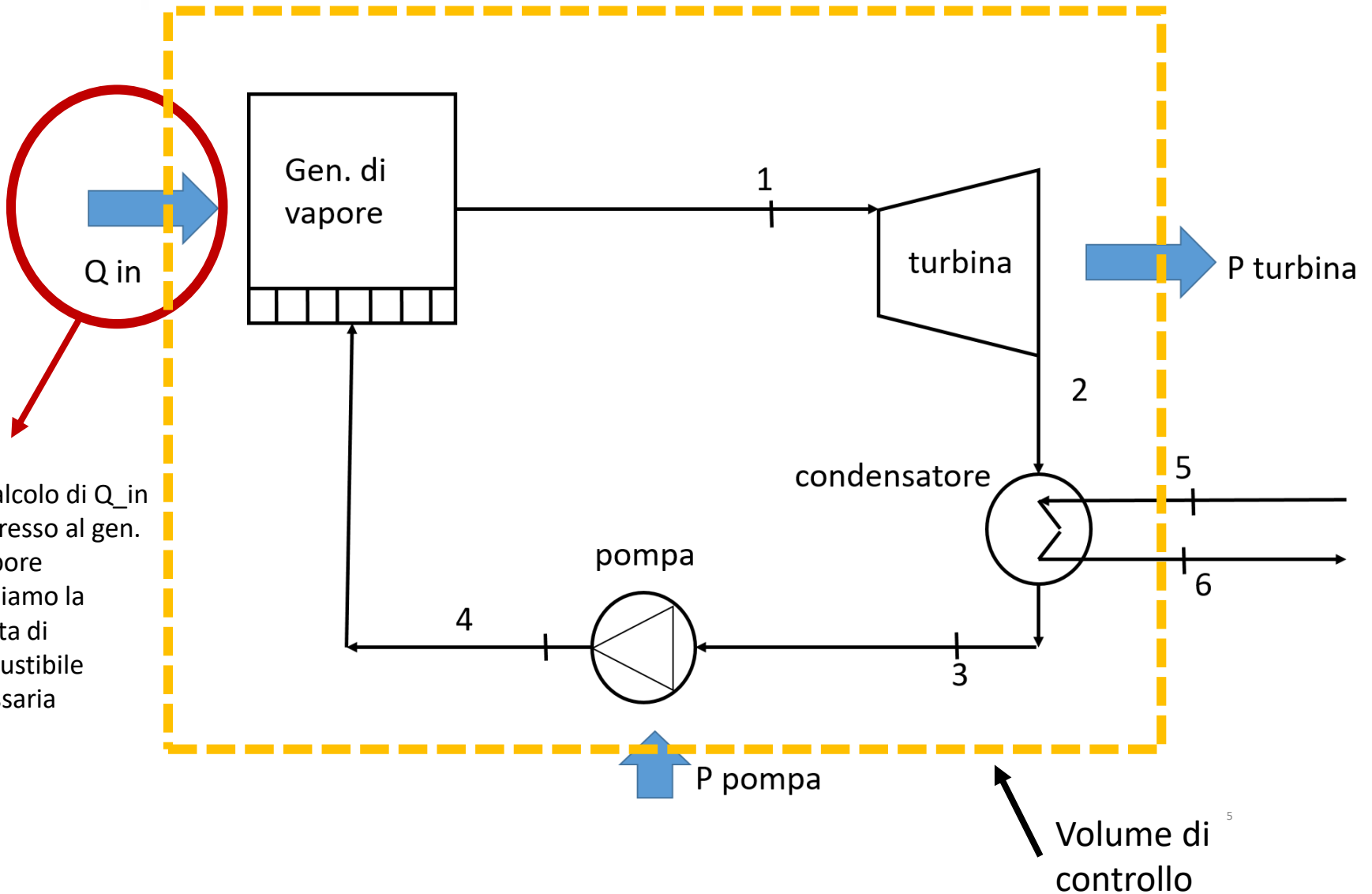
$$\eta_{th} = \frac{P_{NET}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{P_{turbina} - P_{pompa}}{\dot{m}(h_1 - h_4)}$$

# Esercizio 10 – Analisi exergetica di un ciclo Rankine





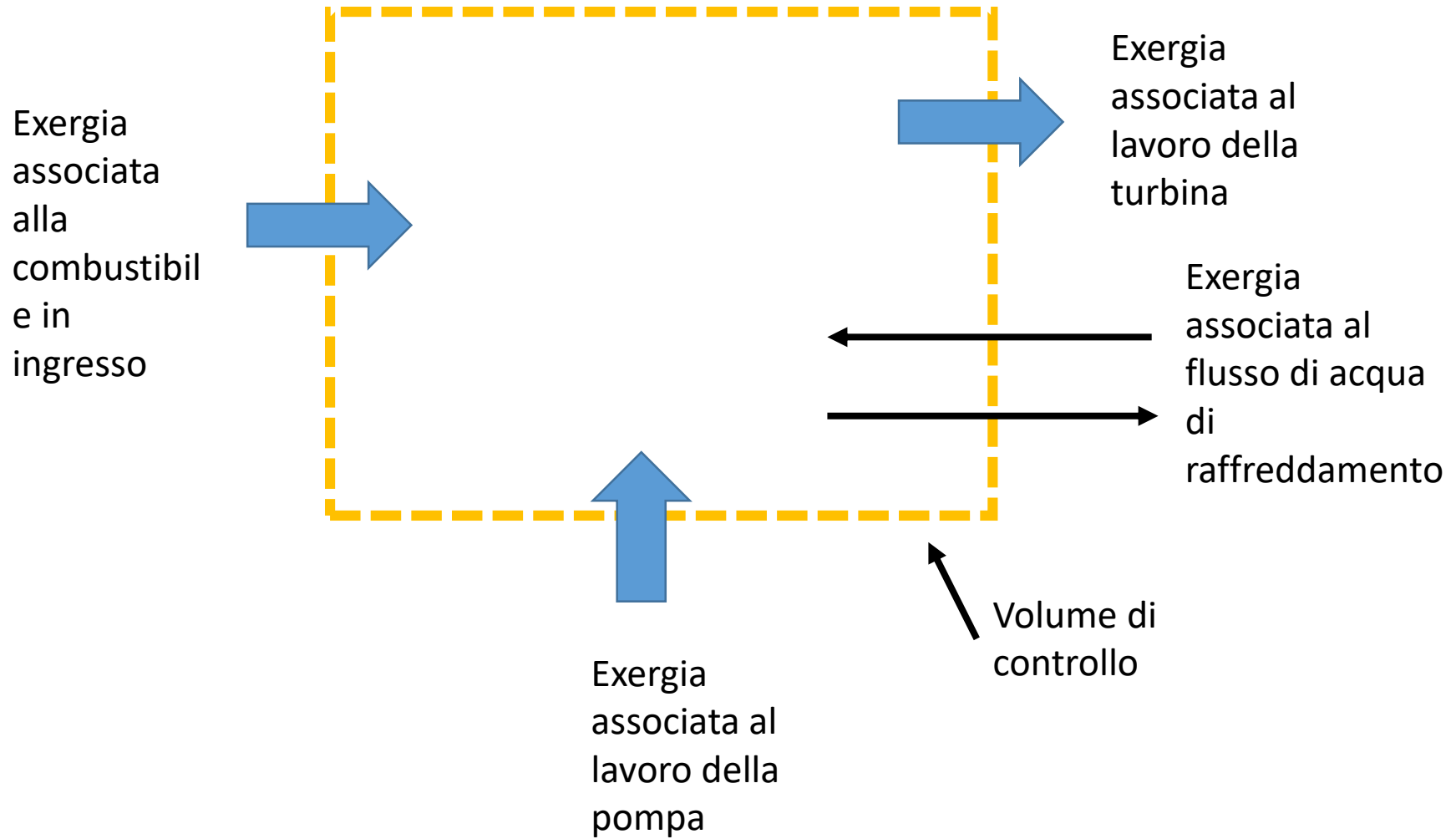
# Esercizio 10 – Analisi exergetica di un ciclo Rankine



Dal calcolo di  $Q_{in}$  in ingresso al gen. di vapore calcoliamo la portata di combustibile necessaria

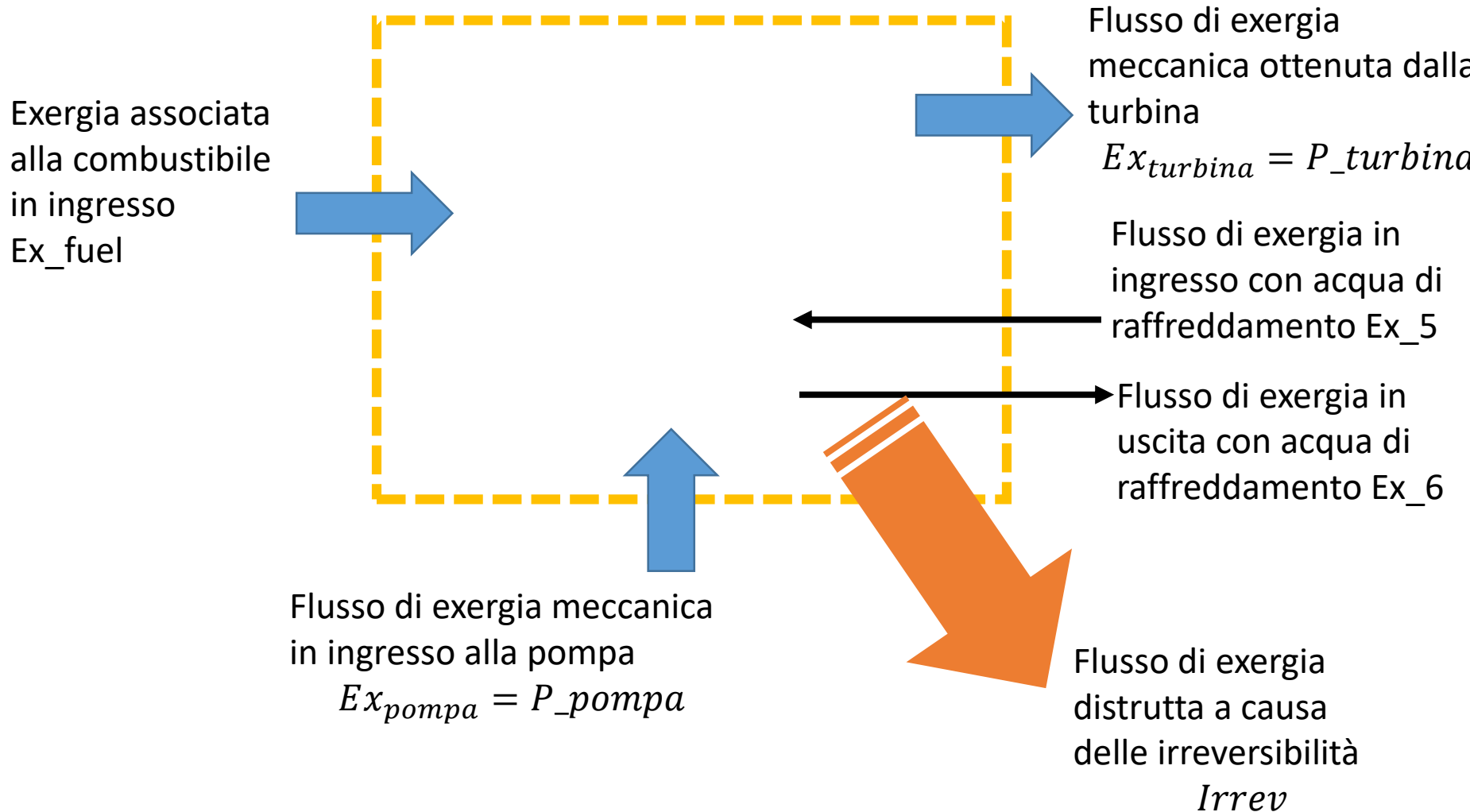


# Esercizio 10 – Analisi exergetica di un ciclo Rankine





## Esercizio 10 – Risultati



*exergia in ingresso = exergia in uscita + perdite per irreversibilità*



## Esercizio 10 – Analisi exergetica di un ciclo Rankine

Dopo aver individuato il volume di controllo si procede con:

**1) Determinazione di tutti i flussi exergetici in gioco**

**2) Bilancio exergetico di ciascun componente**

**3) Bilancio exergetico del sistema complessivo**

Sia per i singoli componenti che per il Sistema complessivo si può scrivere il bilancio exergetico come:

$$\sum(ex \text{ in ingresso}) = \sum(ex \text{ in uscita}) + (Irreversibilità)$$





# Esercizio 10 – Analisi exergetica di un ciclo Rankine

## 1) Determinazione di tutti i flussi exergetici in gioco

- Exergia associata al **flusso di massa** nei punti da 1 a 4: si considerano le componenti fisica e chimica, trascurando le componenti cinetica e potenziale
- **Turbina**: flusso ex. associato al lavoro in uscita
- **Pompa**: flusso ex. associato al lavoro in ingresso
- **Generatore di vapore**:  
conoscendo il tipo di caldaia e il tipo di combustibile si calcola il flusso exergetico associato al combustibile in ingresso alla caldaia
- **Acqua di raffreddamento**:  
flussi exergetici associati alle portate di massa entranti ed uscenti dal volume di controllo



# Esercizio 10 – Analisi exergetica di un ciclo Rankine

## 2) Bilancio exergetico di ciascun componente

per poter individuare le irreversibilità generate in ciascun componente

## 3) Bilancio exergetico del sistema complessivo

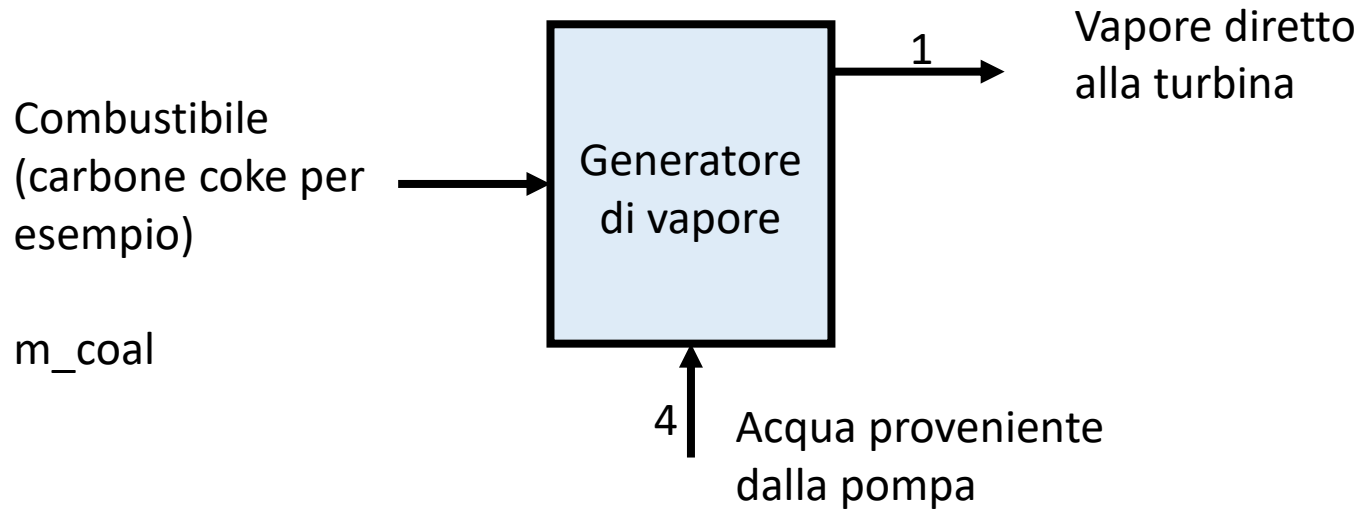
per poter individuare le irreversibilità totali del sistema e calcolare poi il contributo di ciascun componente

**Verifica:** somma delle irrev. generate nei singoli componenti deve essere pari alle irrev. calcolate dal bilancio ex. del sistema complessivo

$$\sum Irr_i = Irr_{totali}$$



# Esercizio 10 – Analisi exergetica di un ciclo Rankine



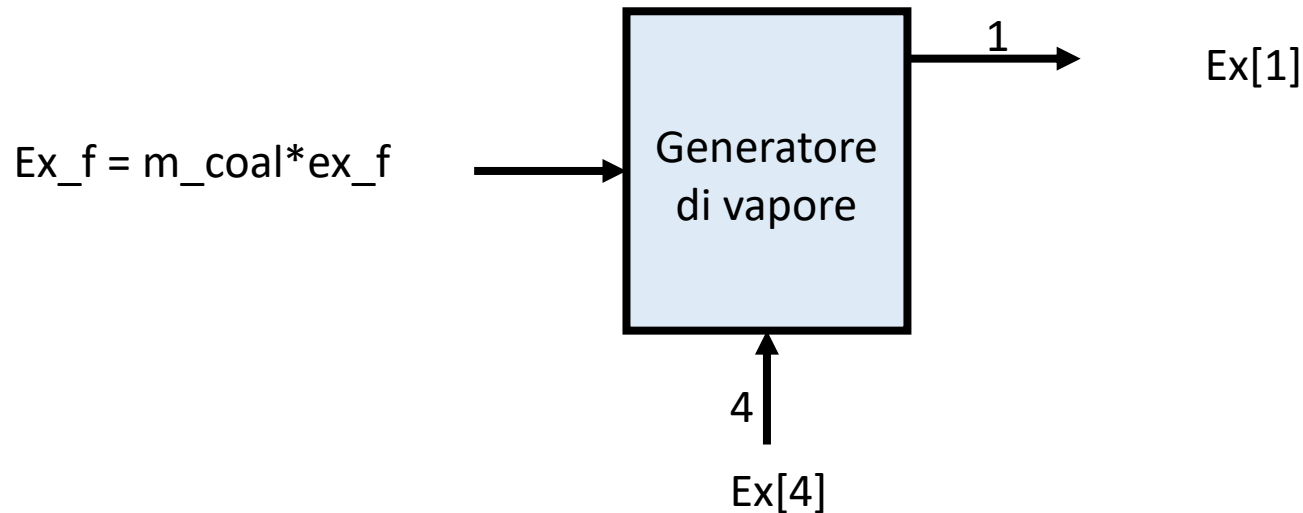
$$Q_{\text{in}} = m_{\text{coal}} \cdot \text{LHV} = m_{\text{vapore}} \cdot (h[1] - h[4])$$

per coke:  
 $\text{LHV} = 29,6 \text{ MJ/kg}$

Q-in era già stato  
calcolato, conoscendo il  
potere calor. del  
combustibile LHV si  
può determinare la  
portata di combustibile  
 $m_{\text{coal}}$



## Esercizio 10 – Analisi exergetica di un ciclo Rankine



$ex_f$  è il contenuto exergetico specifico per kg di combustibile; anche se ha un significato diverso dal potere calorifico i valori di  $ex_f$  e LHV sono approssimabili

Si può definire un coefficiente  $\psi = ex_f / \text{LHV}$

per il carbone un valore tipico del coefficiente  $\psi$  è 1.07 (v. tabella nelle prossime slide)



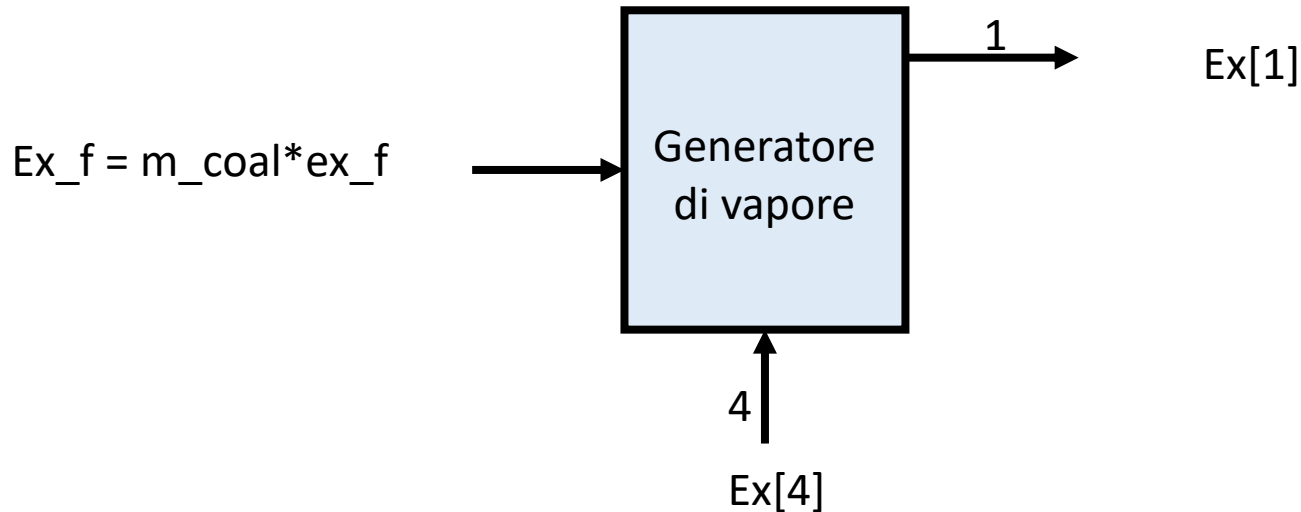
## Esercizio 10 – Analisi exergetica di un ciclo Rankine

Valori tipici del coefficiente  $\psi = (ex \text{ associata al combustibile}) / (\text{potere calor. Inferiore del combustibile})$  per diversi combustibili sono:

<b>Combustibile</b>	<b><math>\Psi = ex_f / LHV</math></b>
Coke	1,05
<b>Carbone (diversi tipi)</b>	<b>1,06-1,10</b>
Torba	1,16
Legno	1,15-1,30
Oli combustibili e enzene	1,04-1,08
Gas naturale	1,04 +/- 0,5%
Gas di cokeria	1,00 +/- 1%
Gas d'altoforno	0,98 +/- 1%
Idrogeno	0,97
Ossido di carbonio	0,97
Metano	1,04



## Esercizio 10 – Analisi exergetica di un ciclo Rankine



Il bilancio exergetico al generatore di vapore diventa:

Exergia entrante = exergia uscente + irreversibilità

$$Ex_f + Ex[4] = Ex[1] + IRR[10]$$



## Esercizio 10 – Risultati

Unit Settings: [kJ]/[K]/[bar]/[kg]/[degrees]

$$cp_w = 4,186$$

$$\eta_{it} = 0,85$$

$$Ex_{fuel} = 340362$$

$$Irr_{gen,vap} = \mathbf{88,11}$$

$$LHV_{coal} = 29600$$

$$m_{water} = 2605$$

$$P_{pompa} = 1170$$

$$Q_{in} = 318095$$

$$\eta_{II} = 0,2938$$

$$\eta_{th} = 0,3144$$

$$IRREVERSIBILITA = 240444$$

$$Irr_{pompa} = \mathbf{0,06905}$$

$$m_{coal} = 10,75$$

$$\psi = 1,07$$

$$P_{turbina} = 101170$$

$$verifica = 0$$

$$\eta_{ip} = 0,85$$

$$Ex_f = 31672$$

$$Irr_{cond} = \mathbf{4,788}$$

$$Irr_{turbina} = \mathbf{7,036}$$

$$m_{vapore} = 123,6$$

$$P_{NET} = 100000$$

$$Q_{cond} = 218095$$

Il rendimento di II principio è molto simile al rendimento di I principio (rendimento termico), infatti:

$$\eta_{th} = \frac{P_{NET}}{Q_{in}} = \frac{P_{NET}}{m_{coal} * LHV}$$
$$\eta_{II} = \frac{P_{NET}}{Ex_f} = \frac{P_{NET}}{m_{coal} * ex_f}$$

Come visto prima, I valori di LHV e  $ex_f$  sono pressochè uguali ( $\psi = 1.07$ )



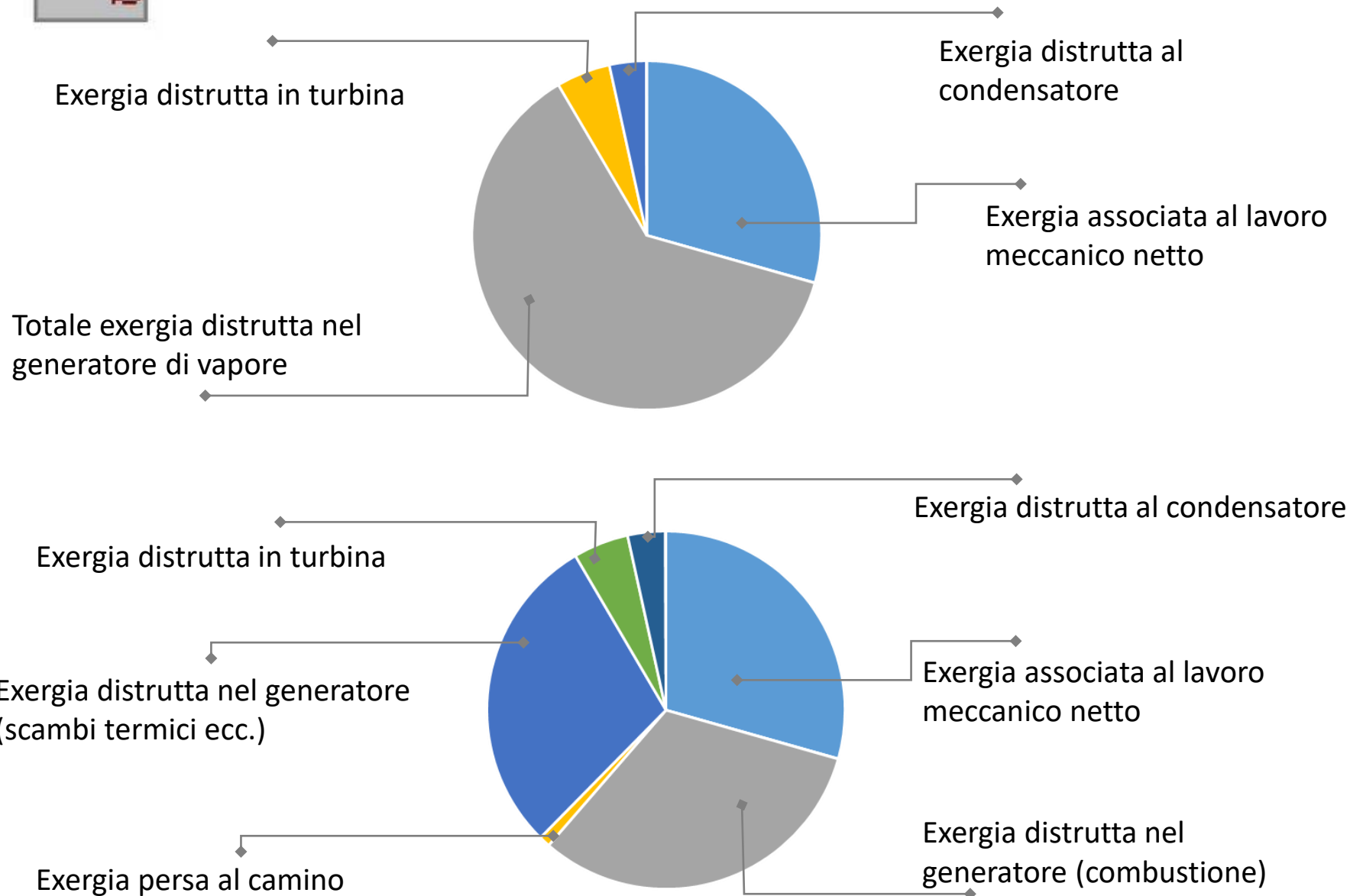
## Esercizio 10 – Risultati

Exergia in ingresso con il combustibile	100	%
Ex meccanica netta (associata a lavoro netto turbina-pompa)	29.4	%
Exergia <b>persa</b> al condensatore ( Ex[5]-Ex[6] )	0.02	%
Exergia distrutta al generatore di vapore	62.2	%
Exergia distrutta in turbina	5.0	%
Exergia distrutta al condensatore	3.4	%
Exergia distrutta alla pompa	0.05	%



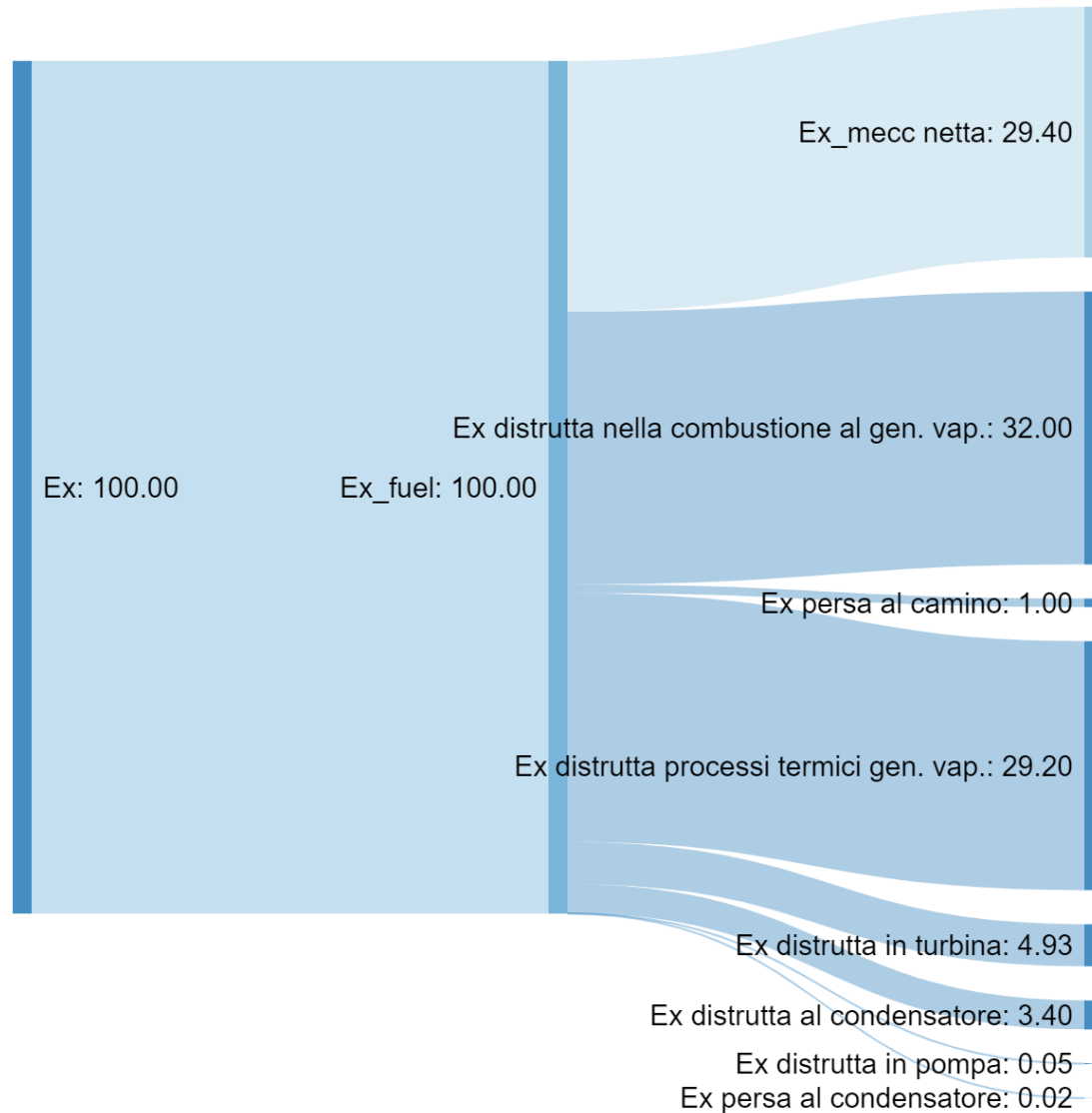


## Esercizio 10 – Risultati





# Esercizio 10 – Diagramma di Sankey





## Esercizio 10 – Script

La parte iniziale, fino al calcolo del rendimento termico (di primo principio) è uguale all'Esercizio 7. Da dopo questa prima parte si inserisce lo script seguente:

"Calcolo la portata d'acqua di raffreddamento necessaria al condensatore per condensare il vapore"

$Q_{cond} = m_{water} * cp_w * (T[6] - T[5])$  {bilancio energetico al condensatore}

$Q_{cond} = m_{vapore} * (h[2] - h[3])$

$T[6] = 35 + 273,15$  {K}

$T[5] = 15 + 273,15$  {K}

$cp_w = 4,186$  {kJ/kgK}

$p[5] = 1$  {bar} {ipotizzo che l'acqua di raffreddamento sia a pressione ambiente}


$p[5] = p[6]$

$h[5] = \text{enthalpy}(\text{water}; T=T[5]; p=p[5])$

$s[5] = \text{entropy}(\text{water}; T=T[5]; p=p[5])$

$h[6] = \text{enthalpy}(\text{water}; T=T[6]; p=p[6])$

$s[6] = \text{entropy}(\text{water}; T=T[6]; p=p[6])$



Se non già determinate nello script dell'es 7, includere nello script il calcolo di entalpia ed entropia per i punti 5 e 6



## Esercizio 10 – Script

La parte iniziale, fino al calcolo del rendimento termico (di primo principio) è uguale all'Esercizio 7. Da dopo questa prima parte si inserisce lo script seguente:

### "ANALISI DI II PRINCIPIO"

"defizione dello stato ambiente di riferimento ( per l'acqua a T0 e p0)"

p[0]=1 [bar]

T[0]=25+273,15 {K}

h[0]=enthalpy(water;p=p[0];T=T[0])

s[0]=entropy(water;p=p[0];T=T[0])

### "Calcolo flussi di exergia FISICA specifica nei punti del ciclo"

ex\_ph[1]= h[1]-h[0]-T[0]\*(s[1]-s[0]) "[kJ/kg]"

ex\_ph[2]=h[2]-h[0]-T[0]\*(s[2]-s[0])

ex\_ph[3]=h[3]-h[0]-T[0]\*(s[3]-s[0])

ex\_ph[4]=h[4]-h[0]-T[0]\*(s[4]-s[0])

ex\_ph[5]=h[5]-h[0]-T[0]\*(s[5]-s[0])

ex\_ph[6]=h[6]-h[0]-T[0]\*(s[6]-s[0])

### "Calcolo flussi di exergia nei punti del ciclo«

{IPO: si trascura ex chimica}

Ex\_fuel=m\_coal\*Ex\_f

Ex[1]=m\_vapore\*(ex\_ph[1]) "[kW]"

Ex[2]=m\_vapore\*(ex\_ph[2]) "[kW]"

Ex[3]=m\_vapore\*(ex\_ph[3]) "[kW]"

Ex[4]=m\_vapore\*(ex\_ph[4]) "[kW]"

Ex[5]=m\_water\*(ex\_ph[5]) "[kW]"

Ex[6]=m\_water\*(ex\_ph[6]) "[kW]"



## Esercizio 10 – Script

"Calcolo il flusso di exergia associato allo scambio di calore al gen. di vapore  $Q_{in}$ "

{IPOTESI: considero analisi semplificata di un generatore di vapore }

$\psi = Ex_f / LHV_{coal}$

$Ex_{fuel} + Ex[4] = Ex[1] + IRR[10]$

$\psi = 1.07$  {rapporto tra ex e LHV per carbon coke}

"ANALISI EXERGETICA DEI SINGOLI COMPONENTI"

"Turbina [7]"

$Ex[1] = Ex[2] + P_{turbina} + IRR[7]$

"Condensatore [8]"

$Ex[2] + Ex[5] = Ex[6] + Ex[3] + IRR[8]$

"Pompa [9]"

$P_{pompa} + Ex[3] = Ex[4] + IRR[9]$

"Generatore di vapore [10]"

$Ex_Q + Ex[4] = Ex[1] + IRR[10]$

"BILANCIO EX GLOBALE DELL'IMPIANTO"

$Ex_Q + P_{pompa} + Ex[5] = Ex[6] + P_{turbina} + IRREVERSIBILITA$

verifica =  $IRREVERSIBILITA - IRR[7] - IRR[8] - IRR[9] - IRR[10]$

"RENDIMENTO EXERGETICO DELL'IMPIANTO"

$\eta_{II} = P_{NET} / Ex_Q$

"INDIVIDUO IL COMPONENTE PIU' CRITICO IN TERMINI DI IRREVERSIBILITA' DEL SISTEMA"

$IRR_{turbina} = IRR[7] / IRREVERSIBILITA * 100$  [%]"

$IRR_{cond} = IRR[8] / IRREVERSIBILITA * 100$  [%]"

$IRR_{pompa} = IRR[9] / IRREVERSIBILITA * 100$  [%]"

$IRR_{gen\_vap} = IRR[10] / IRREVERSIBILITA * 100$  [%]"