

# Corso di impiego industriale dell'energia



Impianti criogenici

Prof. Rodolfo Taccani

Ing. Pivetta Davide

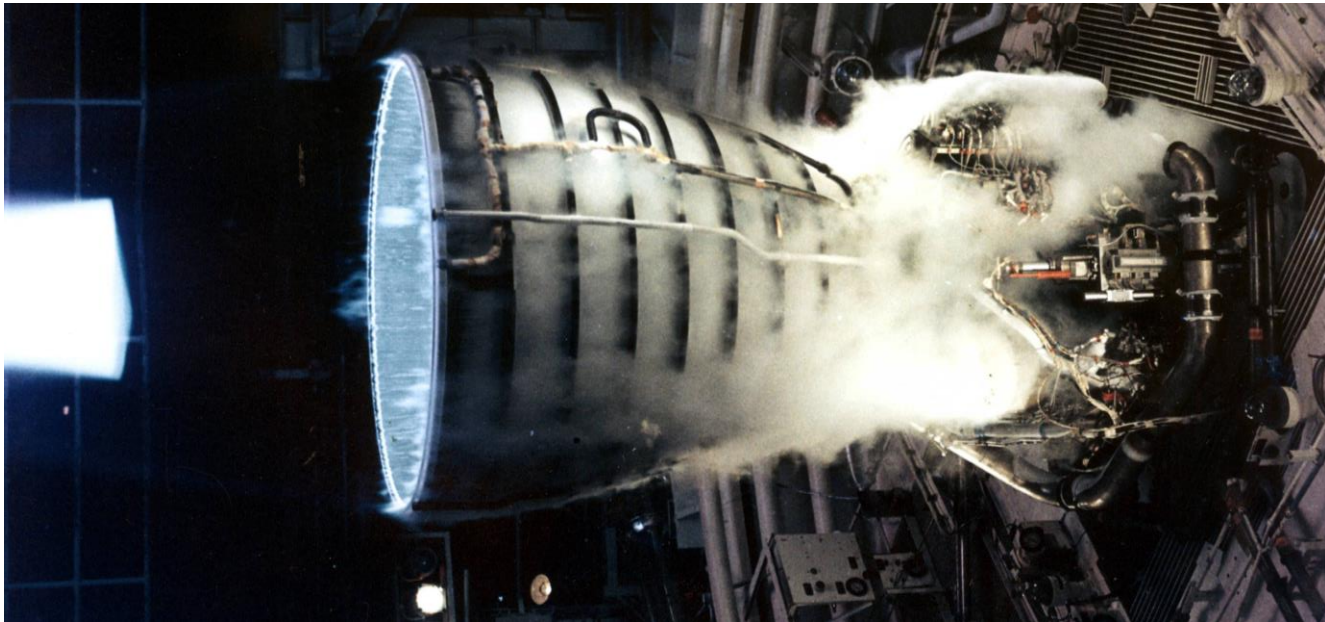
AA 2020-21



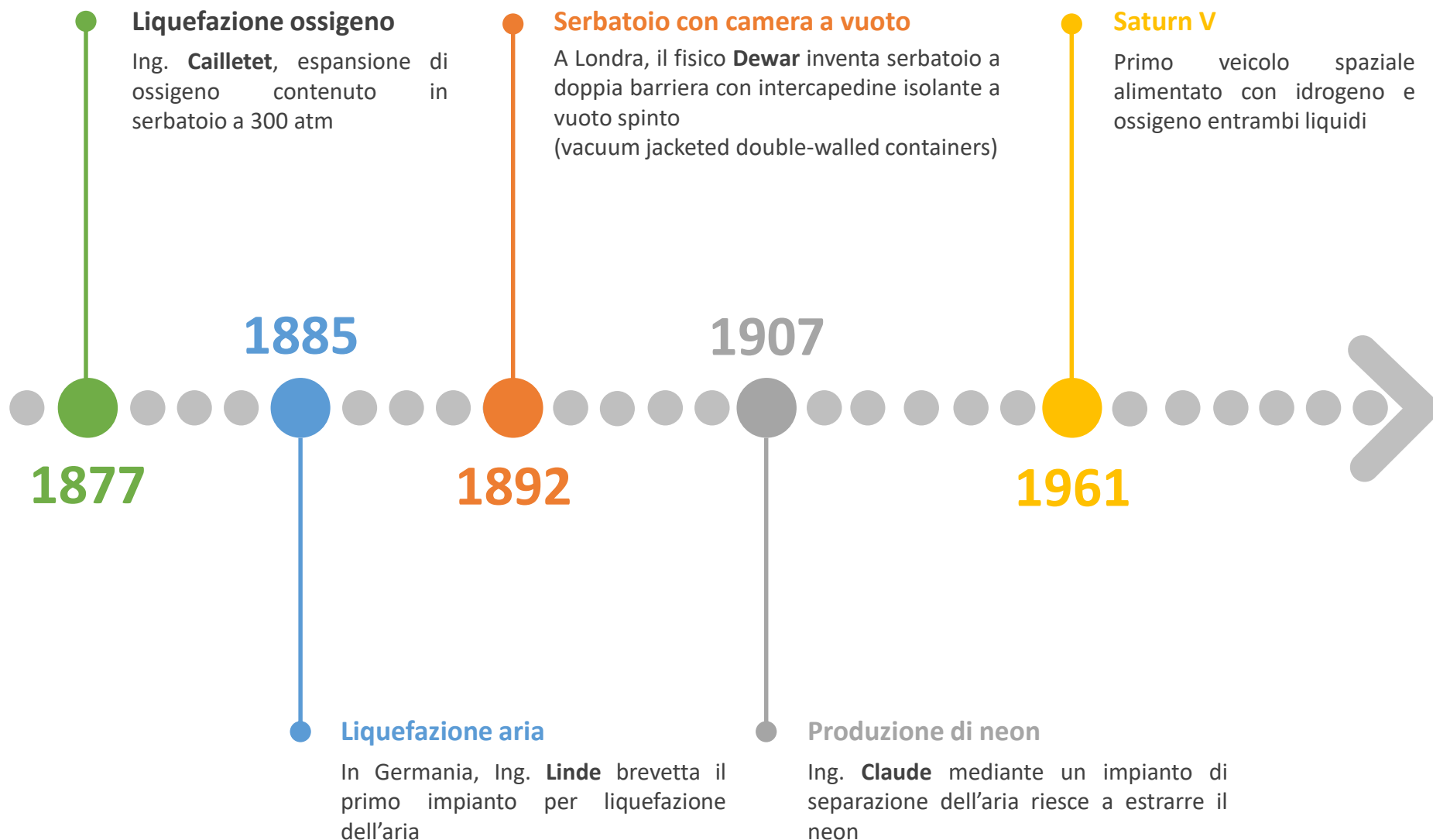
# Processi di liquefazione criogenica

- 01** Introduzione alla criogenia
- 02** Analisi termodinamica dei processi a bassa temperatura
- 03** Processi criogenici di liquefazione
- 04** Esercizi con strumento di calcolo (Python e CoolProp)

# 1. Introduzione alla criogenia



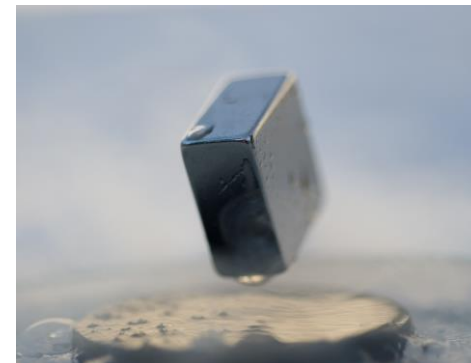
# Storia dell'ingegneria criogenica



# Aree di applicazione della criogenia

## Combustibile per i trasporti

Oltre ad essere trasportati, alcuni fluidi criogenici sono utilizzabili come combustibili. Essi sono stoccabili in forma liquida a bassa pressione, garantendo una buona densità energetica. Attualmente è molto diffuso l'utilizzo di LNG nell'ambito dei veicoli stradali e marittimi. Ottime possibilità risiedono nell'utilizzo di LH<sub>2</sub> che permetterebbe la riduzione delle emissioni di anidride carbonica.



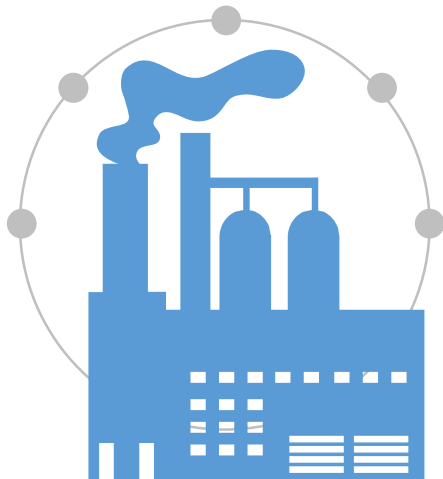
## Applicazioni all'industria spaziale

Attualmente i veicoli spaziali utilizzano combustibili criogenici per la propulsione spaziale. Ricerca punta a efficienza, robustezza, miniaturizzazione e affidabilità.



## Metallurgia criogenica

Alcuni materiali sono trattati con processi di tempra a bassa temperatura per migliorarne le caratteristiche fisico-tecnologiche.



## Cryobiology

Vi sono applicazioni che riguardano la chirurgia, la criopreservazione di embrioni e gameti, o la conservazione di tessuti e componenti del sangue.



## Superconduttività

Alle temperature criogeniche alcuni materiali presentano resistenza elettrica trascurabile. Grazie a tali proprietà, si stanno sviluppando nuovi sistemi per la trasmissione elettrica, computer ad alta velocità e migliori sistemi di comunicazione.

## 2. Analisi termodinamica dei processi a bassa temperatura



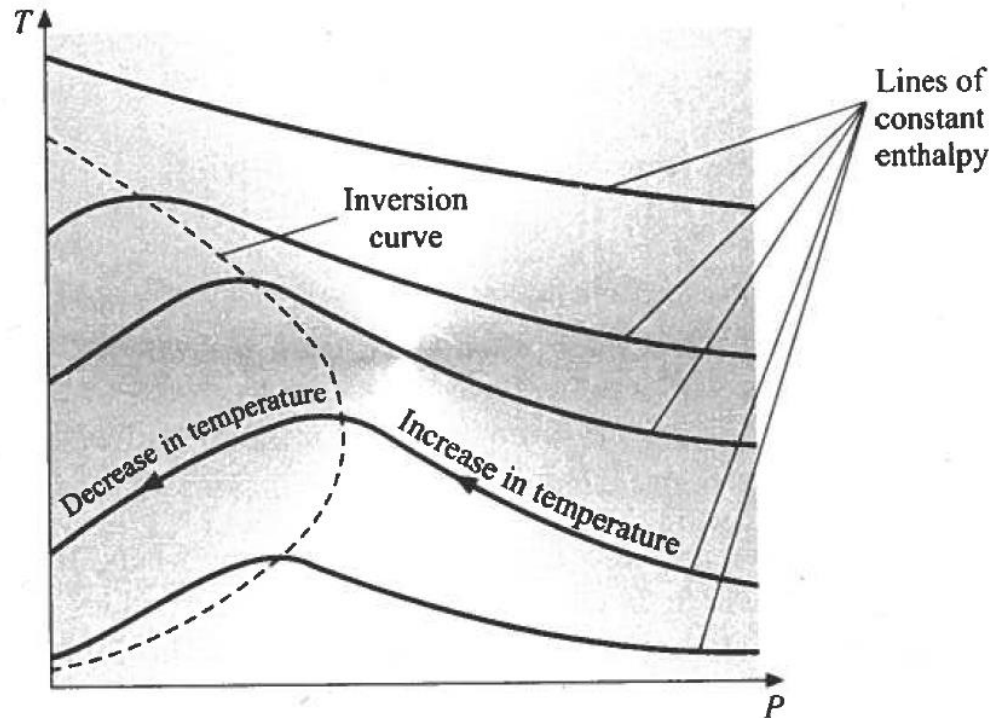
# Espansione di Joule-Thomson

Fluido subisce un'espansione isoentalpica attraverso un orificio o valvola semi chiusa. Non si produce lavoro ma vi è un aumento dell'entropia netta.

L'espansione J-T viene solitamente utilizzata nei cicli frigoriferi per abbassare la temperatura di un flusso di gas proporzionale al salto di pressione.

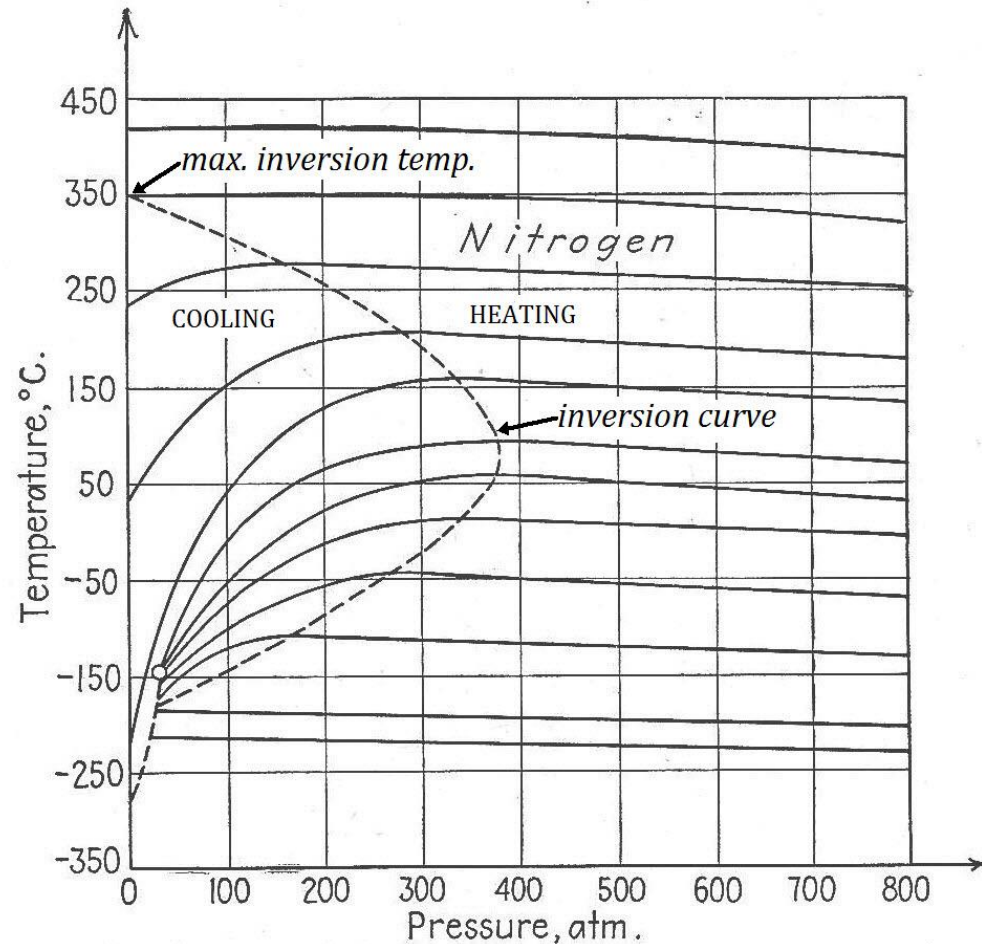
Processo di laminazione isoentalpica: caratterizzato da **coefficiente di J-T**

$$\mu_{JT} = \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_h$$



# Espansione di Joule-Thomson

$$\mu_{JT} = \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_h$$



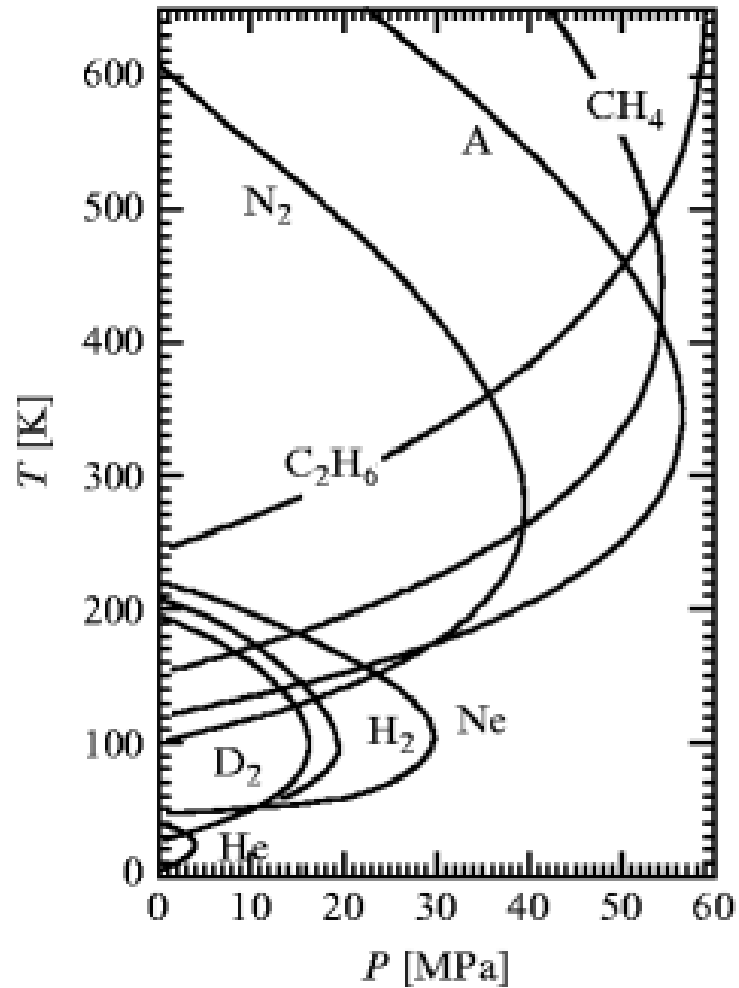
Isenthalpic curves and inversion curve for nitrogen



# Espansione di Joule-Thomson

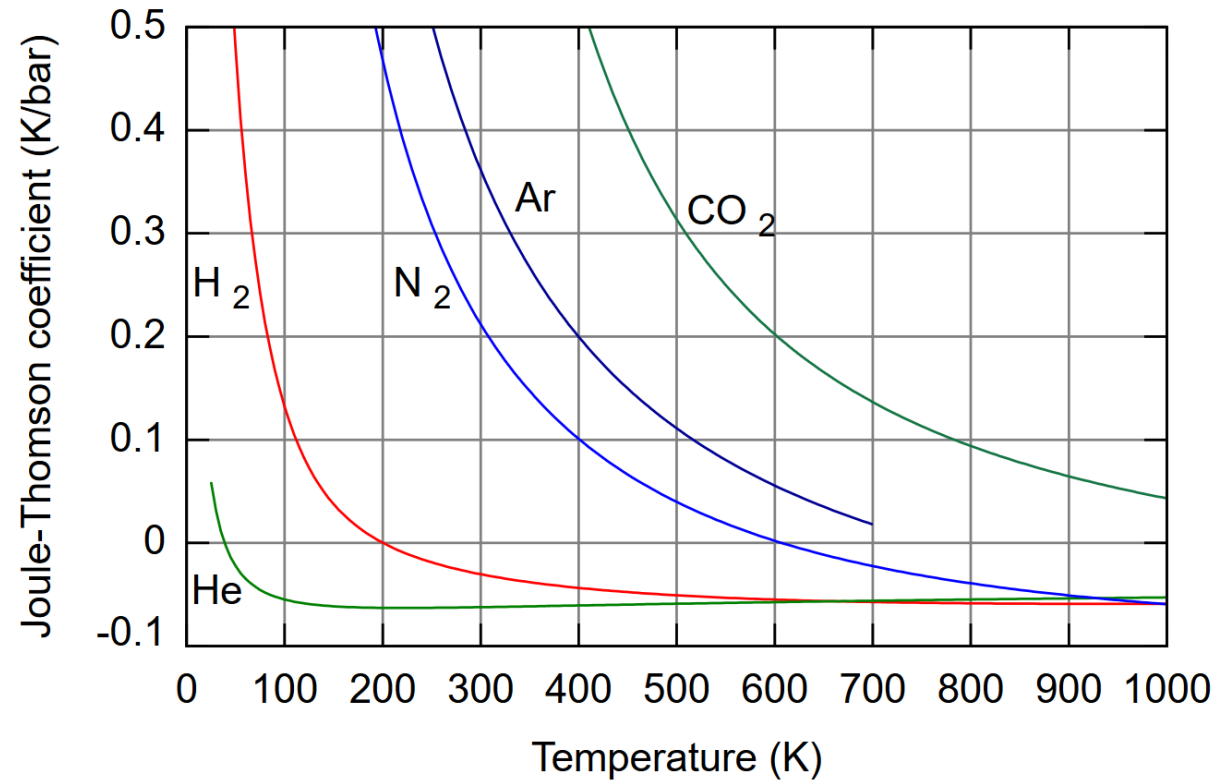
$$\mu_{JT} = \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_h$$

Gas	Maximum Inversion Temperature [K]
Helium-4	45
Hydrogen	205
Neon	250
Nitrogen	621
Air	603
Carbon monoxide	652
Argon	794
Oxygen	761
Methane	939
Carbon dioxide	1500
Ammonia	1994

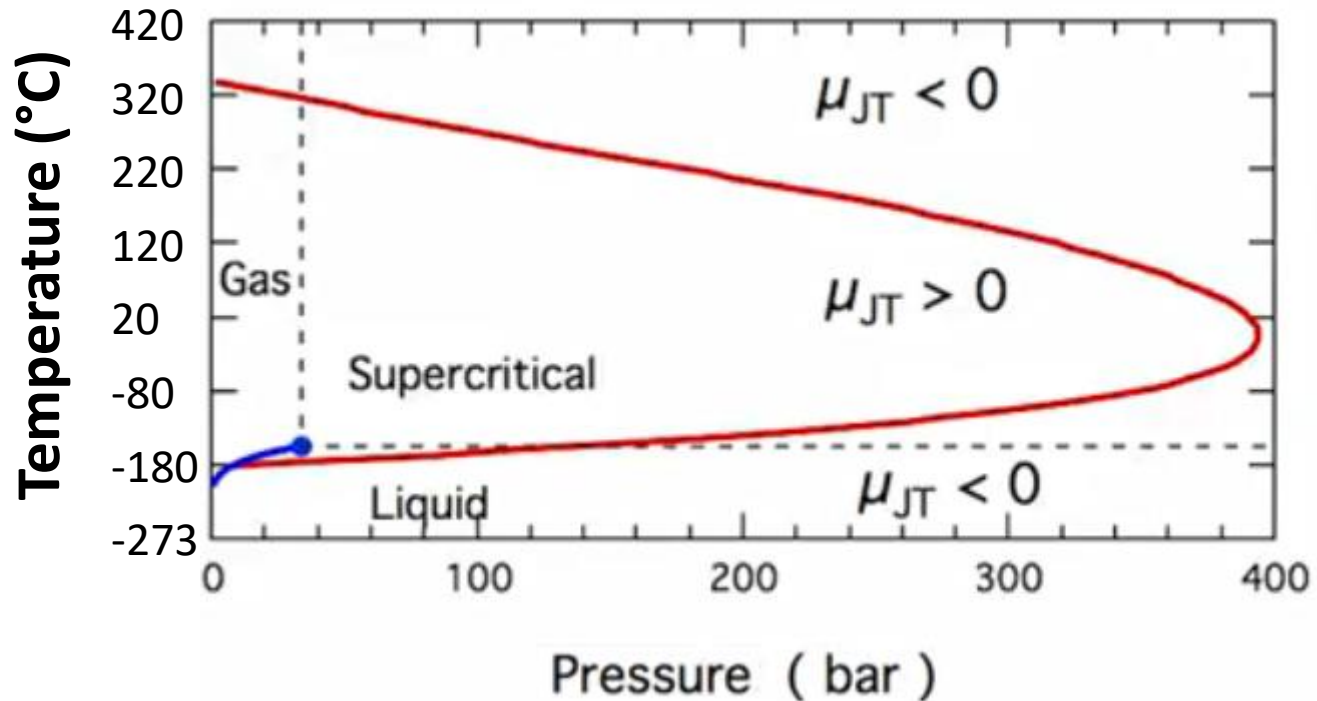


# Espansione di Joule-Thomson

$$\mu_{JT} = \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_h$$



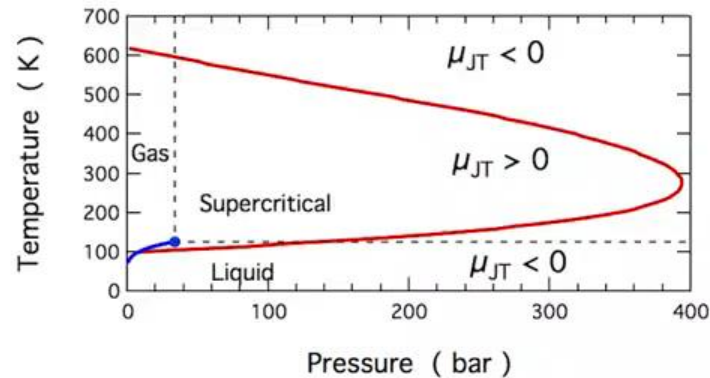
# Espansione di Joule-Thomson



# Espansione di Joule-Thomson

$$\Delta p = 7 \text{ bar} \longrightarrow \Delta T = 4 \text{ }^\circ\text{C}$$

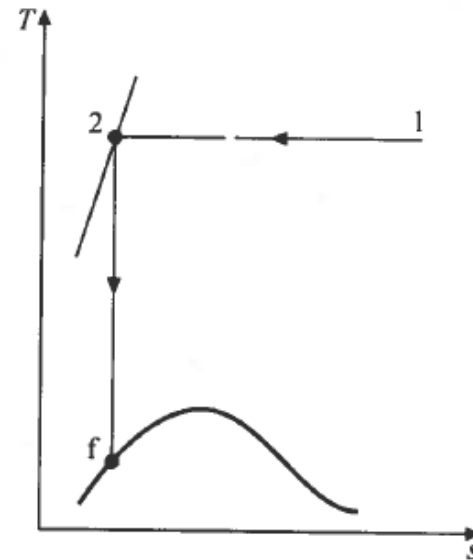
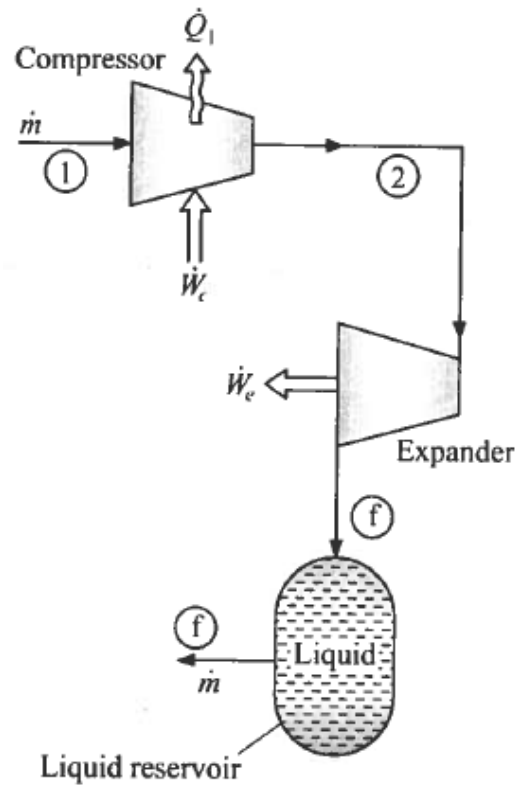
$$\begin{aligned} p_{in} &= 62 \text{ bar} \\ T_{in} &= 27 \text{ }^\circ\text{C} \\ p_{fin} &= 14 \text{ bar} \\ T_{fin} &= -1 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$



# 3. Processi criogenici di liquefazione

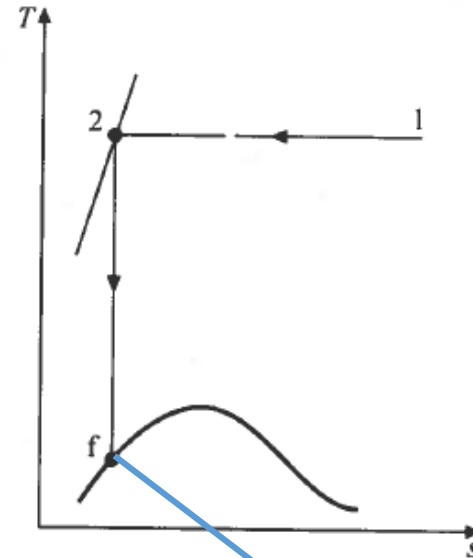
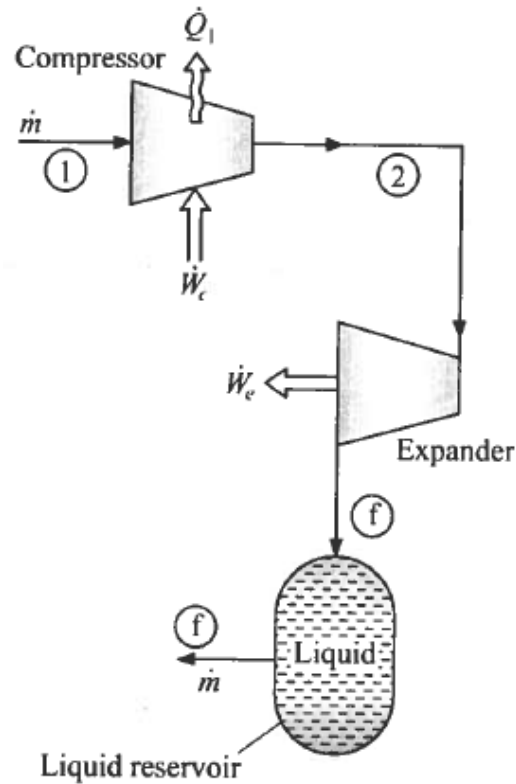


# Sistema ideale di liquefazione



1-2: Compressione isoterma (e rev.);  
2-f: Espansione isoentropica;

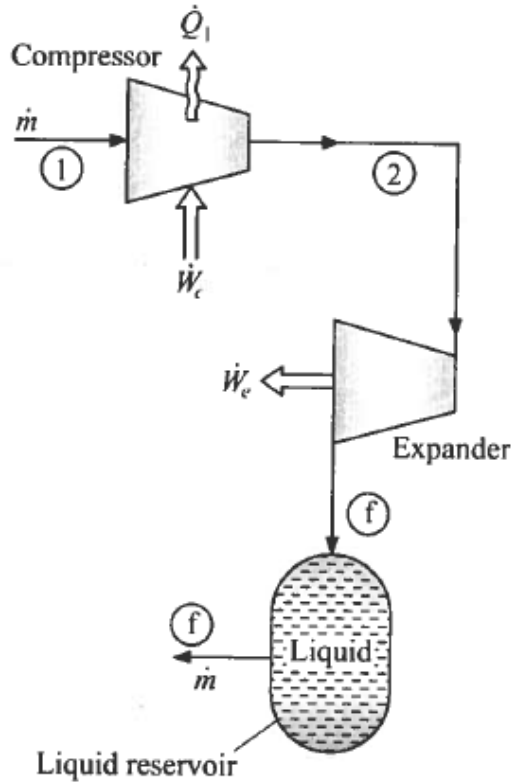
# Sistema ideale di liquefazione



Tutta la portata di fluido è liquefatta!  
(Punto f si trova sulla curva liquido saturo)

1-2: Compressione isoterma (e rev.);  
2-f: Espansione isoentropica;

# Sistema ideale di liquefazione



1) Utilizzando primo e secondo principio della termodinamica per sistemi aperti e flusso costante e continuo di gas otteniamo:

$$\dot{Q} - \dot{W}_i = \sum(\dot{m}_0 * h_0) - \sum(\dot{m}_i * h_i)$$

2) Il calore trasmesso Q per un processo isotermico e reversibile è definito come:

$$\dot{m} * T_1 * (s_2 - s_1) - \dot{W}_i = \dot{m} * (h_f - h_1)$$

3) Il lavoro ideale per unità di portata è uguale a:

$$s_2 = s_f \longrightarrow \text{Espansione isoentropica}$$

$$-\frac{\dot{W}_i}{\dot{m}} = T_1 * (s_1 - s_f) - (h_1 - h_f)$$



# Proprietà fluidi criogenici

Obiettivo: descrivere i processi e sistemi di refrigerazione disponibili per la produzione basse temperature, dalle condizioni ambientali a temperature prossime allo zero assoluto.

Gas	Punto di ebollizione (K)	Lavoro minimo di liq. (1 atm)		Lavoro minimo di liquefazione (1 atm) (kJ/kg)
		Calore Sens.	Calore Lat.	
		(kJ/kg)		
Elio	3.19	6091	1488	8389
<b>Idrogeno</b>	<b>20.27</b>	<b>6100</b>	<b>6090</b>	<b>12190</b>
Neon	27.09	482	859	1341
Azoto	77.36	197	580	777
Aria	78.8	-	-	739
Argon	87.28	-	-	479
Ossigeno	90.18	133	498	631
<b>Metano</b>	<b>111.7</b>	<b>277</b>	<b>870</b>	<b>1147</b>
Etilene	169.4	75	396	471
Etano	184.5	-	-	353

# Lavoro minimo per la liquefazione

F.O.M. (Figure Of Merit) = rapporto tra il lavoro ideale di liquefazione e quello reale

$$FOM = \frac{-W_i}{-W_l}$$

Il lavoro ideale viene utilizzato come base per migliorare le performance dei sistemi reali di liquefazione.

$$-W_i = T_0 * (s_1 - s_f) - (h_1 - h_f)$$

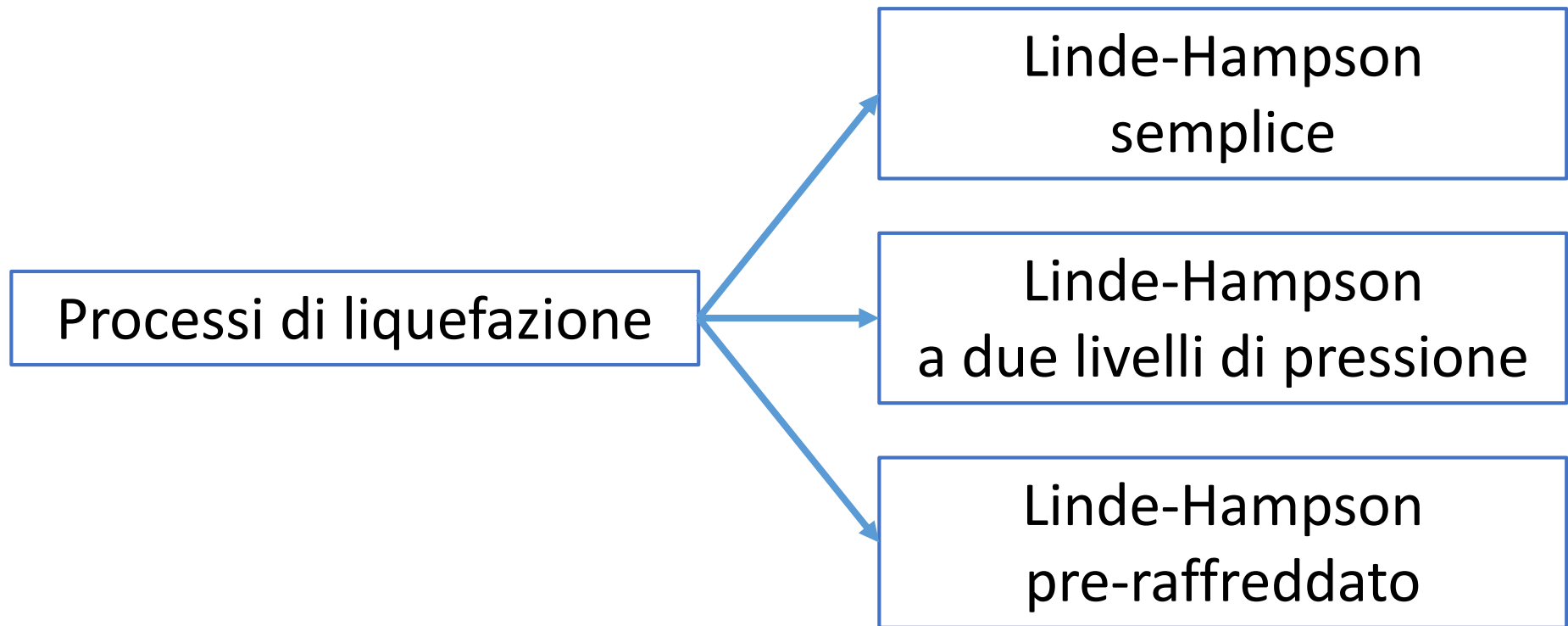
  $T_0 = \text{temp. ambiente}$

Il lavoro reale risulterà molto maggiore rispetto a quello ideale a causa delle **limitazioni termodinamiche** e dalle **irreversibilità di processo**.

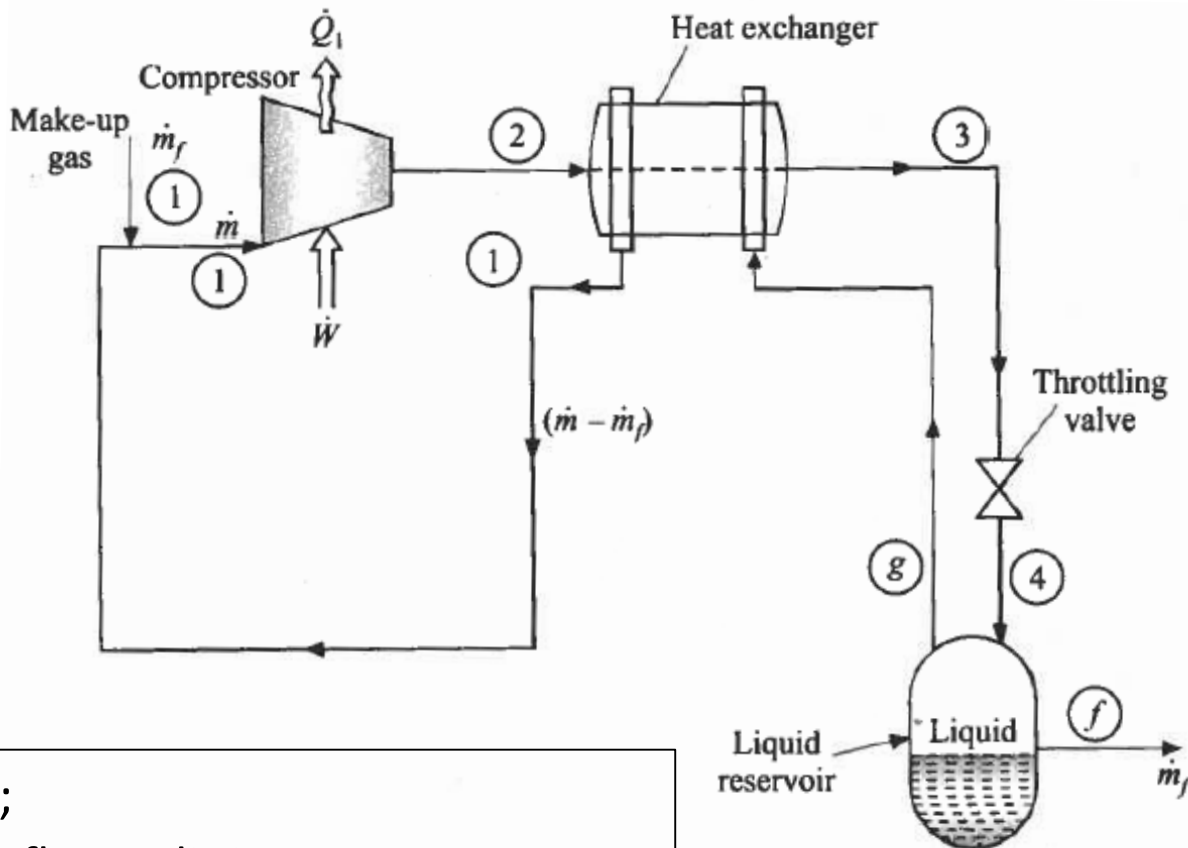
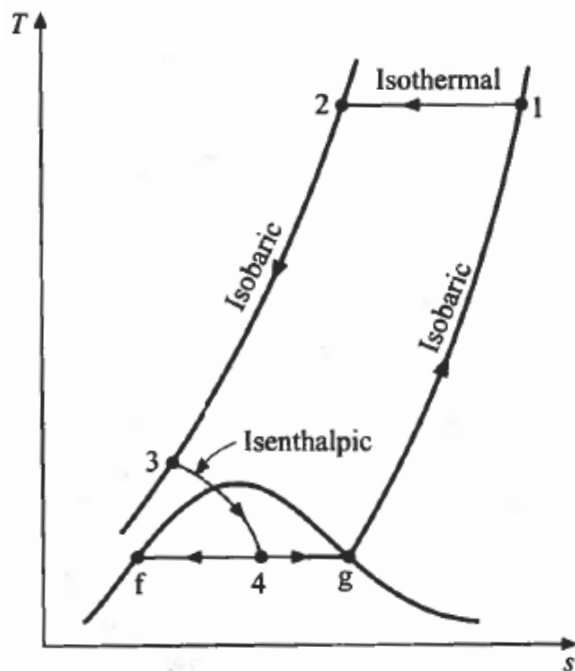
# Processi di liquefazione per azoto, argon e ossigeno

Tali processi si basano sull'utilizzo dell'espansione di Joule-Thomson, sfruttando efficientemente lo scambio termico tra flussi a differente temperatura.

L'espansione J-T facilita l'abbassamento della temperatura al di sotto del limite imposto dal coefficiente di J-T. Per questo motivo, alcuni gas devono essere pre-raffreddati prima di essere laminati (espansi).

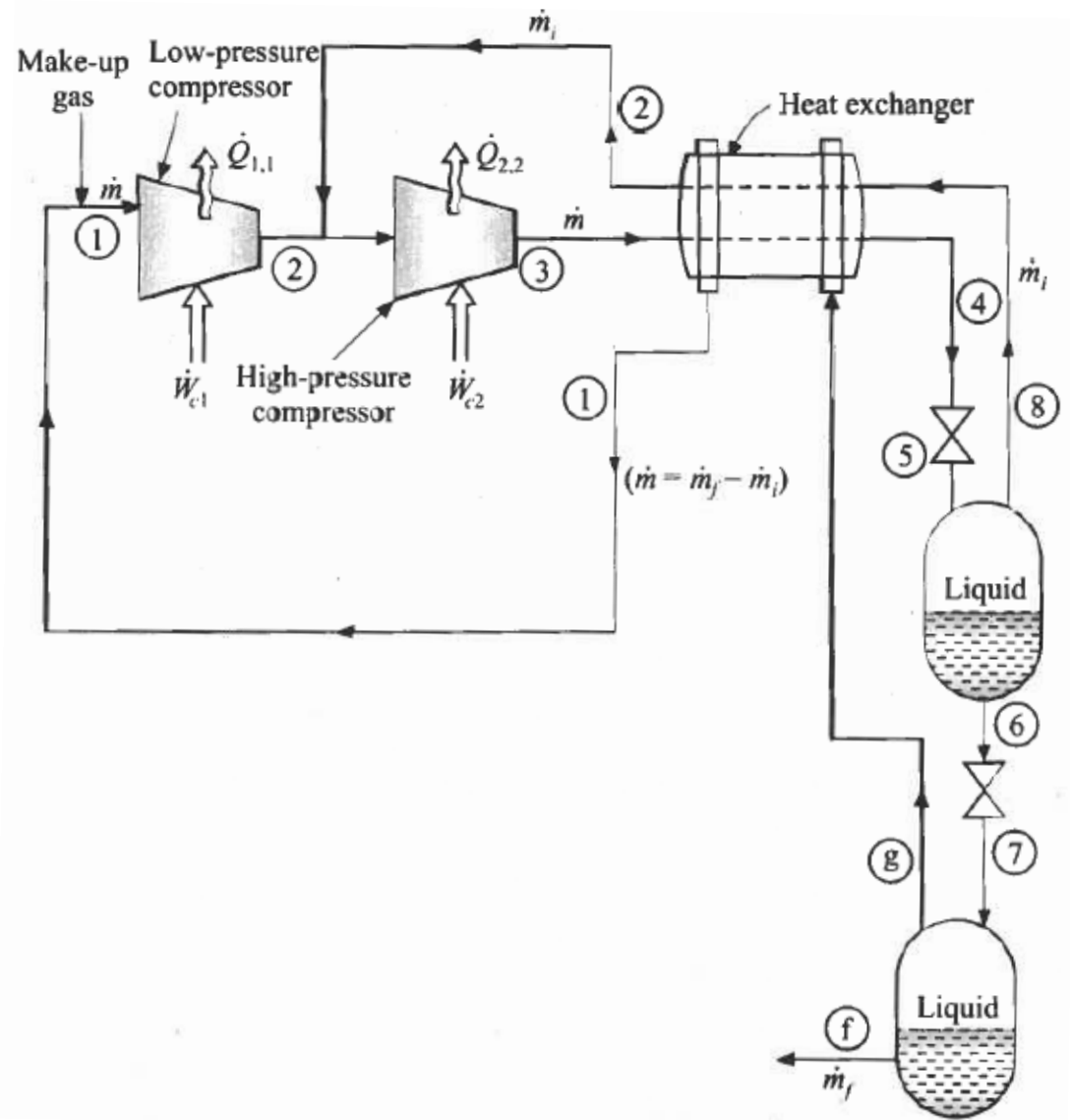
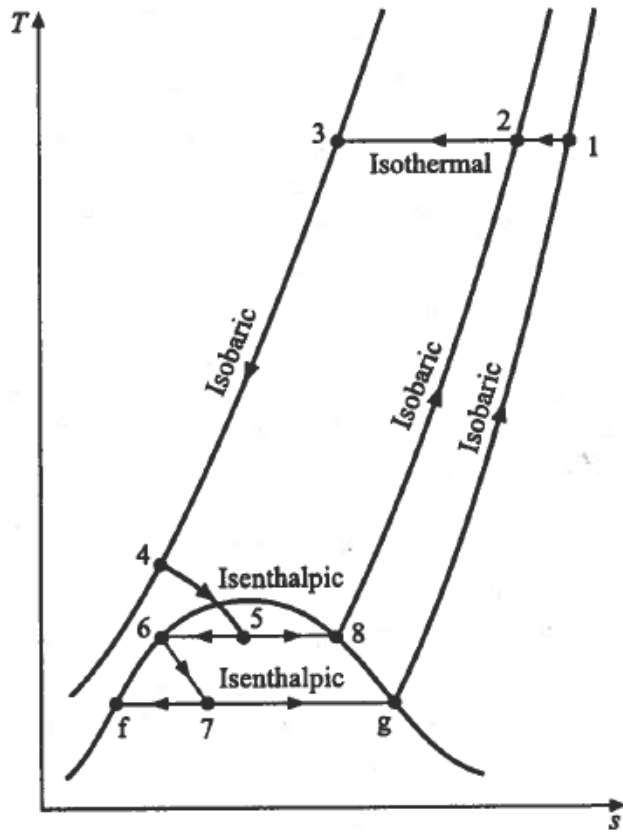


# Processo semplice di Linde-Hampson

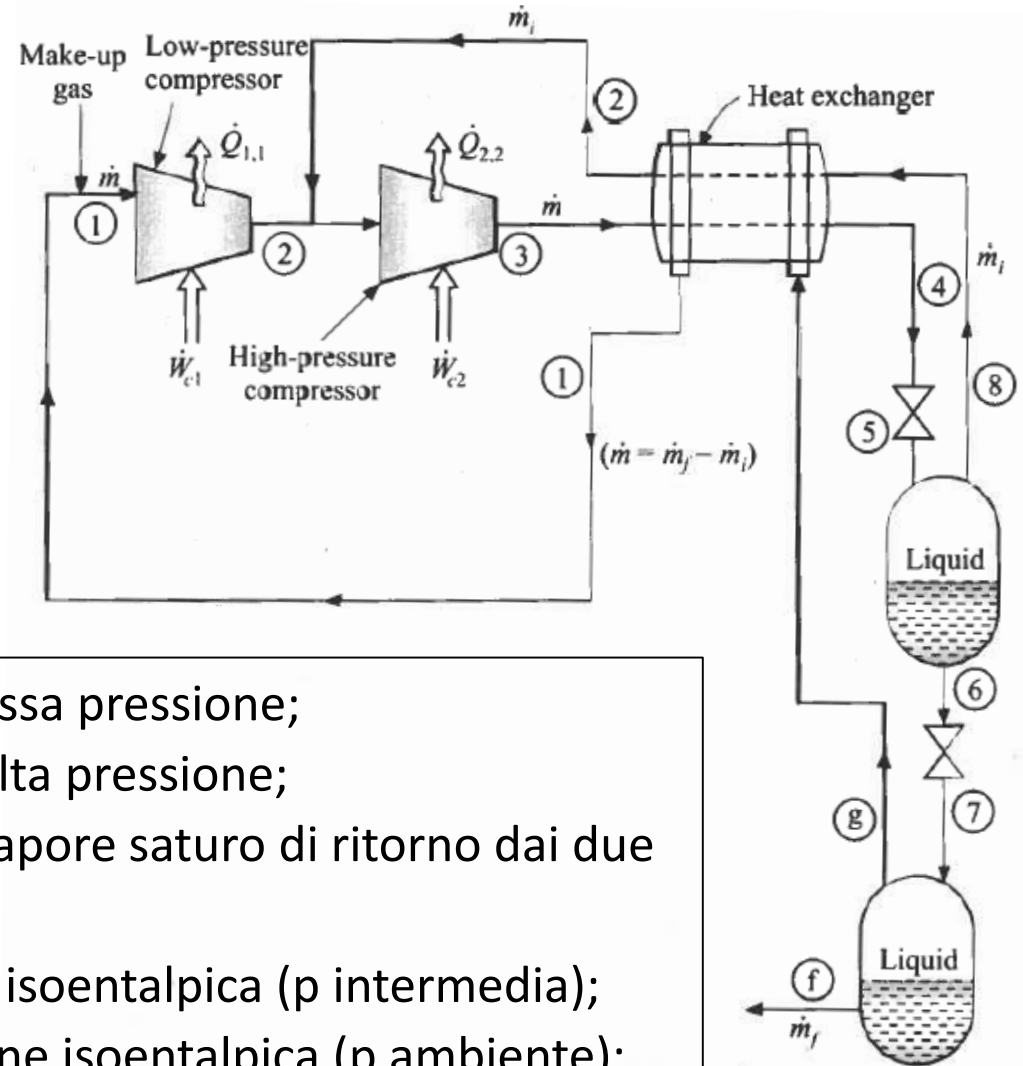
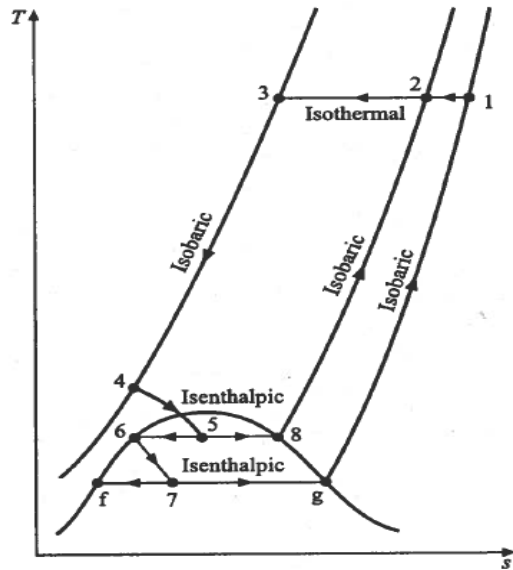


- 1-2: Compressione isoterma;
- 2-3: Pre-raffreddamento con flusso di ritorno;
- 3-4: Laminazione isoentalpica;
- 4-g: Separazione vapore saturo;
- 4-f: Separazione liquido saturo;
- g-1: Vapore saturo scambia calore e viene riportato a  $T_{amb}$

# Processo di Linde-Hampson a due pressioni

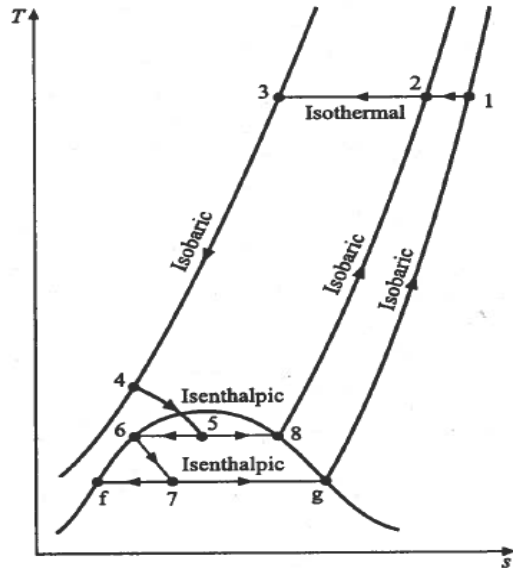


# Processo di Linde-Hampson a due pressioni



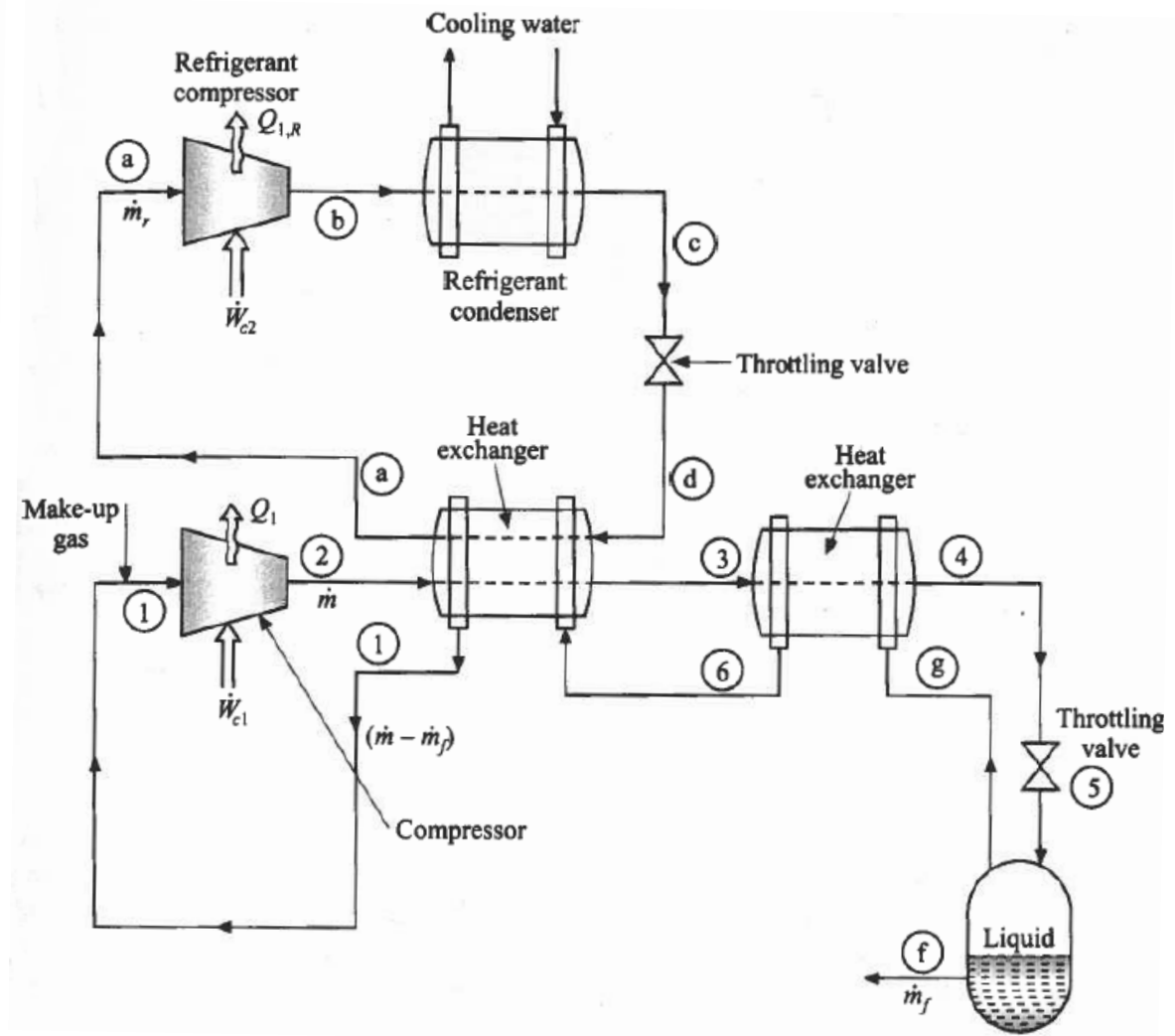
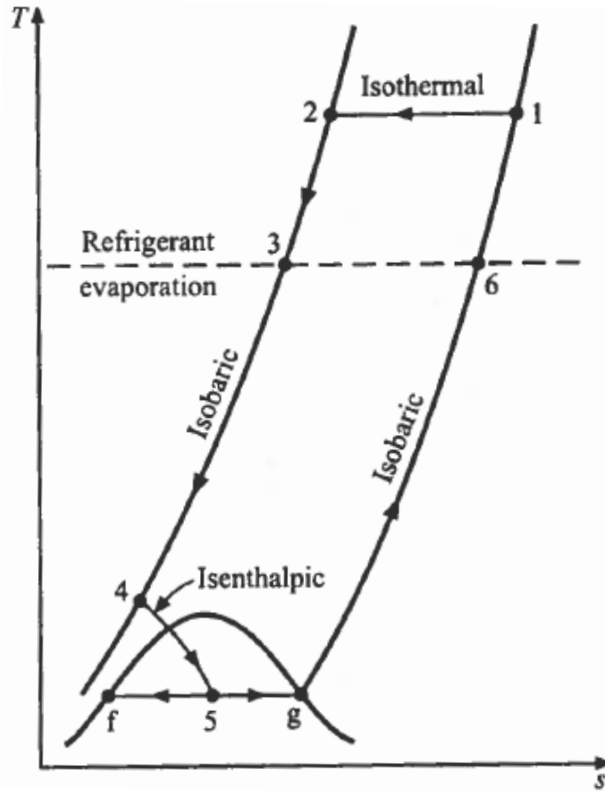
- **1-2:** Compressione isoterma a bassa pressione;
- **2-3:** Compressione isoterma ad alta pressione;
- **3-4:** Raffreddamento mediante vapore saturo di ritorno dai due separatori adiabatici;
- **4-5:** Primo stadio di laminazione isoentalpica (p intermedia);
- **6-7:** Secondo stadio di laminazione isoentalpica (p ambiente);
- **5-8:** Separazione vapore saturo dal primo separatore;

# Processo di Linde-Hampson a due pressioni



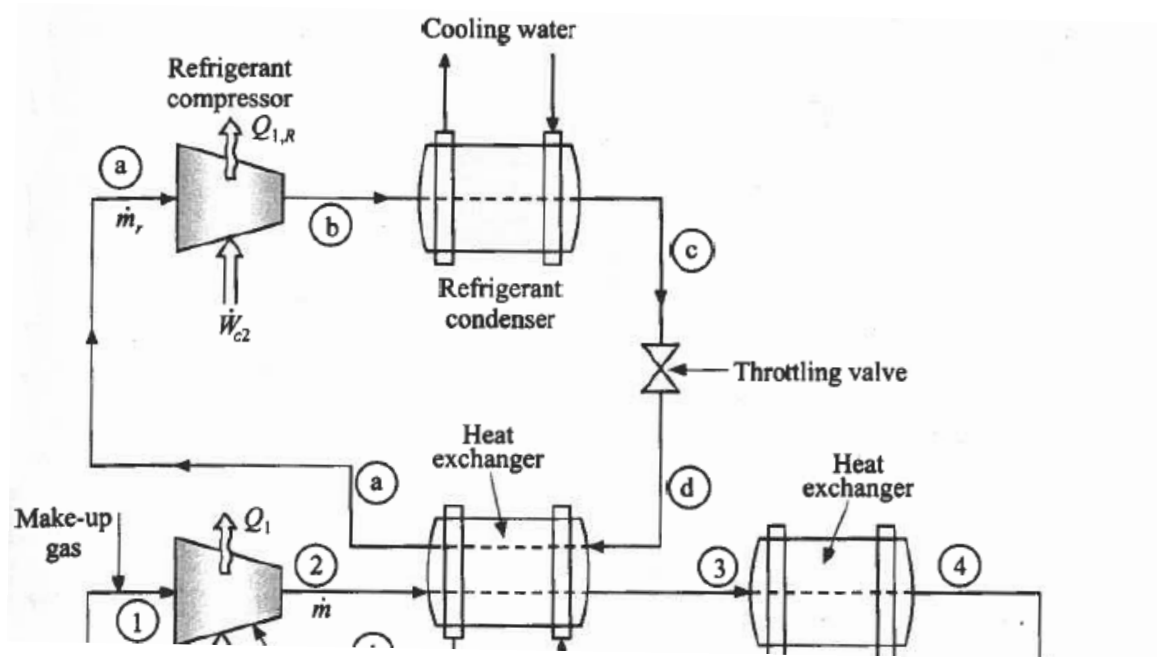
- **7-g:** Separazione di vapore saturo dal secondo separatore;
- **5-6:** Separazione di liquido saturo dal primo separatore;
- **7-f:** Separazione di liquido saturo dal secondo separatore;
- **g-1:** Raffreddamento a pressione ambiente con ritorno di vapore saturo, da 3-4;
- **8-2:** Raffreddamento a pressione intermedia con ritorno di vapore saturo, da 3-4;

# Processo di Linde-Hampson pre-raffreddato



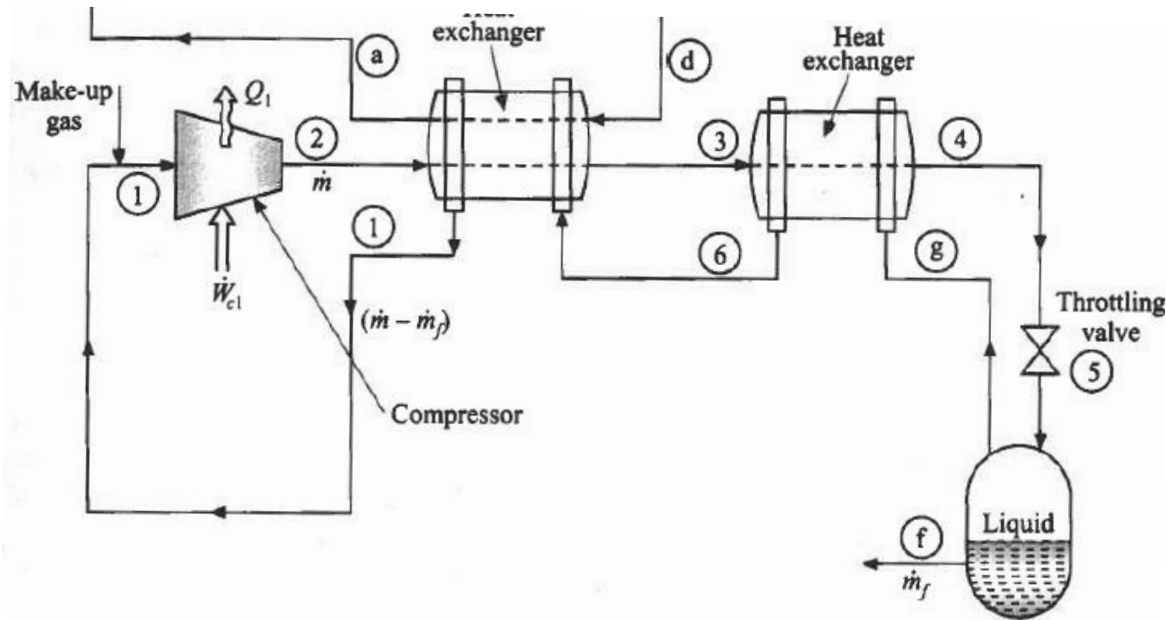


# Processo di Linde-Hampson pre-raffreddato



- **a-b**: Compressione del vapore saturo del refrigerante;
- **b-c**: Raffreddamento e condensazione ad alta pressione con utilizzo di acqua di raffreddamento;
- **c-d**: Laminazione isoentalpica (J-T);
- **d-a**: Evaporazione del refrigerante per preraffreddare il gas da 2 a 3;

# Processo di Linde-Hampson pre-raffreddato

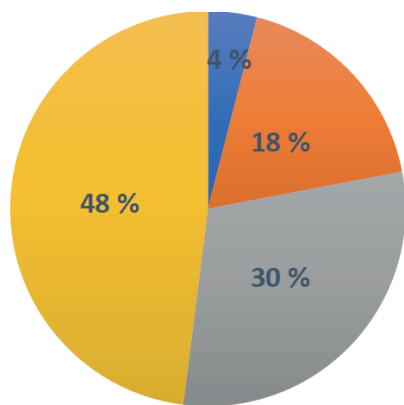
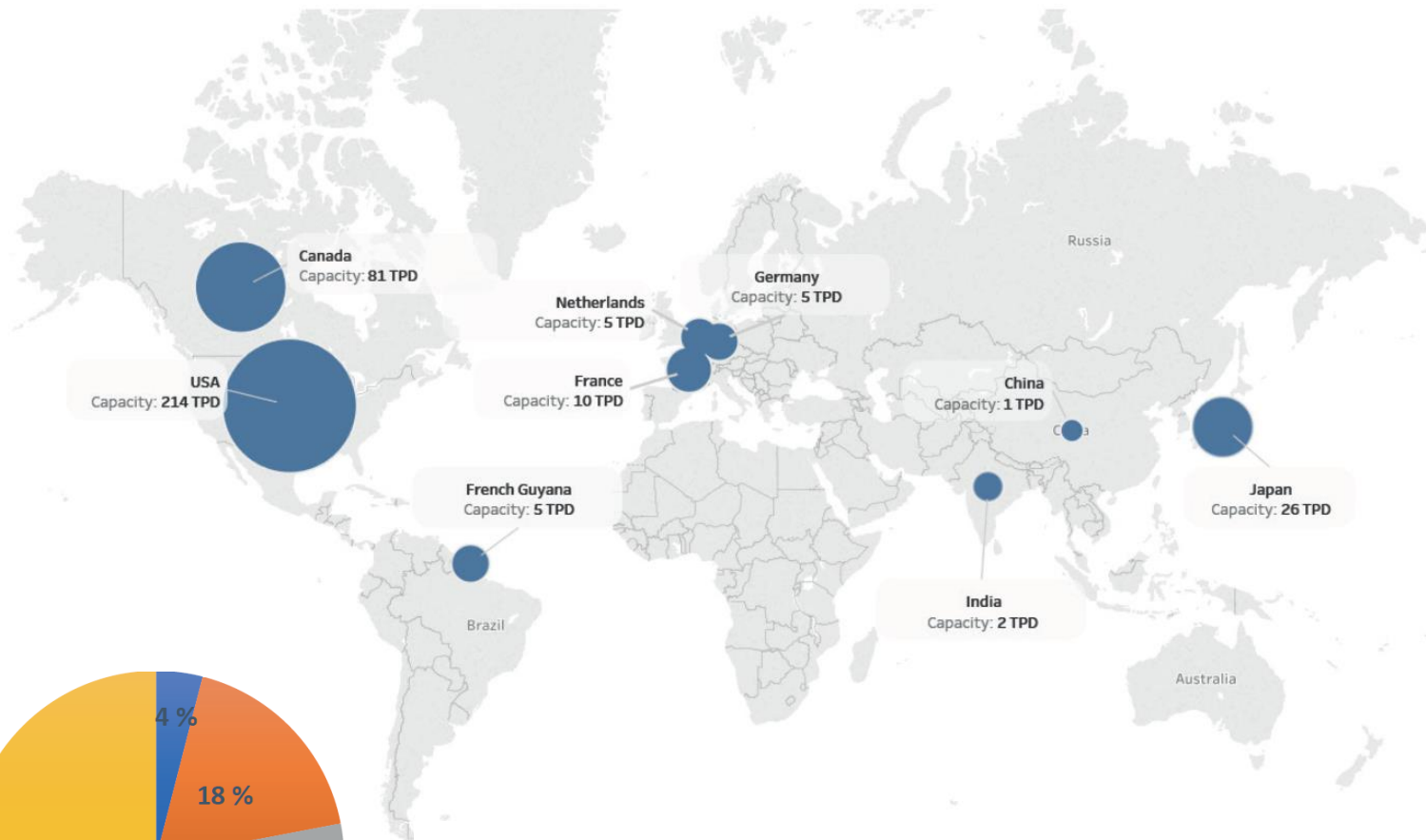


- **1-2:** Compressione isoterma;
- **2-3:** Flusso preraffreddato da refrigerante e flusso di ritorno;
- **3-4:** Raffreddamento mediante vapore saturo di ritorno;
- **4-5:** Laminazione isoentalpica;
- **5-f/g:** Separazione in liquido saturo (vapore saturo);
- **g-6:** Vapore saturo raffredda flusso di gas da 3-4;
- **6-1:** Vapore di uscita raffredda flusso di gas da 2-3.

# Liquefazione dell'idrogeno

- 1. Temperatura massima di inversione di 204 K:**
  - a) Necessario raffreddamento da sorgente esterna prima di laminare il flusso di gas;
- 2. Contiene impurità volatili che devono essere estratte:**
  - a) Contiene, per esempio, metano, ossigeno e azoto;
  - b) Utilizzo di gel di silice o carboni attivi per rimuoverle a temperatura dell'azoto liquido;
- 3. Conversione da orto-idrogeno a para-idrogeno:**
  - a) **Lenta**, sarà necessario l'utilizzo di catalizzatori metallici (ossido di cromo in supporto di alluminio o gel di idrossido di ferro granulare);
  - b) **Esotermica**, sarà necessario estrarre calore a bassa temperatura;

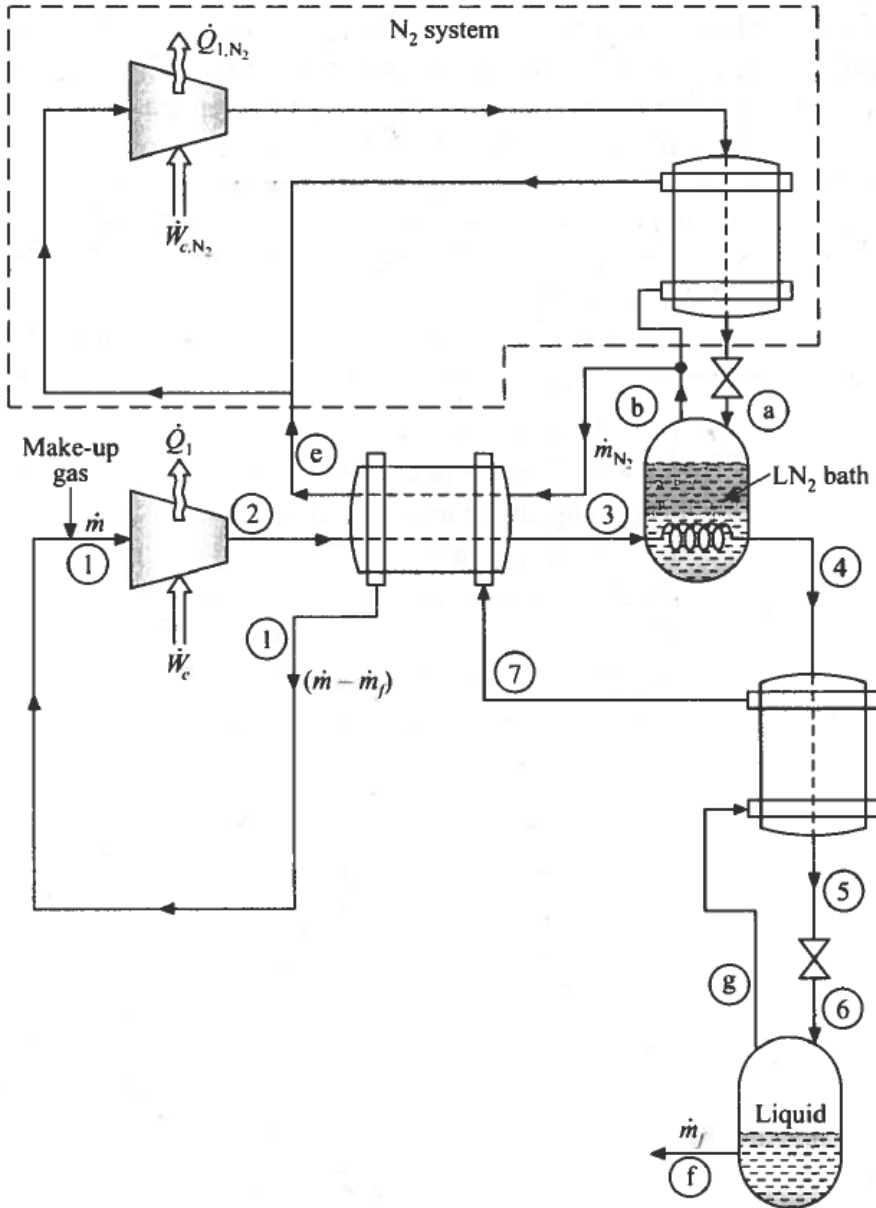
# Liquefazione dell'idrogeno



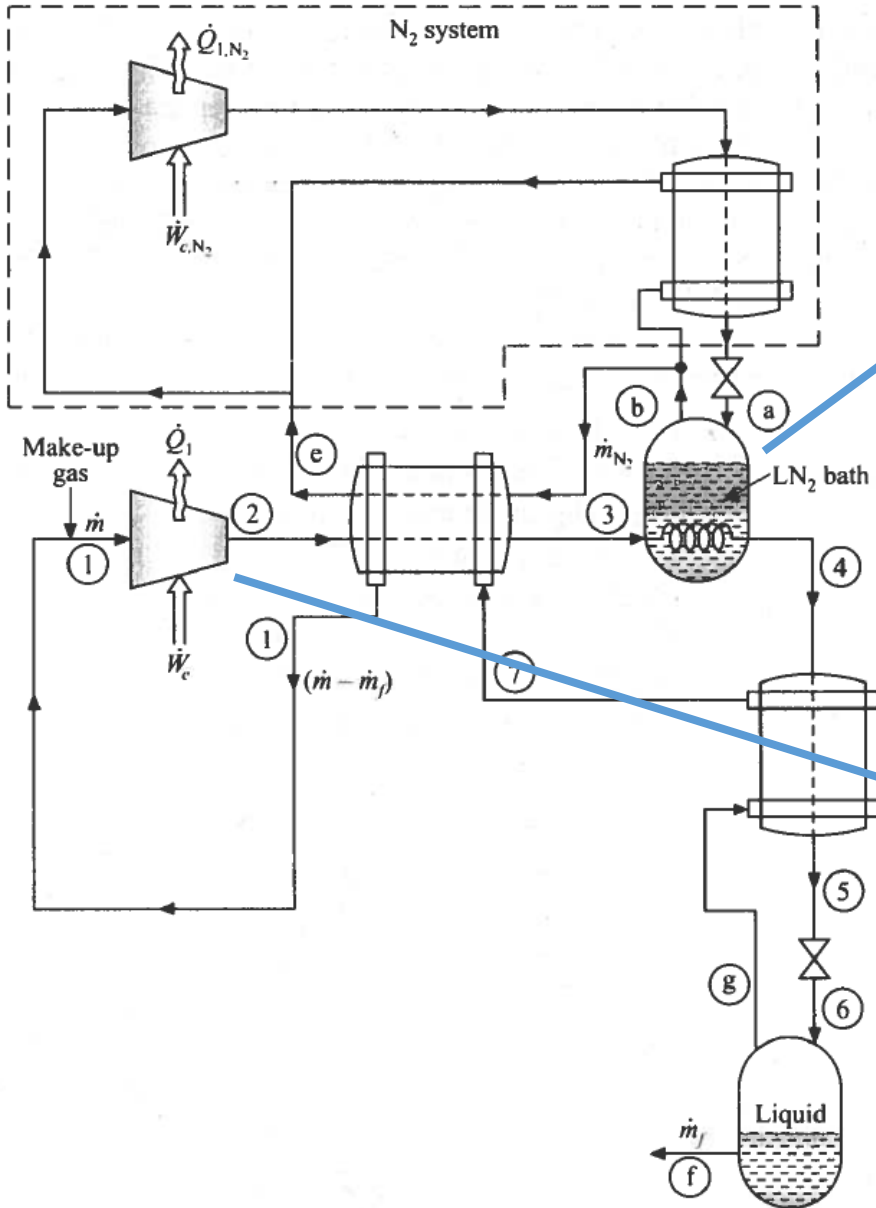
Producer	City	Country	Process	Capacity (Nm <sup>3</sup> /day)	Capacity ton/day	Year Opened
Air Liquide	Waziers	France	SMR	4 864	10	1987
Air Products	Rotterdam/Rosenberg	Netherlands	SMR	2 502	5	1990
Linde	Leuna	Germany	SMR	2 038	5 (10)	2007

■ Electrolysis ■ Coal gasification ■ Oil-based ■ Natural Gas Reforming

# Processo di Linde-Hampson pre-raffreddato



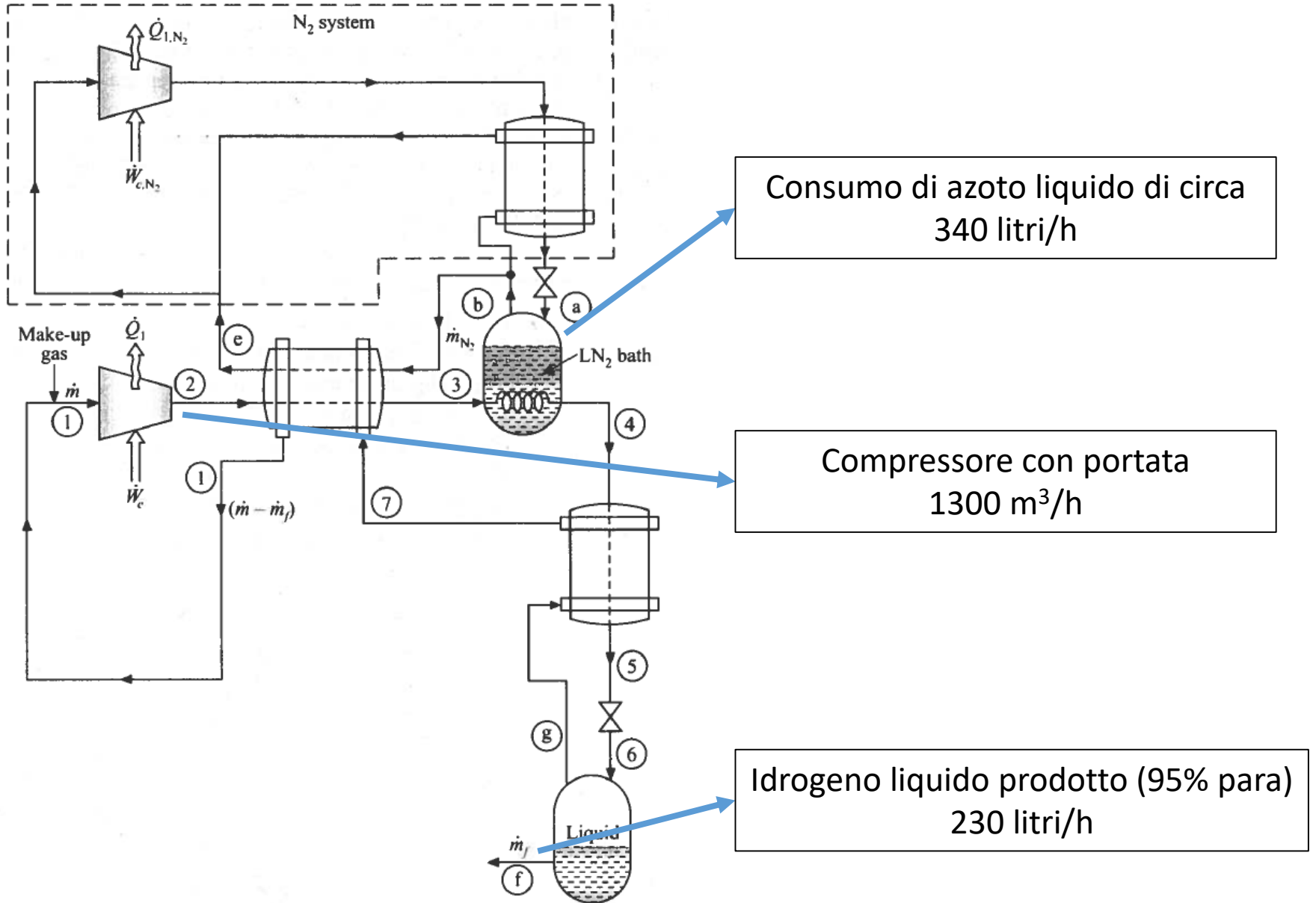
# Processo di Linde-Hampson pre-raffreddato



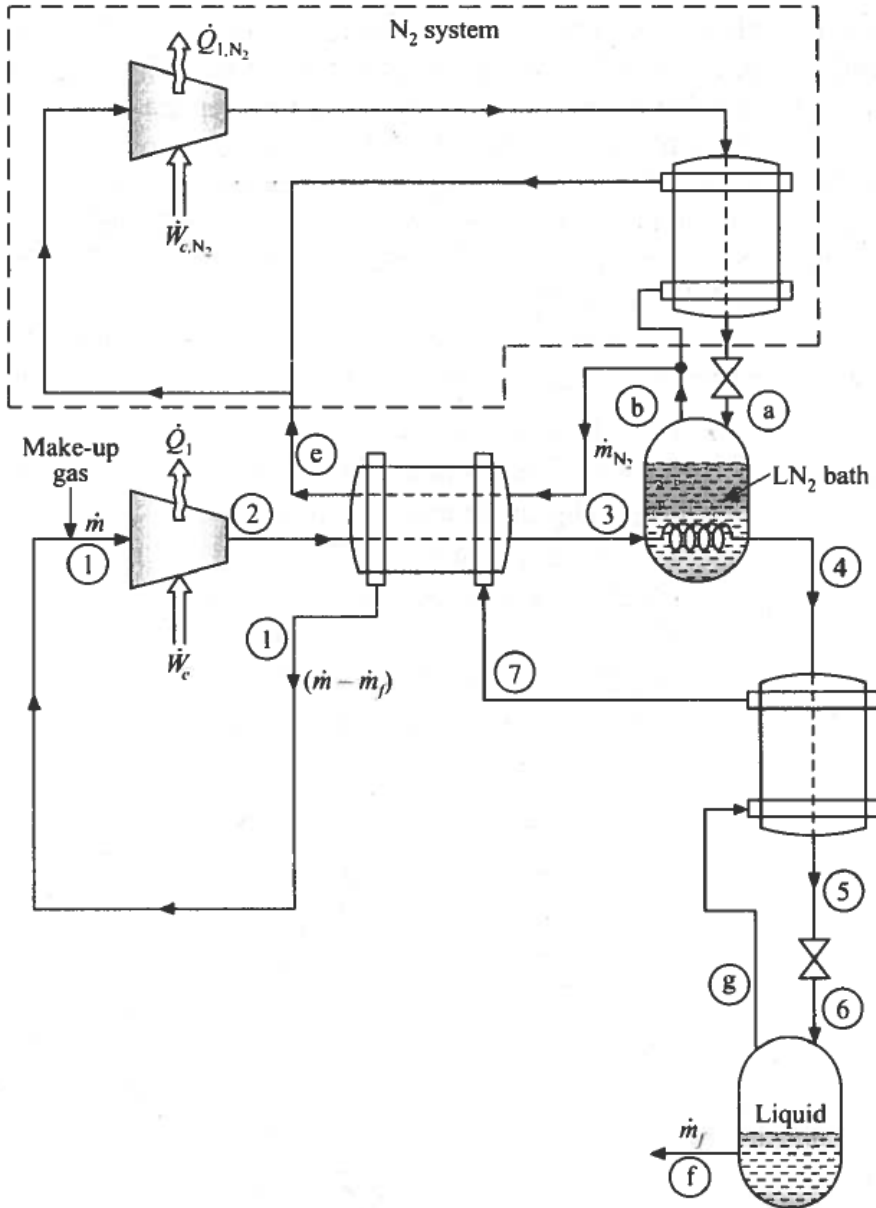
Azoto si trova allo stato liquido a  $T=66\text{ K}$  e  $p=0.2\text{ bar}$

Compressione di idrogeno fino a circa 100 bar

# Processo di Linde-Hampson pre-raffreddato



# Processo di Linde-Hampson pre-raffreddato



$$z = \frac{\dot{m}_{N_2}}{\dot{m}_{H_2}} = 1.3952 \frac{g_{N_2}}{g_{H_2}}$$



# Processo di Linde-Hampson pre-raffreddato

Lavoro ideale di liquefazione:

$$W_L = \Delta H * \frac{(T_{amb} - T_c)}{T_c}$$

$$W_L = W_{raff} + W_{conv} + W_{cond}$$

Lavoro ideale  $\rightarrow W_L = 11.62 \frac{MJ}{kg} = 3.228 \frac{kWh}{kg}$

Lavoro reale  $\rightarrow W_{Lr} = 30 \frac{MJ}{kg} = 8.3 \frac{kWh}{kg}$

$\approx 25\%$  del calore specifico dell'idrogeno

# Processo di Linde-Hampson pre-raffreddato



LEUNA (Germania)



Produzione = 5 ton<sub>LH2</sub>/giorno

Costo di investimento = 25 milioni €

Consumo = 11.9 kWh/kg<sub>LH2</sub>

# 4. Esercizi con strumento di calcolo (Python e CoolProp)



# Esercizio 1: Linde-Hampson semplice

Utilizziamo un ciclo di Linde-Hampson semplice per liquefare azoto ( $N_2$ ). Calcolare la frazione di liquido e il lavoro reale di liquefazione al variare della pressione  $p_2$ .

*Dati iniziali:*

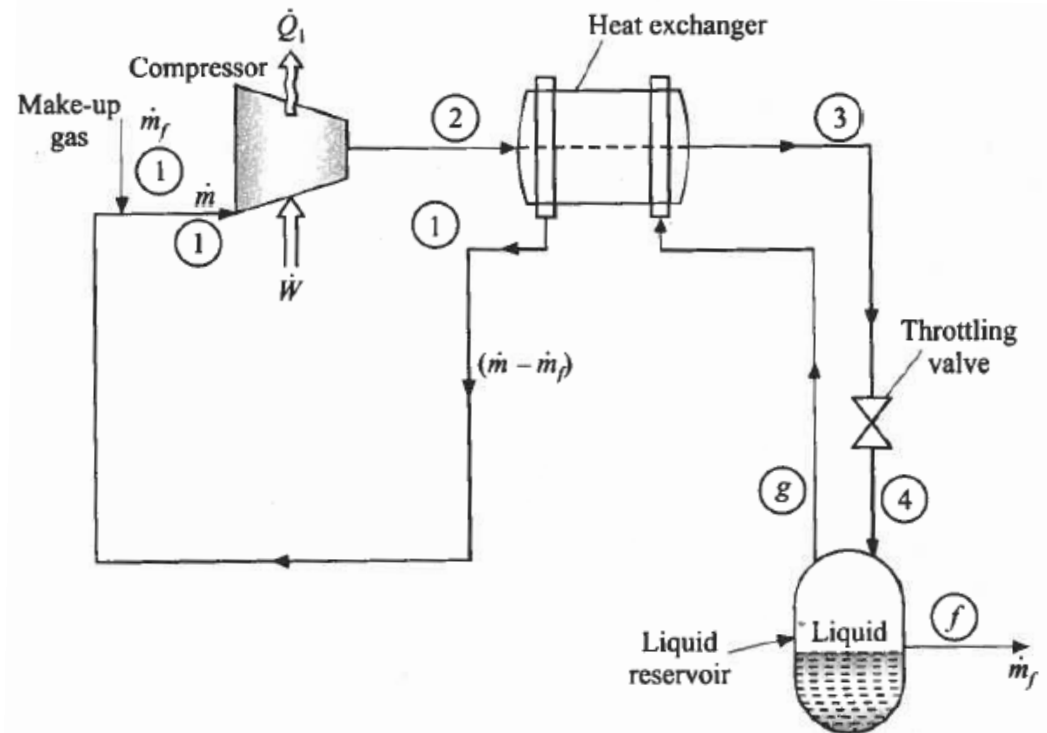
$$T_{amb} = T_1 = 300 \text{ K}$$

$$p_{amb} = p_1 = 1 \text{ atm}$$

$$\Delta T_{appr} = T_2 - T_1 = 5 \text{ K}$$

$$p_f = 1 \text{ atm}$$

$$T_f = 77 \text{ K}$$



# Esercizio 1: Linde-Hampson semplice

- 1) Aprite un nuovo script;
- 2) Salvatelo come «Esercizio\_1»;
- 3) Importare i pacchetti che dobbiamo utilizzare;
- 4) Scriviamo i dati del problema.

```
1|#Packages
2 from CoolProp.CoolProp import *
3
4#Dati del problema
5 T1=300 #Kelvin
6 p1=1 #atmosfera
7 delta_appr=5 #Kelvin
8 pf=1 #atmosfera
9 Tf=77 #Kelvin
```

# Esercizio 1: Linde-Hampson semplice

- 1) Aprite un nuovo script;
- 2) Salvatelo come «Esercizio\_1»;
- 3) Importare i pacchetti che dobbiamo utilizzare;
- 4) Scriviamo i dati del problema.

```
1|#Packages
2 from CoolProp.CoolProp import *
3
4#Dati del problema
5 T1=300 #Kelvin
6 p1=1 #atmosfera
7 delta_appr=5 #kelvin
8 pf=1 #atmosfera
9 Tf=77 #Kelvin
```

**Importa da CoolProp tutte le funzioni disponibili**

# Esercizio 1: Linde-Hampson semplice

- 5) Fisso p2;
- 6) CoolProp richiede le pressioni in Pascal. Andiamo a convertire i nostri dati;

```
17 #Fisso p2
18 print('Fino a che pressione comprimo azoto?')
19 print('p2 in [atm]')
20 p2=float(input(''))
21
22 #Converto le pressioni
23 c_Pa=101325
24 p1=p1*c_Pa
25 pf=pf*c_Pa
26 p2=p2*c_Pa
27
```

# Esercizio 1: Linde-Hampson semplice

- 7) Funzione «PropsSI» di CoolProp;
- 8) Calcolo le proprietà termodinamiche nelle condizioni 1;

```
19 #Calcolo proprietà termodinamiche
20 h1=PropsSI('H', 'T', T1, 'P', p1, 'Nitrogen')
21
22 s1=PropsSI('S', 'T', T1, 'P', p1, 'Nitrogen')
```

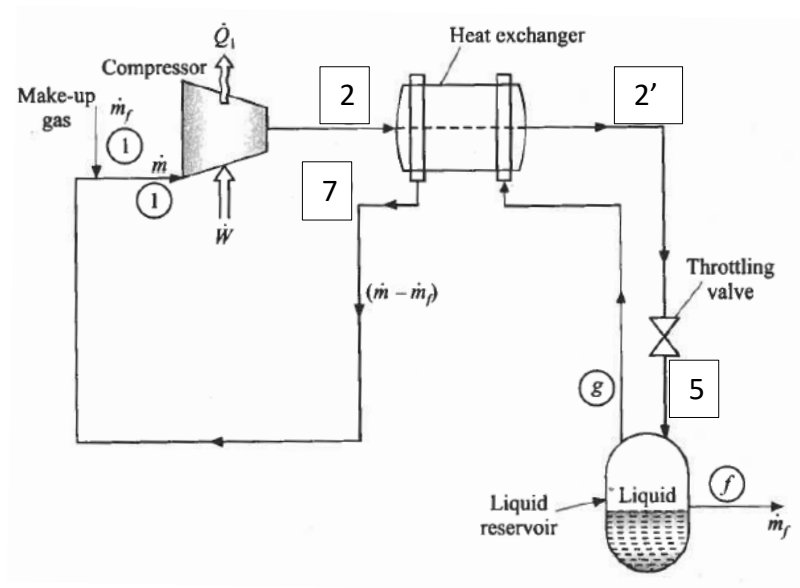
Proprietà Termodinamica	Simbolo	Unità di misura
Entalpia	H	J/kg
Entropia	S	J/kg/K
Temperatura	T	K
Pressione	P	Pa



# Esercizio 1: Linde-Hampson semplice

- 7) Funzione «PropsSI» di CoolProp;
- 8) Calcolo le proprietà termodinamiche nelle condizioni 1;

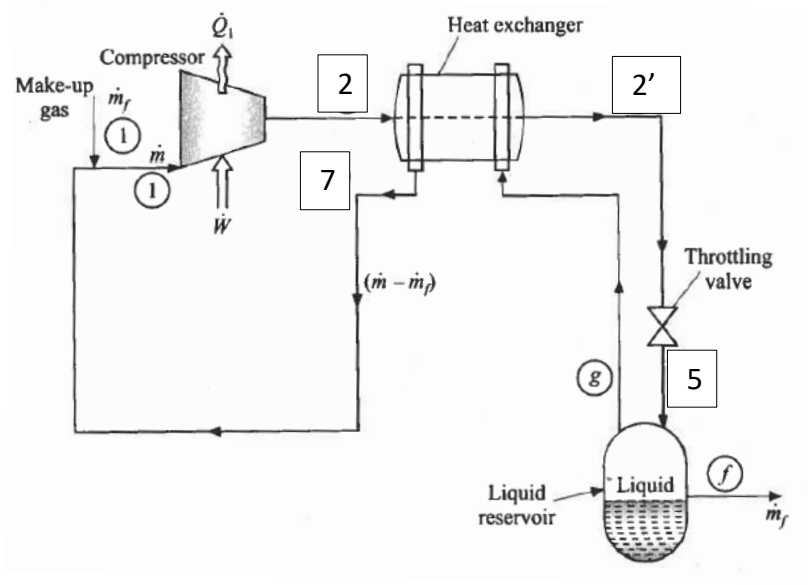
```
19 #Calcolo proprietà termodinamiche
20 h1=PropsSI('H', 'T', T1, 'P', p1, 'Nitrogen')
21
22 s1=PropsSI('S', 'T', T1, 'P', p1, 'Nitrogen')
```



# Esercizio 1: Linde-Hampson semplice

9) Calcolo le proprietà per tutti i punti del ciclo;

```
21 #Entalpia
22 h1=PropsSI('H', 'T', T1, 'P', p1, 'Nitrogen')
23 h2=PropsSI('H', 'T', T1, 'P', p2, 'Nitrogen')
24 h5=PropsSI('H', 'T', Tf, 'P', p1, 'Nitrogen')
25 h7=PropsSI('H', 'T', T1-delta_appr, 'P', p1, 'Nitrogen')
26
27 #Entropia
28 s1=PropsSI('S', 'T', T1, 'P', p1, 'Nitrogen')
29 s2=PropsSI('S', 'T', T1, 'P', p2, 'Nitrogen')
30 s5=PropsSI('S', 'T', Tf, 'P', p1, 'Nitrogen')
31 s7=PropsSI('S', 'T', T1-delta_appr, 'P', p1, 'Nitrogen')
```



# Esercizio 1: Linde-Hampson semplice

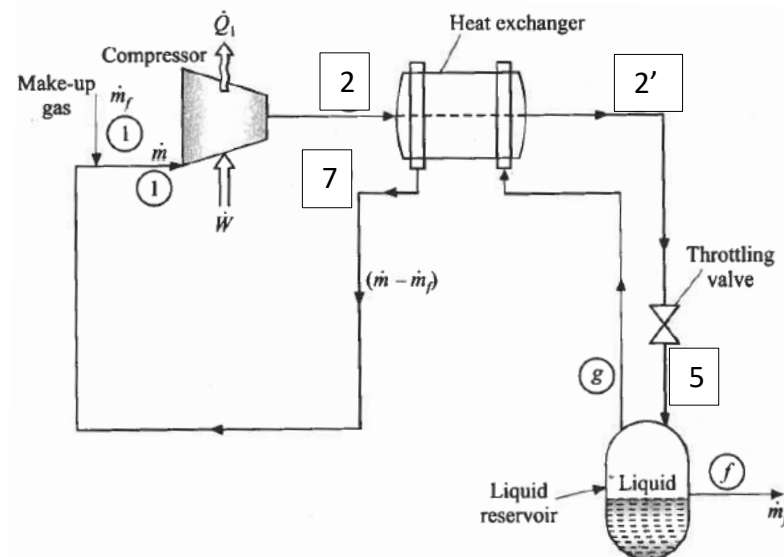
10) Bilancio secondo il primo principio della termodinamica:

$$m_{TOT} * (h_2) = (m_{TOT} - m_L) * (h_7) + m_L * (h_5)$$

$$m_{TOT} * (h_7 - h_2) = m_L * (h_7 - h_5)$$

$$\text{frazione di liquido} = y = \frac{m_L}{m_L + m_G}$$

$$y = \frac{(h_7 - h_2)}{(h_7 - h_5)}$$



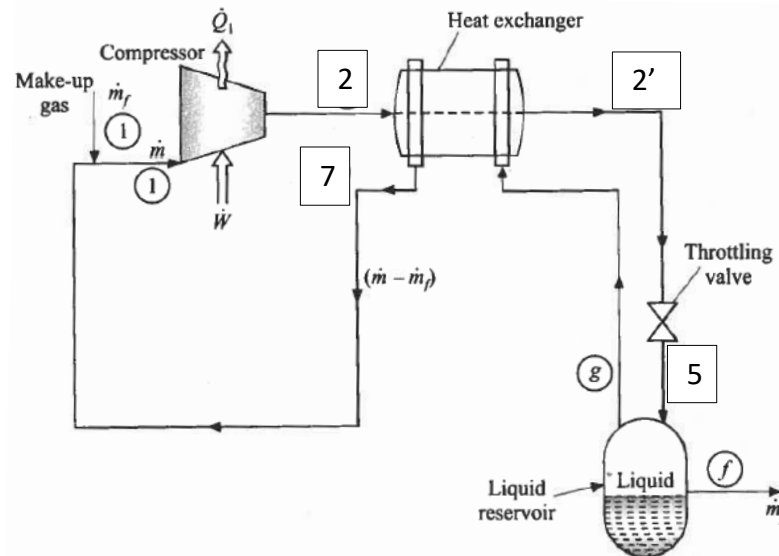
# Esercizio 1: Linde-Hampson semplice

- 10) Bilancio secondo il primo principio della termodinamica;
- 11) Calcolo lavoro reale di liquefazione:

$$-\frac{\dot{W}}{\dot{m}_{TOT}} = [T_1 * (s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)]$$

Energia per unità di massa liquefatta è definita come:

$$-W_L = -\frac{\dot{W}}{\dot{m}_L} = -\frac{\dot{W}}{\dot{m}_{TOT} * y}$$



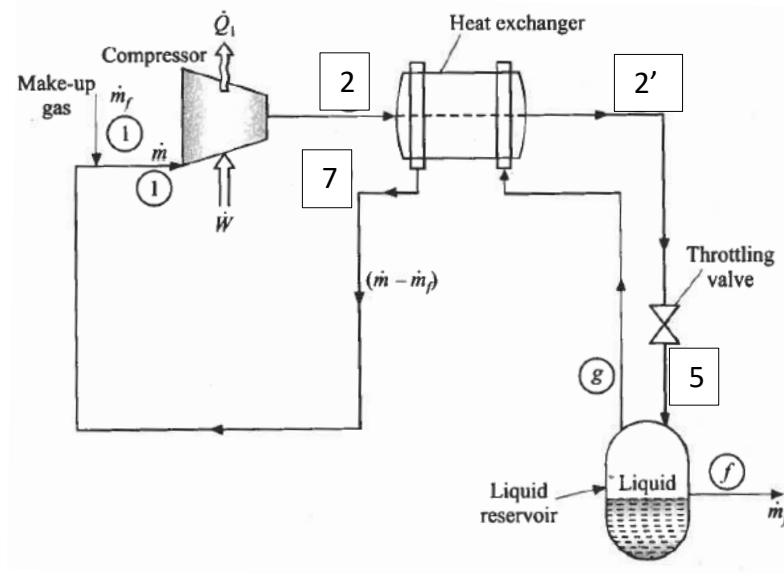
# Esercizio 1: Linde-Hampson semplice

- 10) Bilancio secondo il primo principio della termodinamica;
- 11) Calcolo lavoro reale di liquefazione;
- 12) Calcolo lavoro ideale di liquefazione:

$$\frac{W_{comp}}{m_{TOT}} = [T_1 * (s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)]$$

$$W_L = [T_1 * (s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)]/y$$

$$W_{id} = [T_1 * (s_1 - s_5) - (h_1 - h_5)]$$



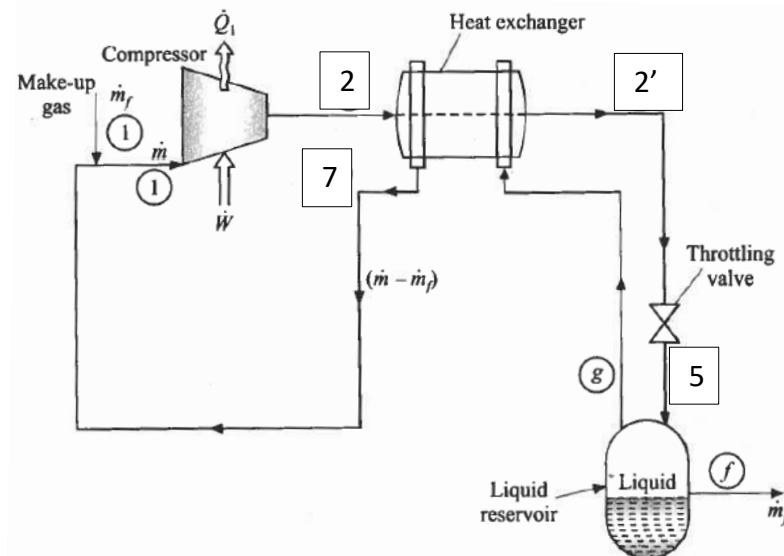
# Esercizio 1: Linde-Hampson semplice

- 10) Bilancio secondo il primo principio della termodinamica;
- 11) Calcolo lavoro reale di liquefazione;
- 12) Calcolo lavoro ideale di liquefazione.

$$\frac{W_{comp}}{m_{TOT}} = [T_1 * (s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)]$$

$$W_L = [T_1 * (s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)]/y$$

$$W_{id} = [T_1 * (s_1 - s_5) - (h_1 - h_5)]$$



# Esercizio 1: Linde-Hampson semplice

- 10) Bilancio secondo il primo principio della termodinamica;
- 11) Calcolo lavoro reale di liquefazione;
- 12) Calcolo lavoro ideale di liquefazione.

33 #Calcolo

34  $y = (h_7 - h_2) / (h_7 - h_5)$

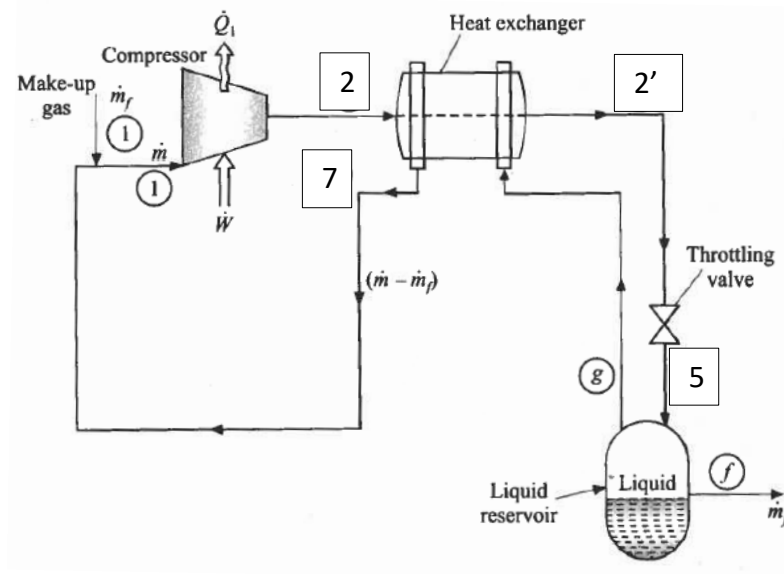
35

36  $W_l = (T_1 * (s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)) / y$

37

38  $W_i = (T_1 * (s_1 - s_5) - (h_1 - h_5))$

39



# Esercizio 1: Linde-Hampson semplice

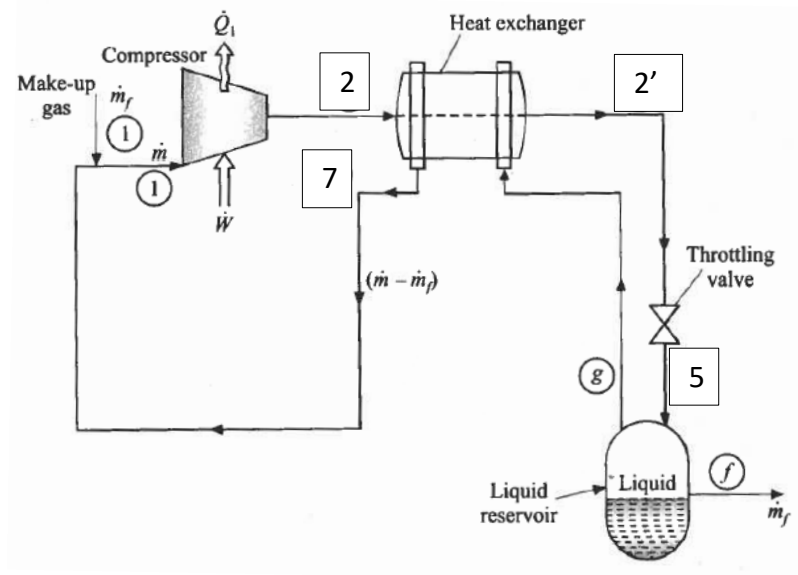
13) Calcolo FOM (*Figure of Merit*):

$$FOM = \frac{W_i}{W_L}$$

39

40 FOM=W\_i/W\_l

41

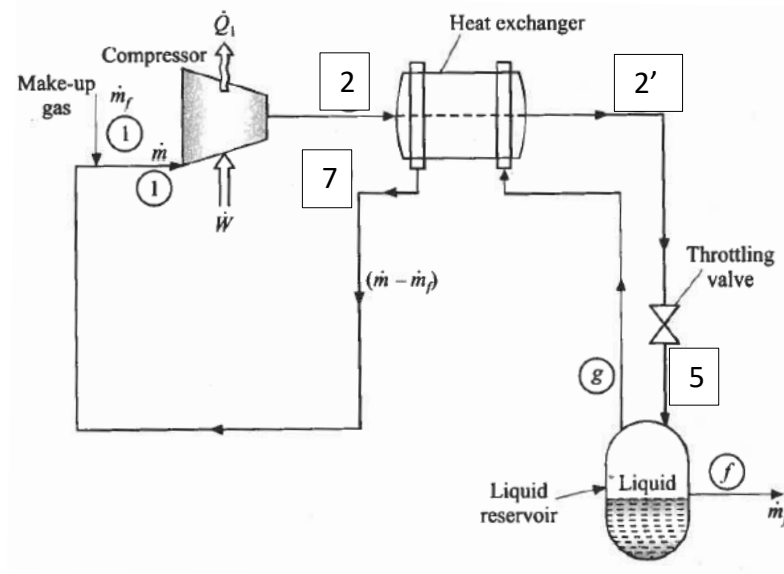




# Esercizio 1: Linde-Hampson semplice

14) Presentiamo i risultati:

```
47 #Risultati
48 print('')
49 print(f"FOM = {'%.3f' %FOM}")
50 print('')
51 print(f"y = {'%.3f' %y}")
52 print('')
53 print(f"Wl = {'%.3f' %(wl/1000)} [J/g]")
```



# Esercizio 1: Linde-Hampson semplice

14) Presentiamo i risultati:

```
In [6]: runfile('C:/Users/david/Desktop/NP Files/Modello/Modello/prova_2.py',  
wdir='C:/Users/david/Desktop/NP Files/Modello/Modello')
```

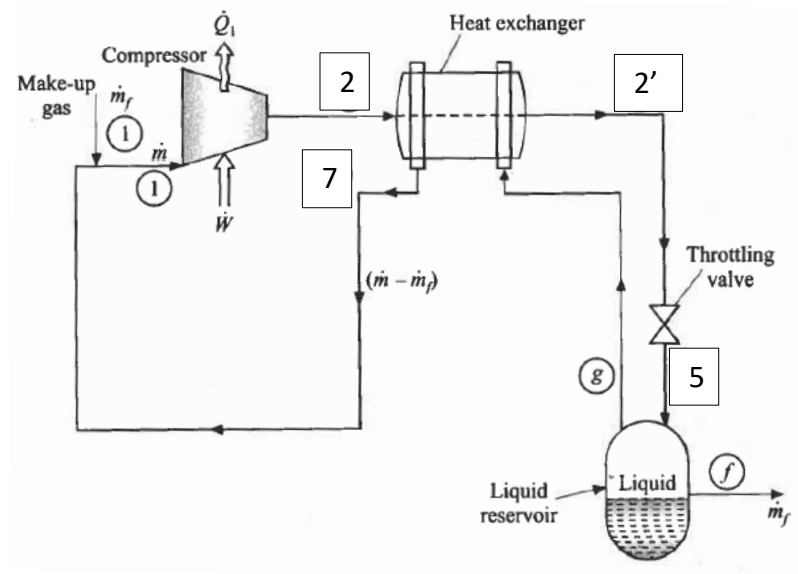
Fino a che pressione comprimo azoto

200

FOM = 0.10318800911789576

y = 0.063

W\_l = 7473.226 [J/g]



# Esercizio 2: Linde-Hampson semplice

- 1) File, «save copy as» e chiamarlo «Esercizio\_2»;
- 2) Aggiungiamo il pacchetto «numpy» e «matplotlib»;

```
1 #Packages
2 from CoolProp.CoolProp import *
3 import numpy as np
4 import matplotlib.pyplot as plt
5
```

- 3) Cancellare inserimento p2 e creare vettore con numpy;
- 4) Creare vettori vuoti dove inserire valori di y e FOM calcolati;

```
17 #creo un vettore per p2
18 p2=np.arange(20,400,10)
19
20 #Creo dei vettori vuoti
21 array_FOM=[]
22 array_y=[]
23
```

# Esercizio 2: Linde-Hampson semplice

- 5) Uso comando for per calcolare h2 e s2 al variare di p2;
- 6) Anche i calcoli di W\_L e y vanno calcolati al variare di p2;

```
41 for temp in range(0, len(p2)):
42     p2[temp]=p2[temp]*c_Pa
43
44     h2=PropsSI('H', 'T', T1, 'P', p2[temp], 'N2')
45
46     s2=PropsSI('S', 'T', T1, 'P', p2[temp], 'N2')
47
48     #Calcolo
49     y=(h7-h2)/(h7-h5)
50     wL=(T1*(s1-s2)-(h1-h2))/y
51     wi=(T1*(s1-s5)-(h1-h5))
52
53     FOM=wi/wL
54
```

- 7) Appendo il valore di FOM e y all'interno dei vettori vuoti;

```
45
46     #Appendo al vettore vuoto creato precedentemente
47     array_FOM.append(FOM)
48     array_y.append(y)
49
```

# Esercizio 2: Linde-Hampson semplice

8) Creo i grafici con matplotlib;

```
59 #Grafico di FOM
60 plt.plot(p2,array_FOM,'r--')
61 plt.axis([0, max(p2),min(array_FOM),max(array_FOM)*1.1])
62 plt.xlabel('p')
63 plt.ylabel('FOM')
64 plt.show()
65
66 #Grafico dell'entropia
67 plt.plot(p2,array_y, 'b--')
68 plt.axis([0, max(p2),min(array_y),max(array_y)*1.1])
69 plt.xlabel('p')
70 plt.ylabel('y')
71 plt.show()
```

# Esercizio 2: Linde-Hampson semplice

8) Creo i grafici con matplotlib;

```
59 #Grafico di FOM
60 plt.plot(p2,array_FOM,'r--')
61 plt.axis([0, max(p2),min(array_FOM),max(array_FOM)*1.1])
62 plt.xlabel('p')
63 plt.ylabel('FOM')
64 plt.show()
65
66 #Grafico dell'entropia
67 plt.plot(p2,array_y, 'b--')
68 plt.axis([0, max(p2),min(array_y),max(array_y)*1.1])
69 plt.xlabel('p')
70 plt.ylabel('y')
71 plt.show()
```

**Primo termine: ascissa**

# Esercizio 2: Linde-Hampson semplice

8) Creo i grafici con matplotlib;

```
59 #Grafico di FOM
60 plt.plot(p2,array_FOM,'r--')
61 plt.axis([0, max(p2),min(array_FOM),max(array_FOM)*1.1])
62 plt.xlabel('p')
63 plt.ylabel('FOM')
64 plt.show()
65
66 #Grafico dell'entropia
67 plt.plot(p2,array_y,'b--')
68 plt.axis([0, max(p2),min(array_y),max(array_y)*1.1])
69 plt.xlabel('p')
70 plt.ylabel('y')
71 plt.show()
```

**Secondo termine: ordinata**

# Esercizio 2: Linde-Hampson semplice

8) Creo i grafici con matplotlib;

```
59 #Grafico di FOM
60 plt.plot(p2,array_FOM,'r--')
61 plt.axis([0, max(p2),min(array_FOM),max(array_FOM)*1.1])
62 plt.xlabel('p')
63 plt.ylabel('FOM')
64 plt.show()
65
66 #Grafico dell'entropia
67 plt.plot(p2,array_y,'b--')
68 plt.axis([0, max(p2),min(array_y),max(array_y)*1.1])
69 plt.xlabel('p')
70 plt.ylabel('y')
71 plt.show()
```

**Terzo termine: colore + tratto**



# Esercizio 2: Linde-Hampson semplice

8) Creo i grafici con matplotlib;

```
59 #Grafico di FOM
60 plt.plot(p2,array_FOM,'r--')
61 plt.axis([0, max(p2),min(array_FOM),max(array_FOM)*1.1])
62 plt.xlabel('p')
63 plt.ylabel('FOM')
64 plt.show()
65
66 #Grafico dell'entropia
67 plt.plot(p2,array_y,'b--')
68 plt.axis([0, max(p2),min(array_y),max(array_y)*1.1])
69 plt.xlabel('p')
70 plt.ylabel('y')
71 plt.show()
```

**Imposto la lunghezza degli assi**

# Esercizio 2: Linde-Hampson semplice

8) Creo i grafici con matplotlib;

```
59 #Grafico di FOM
60 plt.plot(p2,array_FOM,'r--')
61 plt.axis([0, max(p2),min(array_FOM),max(array_FOM)*1.1])
62 plt.xlabel('p')
63 plt.ylabel('FOM')
64 plt.show()
65
66 #Grafico dell'entropia
67 plt.plot(p2,array_y, 'b--')
68 plt.axis([0, max(p2),min(array_y),max(array_y)*1.1])
69 plt.xlabel('p')
70 plt.ylabel('y')
71 plt.show()
```

**Aggiungo etichette agli assi**

# Esercizio 2: Linde-Hampson semplice

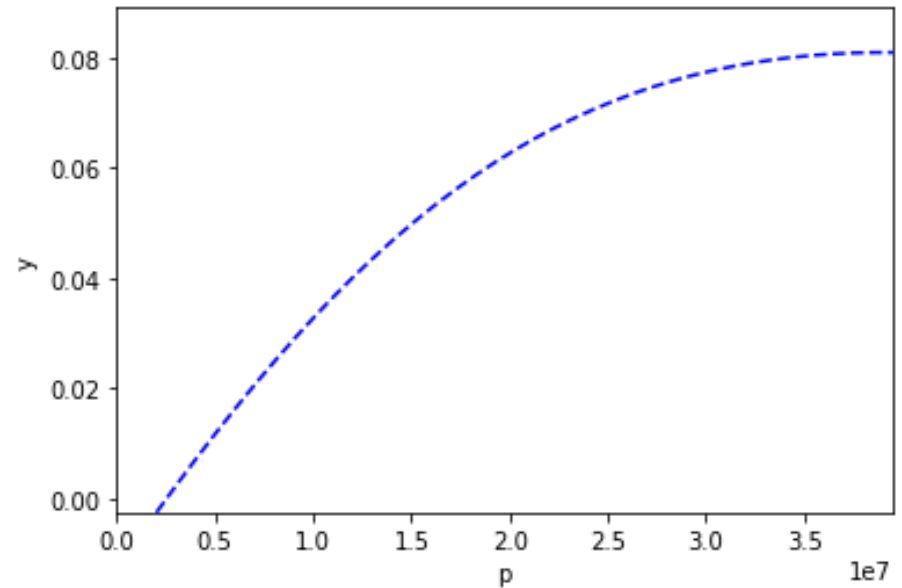
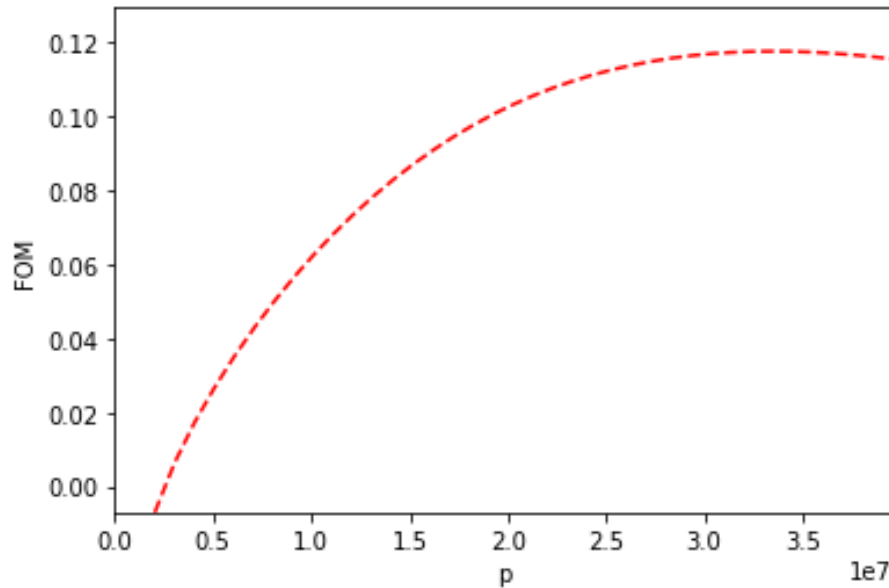
8) Creo i grafici con matplotlib;

```
59 #Grafico di FOM
60 plt.plot(p2,array_FOM,'r--')
61 plt.axis([0, max(p2),min(array_FOM),max(array_FOM)*1.1])
62 plt.xlabel('p')
63 plt.ylabel('FOM')
64 plt.show()
65
66 #Grafico dell'entropia
67 plt.plot(p2,array_y, 'b--')
68 plt.axis([0, max(p2),min(array_y),max(array_y)*1.1])
69 plt.xlabel('p')
70 plt.ylabel('y')
71 plt.show()
```

**Comando per mostrare il grafico**

# Esercizio 2: Linde-Hampson semplice

8) Creo i grafici con matplotlib;



# Esercizio 3: Linde-Hampson pre-raffreddato per idrogeno

Utilizziamo un ciclo di Linde-Hampson pre-raffreddato per liquefare idrogeno ( $H_2$ ). Il refrigerante utilizzato è azoto ( $N_2$ ). Calcolare la frazione di liquido, il rapporto tra portata di refrigerante e di gas compresso ( $z$ ) e il rapporto tra lavoro ideale e reale di liquefazione richiesto (FOM).

*Dati iniziali:*

$$T_{amb} = T_1 = 300 \text{ K}$$

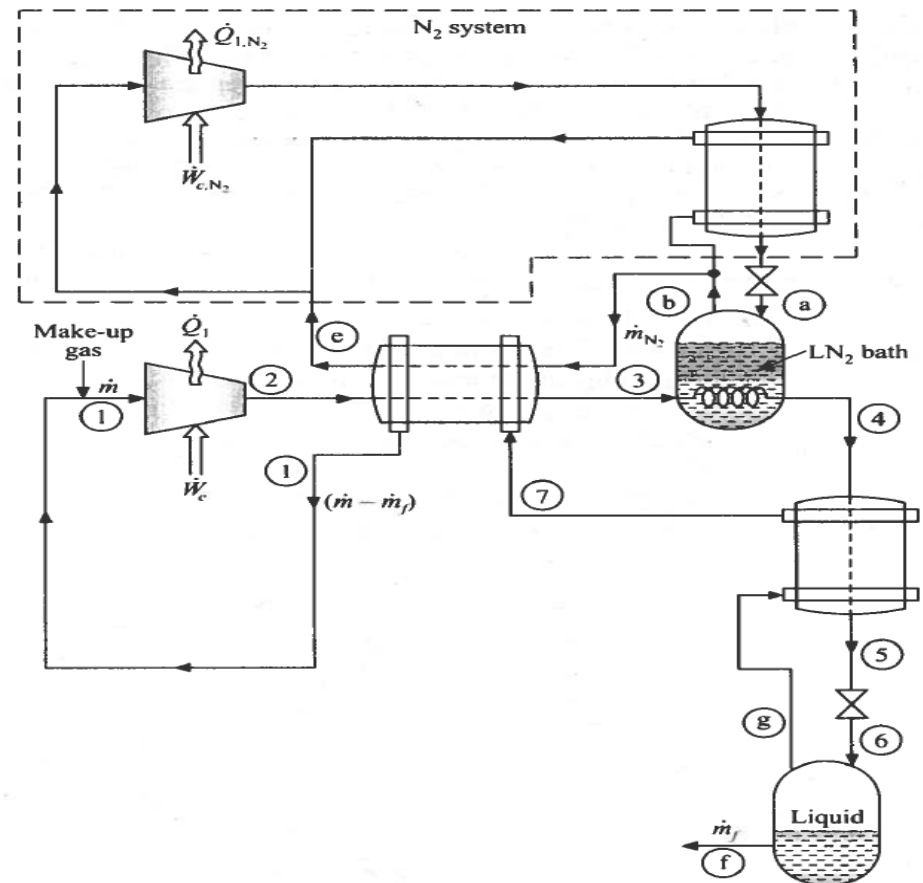
$$p_{amb} = p_1 = 1 \text{ atm}$$

$$\Delta T_{appr} = 5 \text{ K}$$

$$p_f = 1 \text{ atm}$$

$$T_f = 20 \text{ K}$$

$$p_2 = p_4 = 50 \text{ atm}$$



# Esercizio 3: Linde-Hampson pre-raffreddato per idrogeno

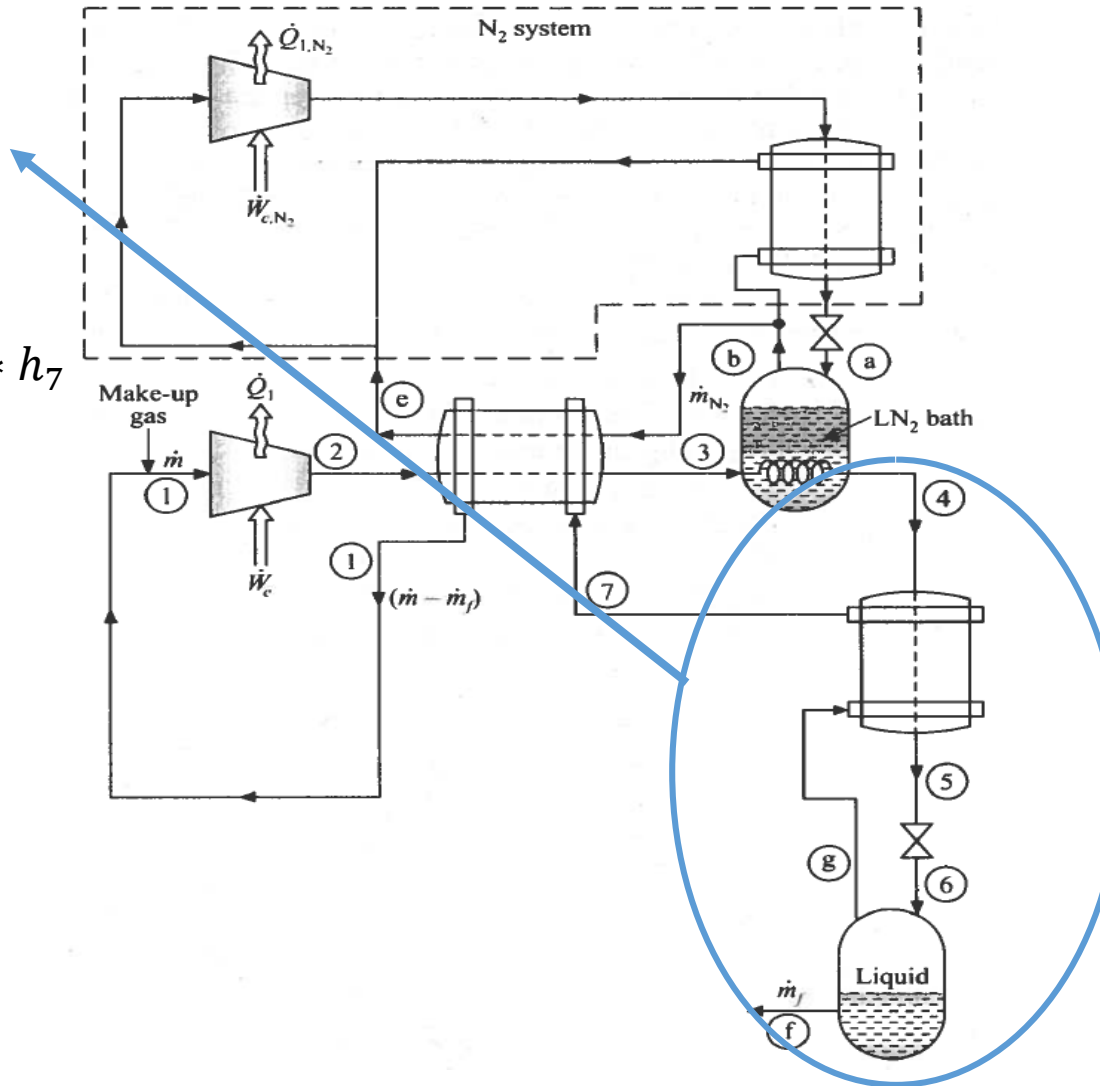
Primo principio della Termodinamica:

$$m_{TOT} * h_4 = m_L * h_f + m_g * h_7$$

$$m_{TOT} * h_4 = m_L * h_f + (m_{TOT} - m_L) * h_7$$

$$m_{TOT} * (h_4 - h_7) = m_L * (h_f - h_7)$$

$$y = \frac{h_7 - h_4}{h_7 - h_f}$$



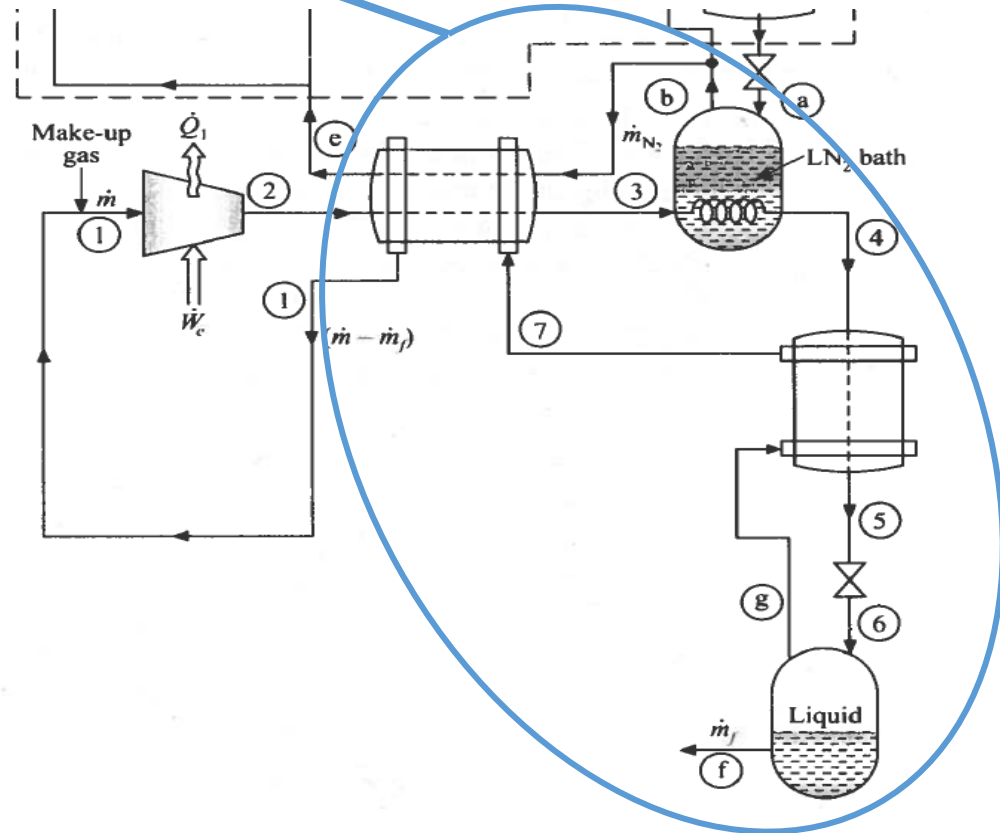
# Esercizio 3: Linde-Hampson pre-raffreddato per idrogeno

Primo principio della Termodinamica:

$$m_{TOT} * h_2 + m_N * h_a = m_N * h_c + (m_{TOT} - m_L) * h_1 + m_L * h_f$$

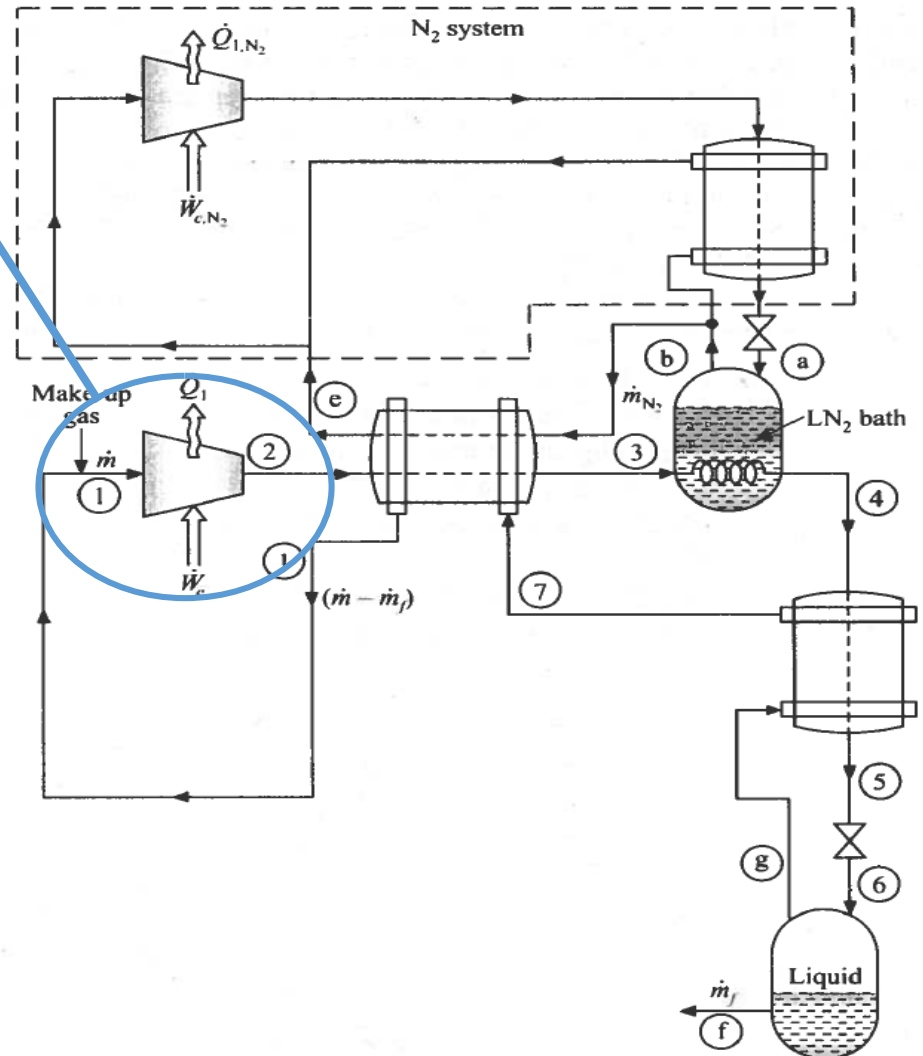


$$Z = \frac{h_2 - h_{1usc}}{h_c - h_a} + y * \frac{h_{1usc} - h_f}{h_c - h_a}$$



# Esercizio 3: Linde-Hampson pre-raffreddato per idrogeno

$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}_{TOT}} = [T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)]$$

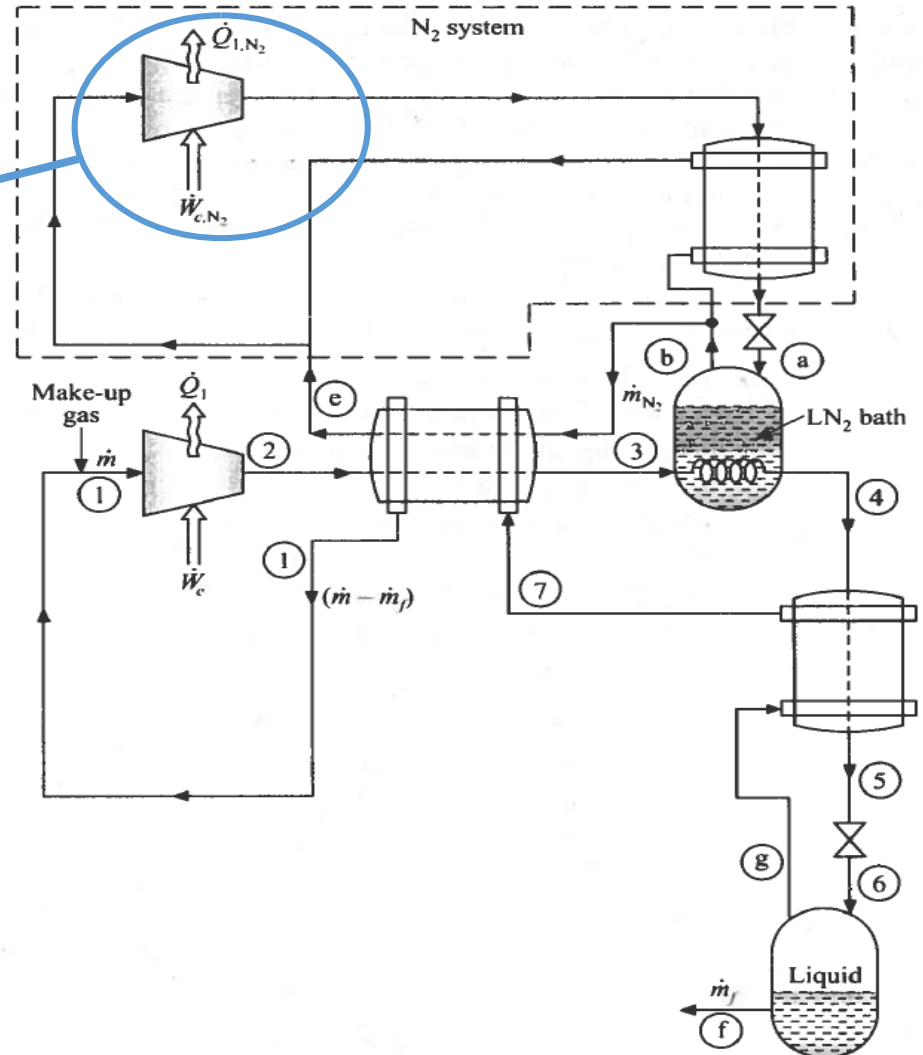




# Esercizio 3: Linde-Hampson pre-raffreddato per idrogeno

$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}_{TOT}} = [T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)]$$

$$\frac{\dot{W}_{TOT}}{\dot{m}_{TOT}} = \frac{\dot{W}}{\dot{m}_{TOT}} + W_{l_{N_2}} * Z$$

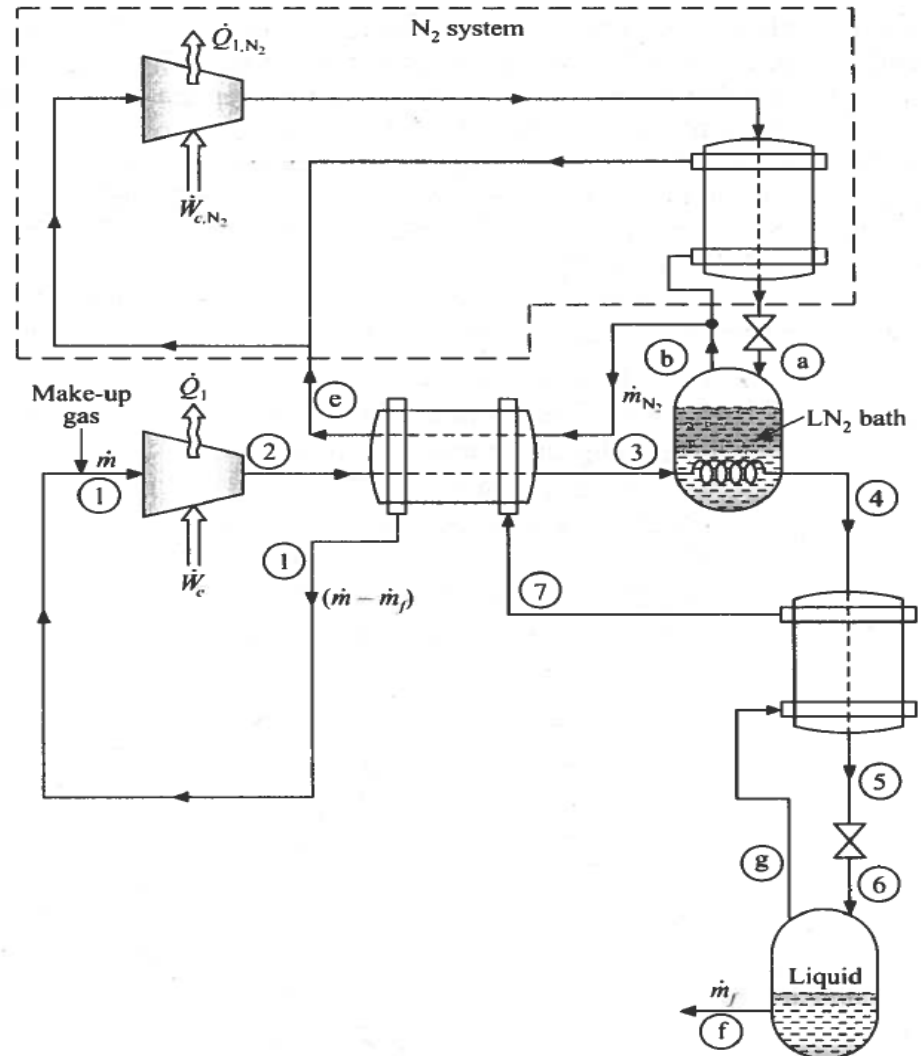


# Esercizio 3: Linde-Hampson pre-raffreddato per idrogeno

$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}_{TOT}} = [T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)]$$

$$\frac{\dot{W}_{TOT}}{\dot{m}_{TOT}} = \frac{\dot{W}}{\dot{m}_{TOT}} + W_{l_{N_2}} * Z$$

$$\dot{W}_{l_{H_2}} = \frac{\dot{W}_{TOT}}{\dot{m}_{TOT} * y}$$



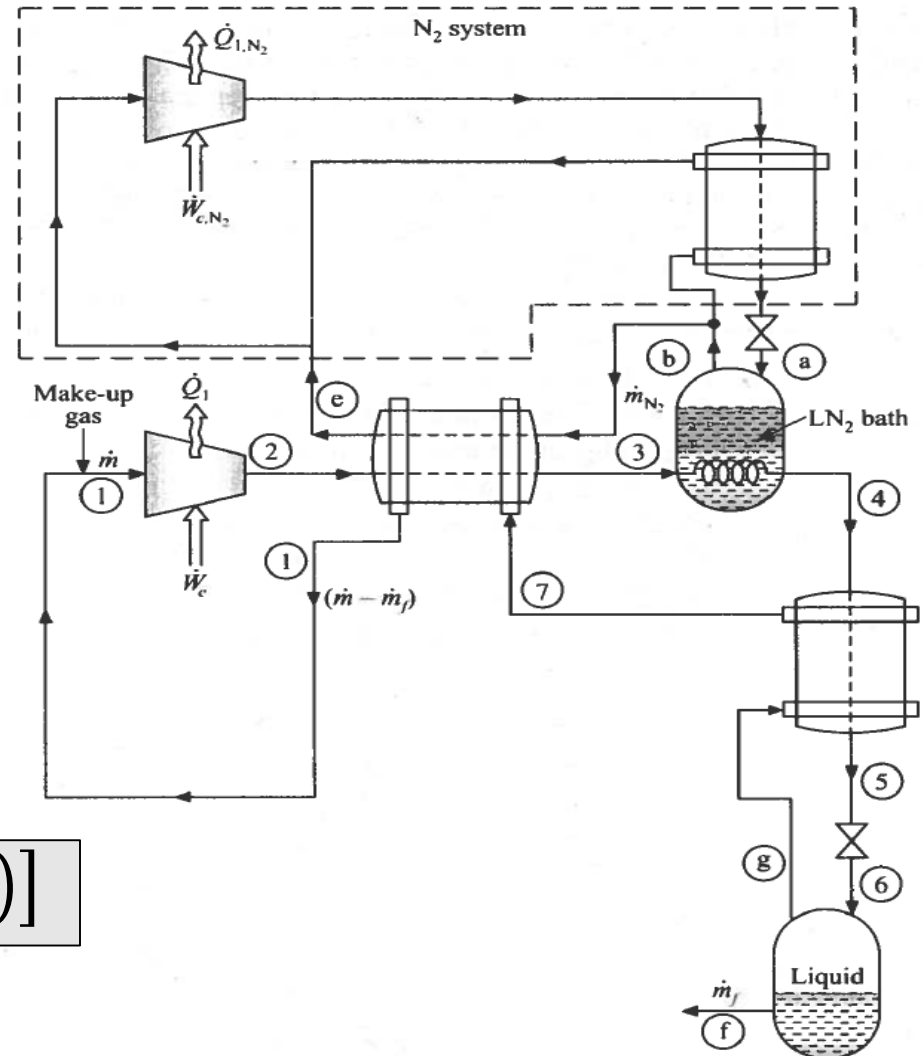
# Esercizio 3: Linde-Hampson pre-raffreddato per idrogeno

$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}_{TOT}} = [T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)]$$

$$\frac{\dot{W}_{TOT}}{\dot{m}_{TOT}} = \frac{\dot{W}}{\dot{m}_{TOT}} + W_{l_{N_2}} * Z$$

$$\dot{W}_{l_{H_2}} = \frac{\dot{W}_{TOT}}{\dot{m}_{TOT} * y}$$

$$\dot{W}_i = [T_1(s_1 - s_f) - (h_1 - h_f)]$$



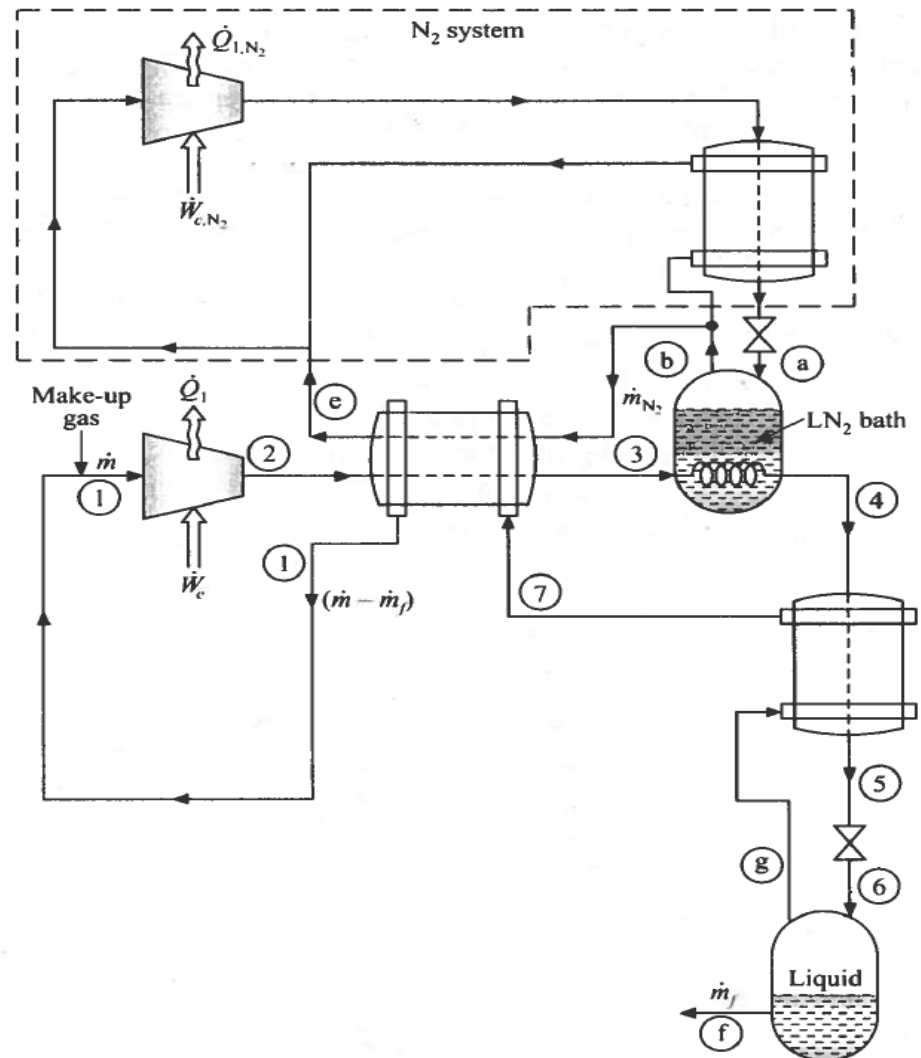
# Esercizio 3: Linde-Hampson pre-raffreddato per idrogeno

## DATI DEL PROBLEMA

```

9 from CoolProp.CoolProp import PropsSI
10 from Esercizio_1 import *
11
12 #Dati del problema
13 T1=300      #K
14 p1=1        #atm
15 pf=1        #atm
16 p2=50       #atm
17 T4=70      #K
18 delta_approach=5      #K
19 Tc=T1_usc=T1-delta_approach      #K
20 T4_usc=T4-delta_approach

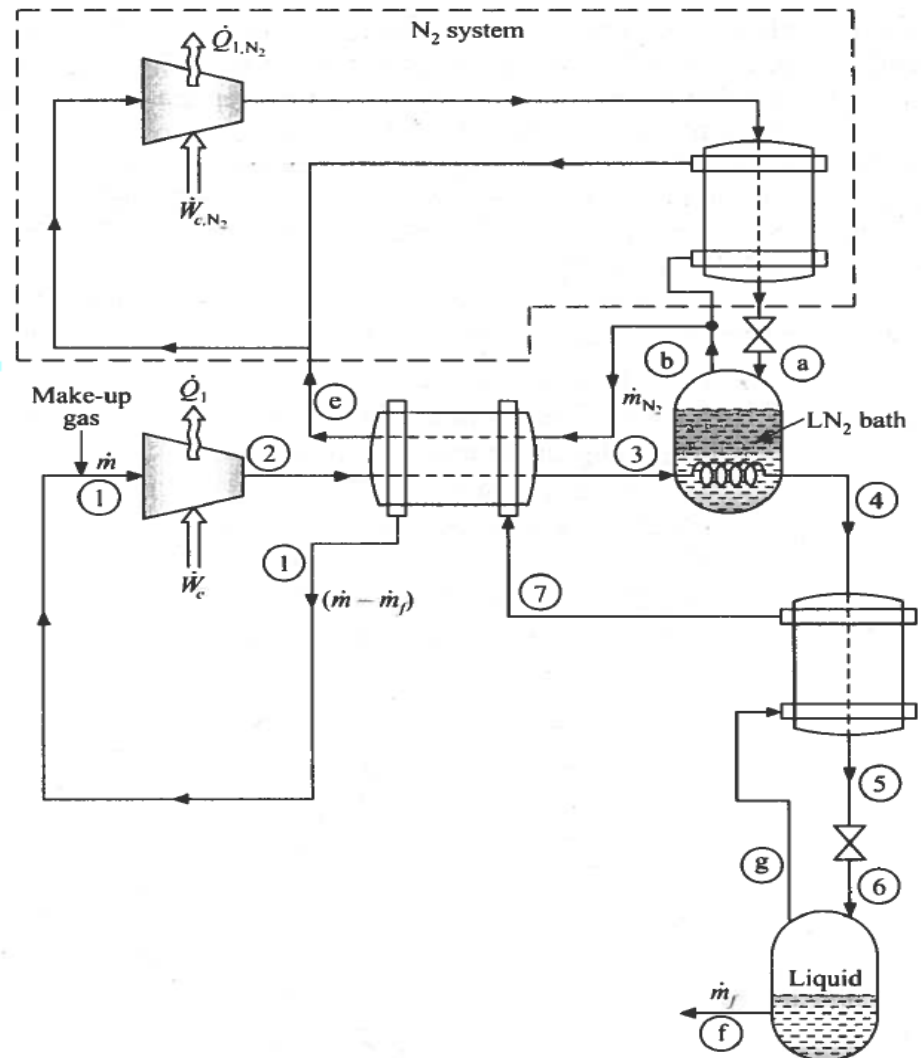
```



# Esercizio 3: Linde-Hampson pre-raffreddato per idrogeno

Proprietà termodinamiche per l'azoto:

```
20  
21 #Calcolo variabili termodinamiche  
22 ##### AZOTO #####  
23 ha=PropsSI('H', 'P', p1, 'Q', 0, 'N2')  
24 hc=PropsSI('H', 'T', Tc, 'P', p1, 'N2')  
25
```

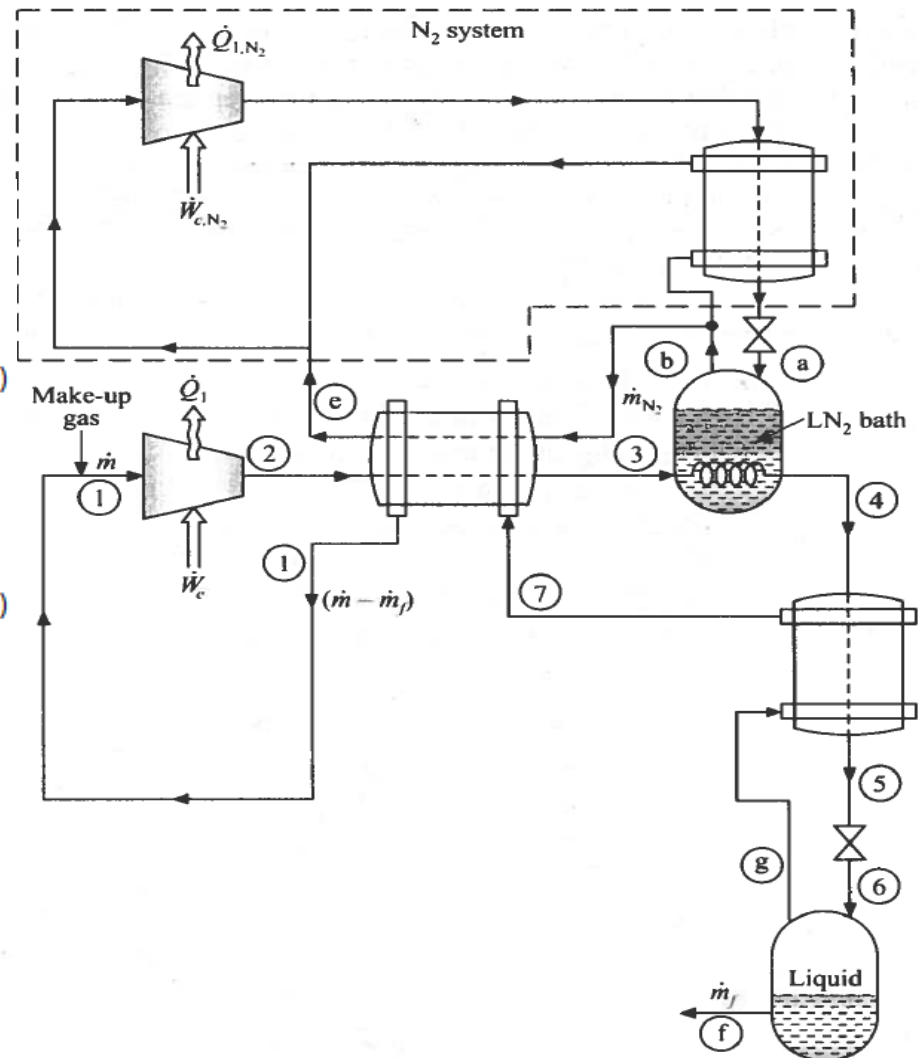


# Esercizio 3: Linde-Hampson pre-raffreddato per idrogeno

Proprietà termodinamiche per l'idrogeno:

```

25
26 ##### IDROGENO #####
27 h1=PropsSI('H', 'T', T1, 'P', p1, 'H2')
28 h2=PropsSI('H', 'T', T1, 'P', p2, 'H2')
29 h4=PropsSI('H', 'T', T4, 'P', p2, 'H2')
30 h7=PropsSI('H', 'T', T4_usc, 'P', p1, 'H2')
31 h1_usc=PropsSI('H', 'T', T1_usc, 'P', p1, 'H2')
32 hf=PropsSI('H', 'Q', 0, 'P', p1, 'H2')
33
34 s1=PropsSI('S', 'T', T1, 'P', p1, 'H2')
35 s2=PropsSI('S', 'T', T1, 'P', p2, 'H2')
36 s4=PropsSI('S', 'T', T4, 'P', p2, 'H2')
37 s7=PropsSI('S', 'T', T4_usc, 'P', p1, 'H2')
38 s1_usc=PropsSI('S', 'T', T1_usc, 'P', p1, 'H2')
39 sf=PropsSI('S', 'Q', 0, 'P', p1, 'H2')
    
```



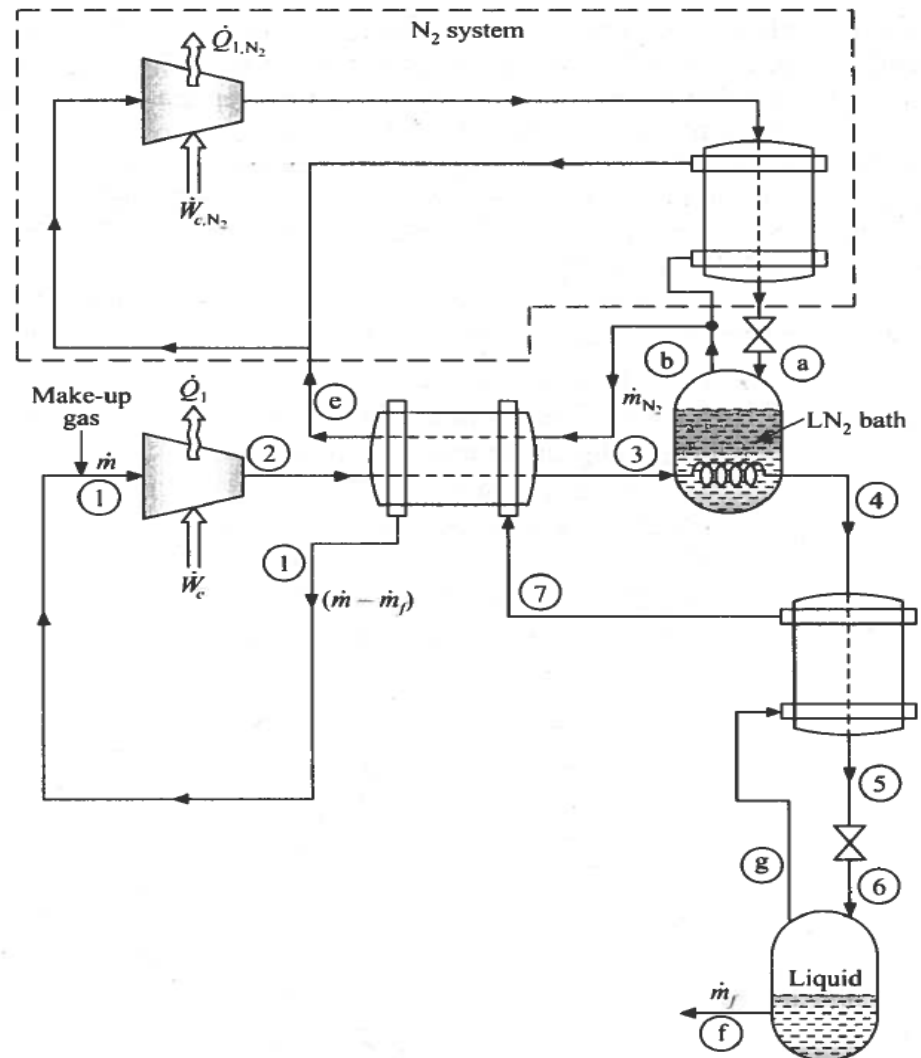
# Esercizio 3: Linde-Hampson pre-raffreddato per idrogeno

Calcolo performance del ciclo:

```

46 #Calcolo performance ciclo
47 #Frazione di liquido
48  $y = (h_7 - h_4) / (h_7 - h_f)$ 
49
50 #Rapporto tra portata N2 e quella di H2
51  $z = (h_2 - h_{1\_usc}) / (h_c - h_a) + y * (h_{1\_usc} - h_f) / (h_c - h_a)$ 
52
53 #Lavoro di liquefazione N2 da Esercizio 1
54  $W_{L\_N2} = W_{L\_1}$ 
55
56 #Lavoro per unità di massa di H2
57  $W_m = (T_1 * (s_1 - s_2) - (h_1 - h_2))$ 
58
59 #Lavoro totale di liquefazione dell'idrogeno
60  $W_{L\_H2} = (W_{L\_N2} * z + W_m) / y$ 
61
62 #Lavoro ideale di liquefazione dell'idrogeno
63  $W_i = (T_1 * (s_1 - s_f) - (h_1 - h_f))$ 
64
65 #Figura di merito
66  $FOM = W_i / W_{L\_H2}$ 

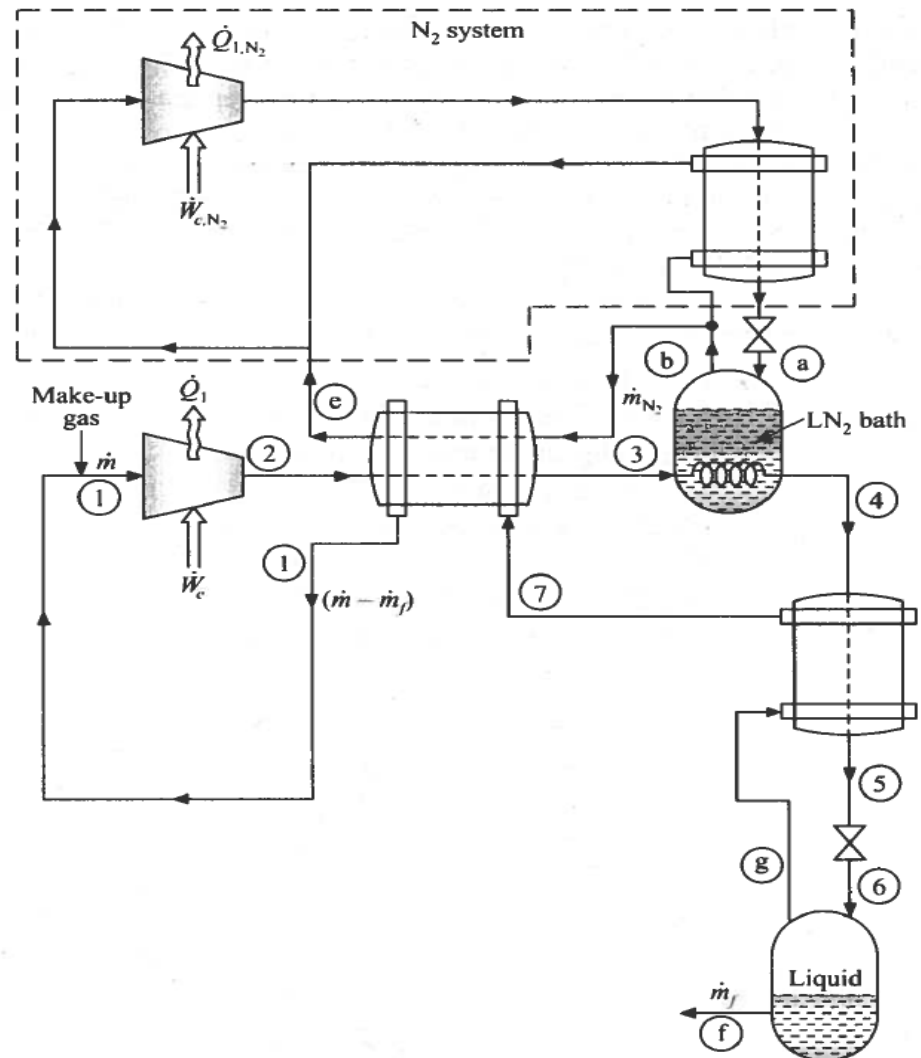
```



# Esercizio 3: Linde-Hampson pre-raffreddato per idrogeno

Presento i risultati:

```
#Risultati
print('-----')
print('')
print('Risultati esercizio 3')
print('')
print(f'FOM = {("%.3f" % FOM)}')
print('')
print(f'y = {("%.3f" % y)}')
print('')
print(f'z = {("%.3f" % z)}')
print('')
print(f'w1_H2 = {("%.3f" % (w1_H2/10**6))} (kJ/g)')
```





# Esercizio 3: Linde-Hampson pre-raffreddato per idrogeno

Presento i risultati:

Risultati esercizio 1

FOM = 0.103

$y = 0.063$

$Wl = 7473.227 \text{ [J/g]}$

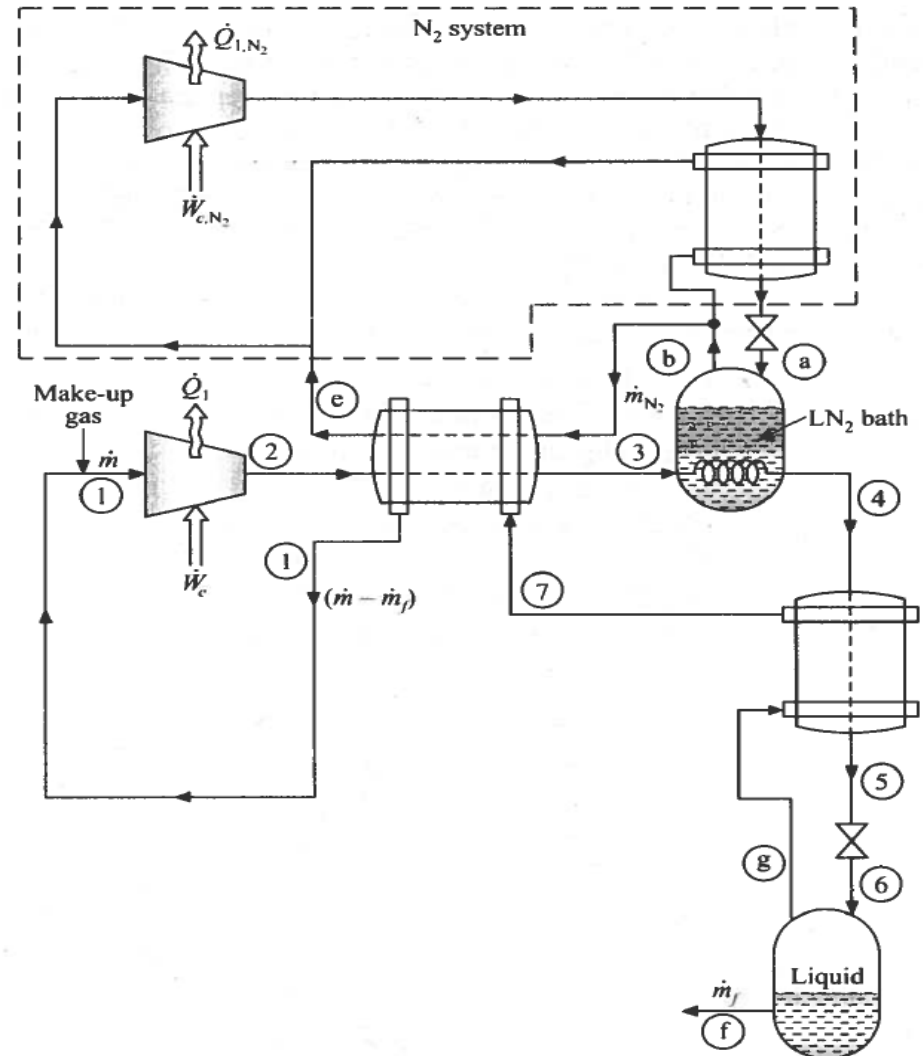
Risultati esercizio 3

FOM = 0.085

$y = 0.087$

$z = 1.013$

$Wl_{H2} = 142.469 \text{ (kJ/g)}$



# Esercizio 3: Linde-Hampson pre-raffreddato per idrogeno

Presento i risultati:

Risultati esercizio 1

FOM = 0.103

$y = 0.063$

$Wl = 7473.227 \text{ [J/g]}$

Risultati esercizio 3

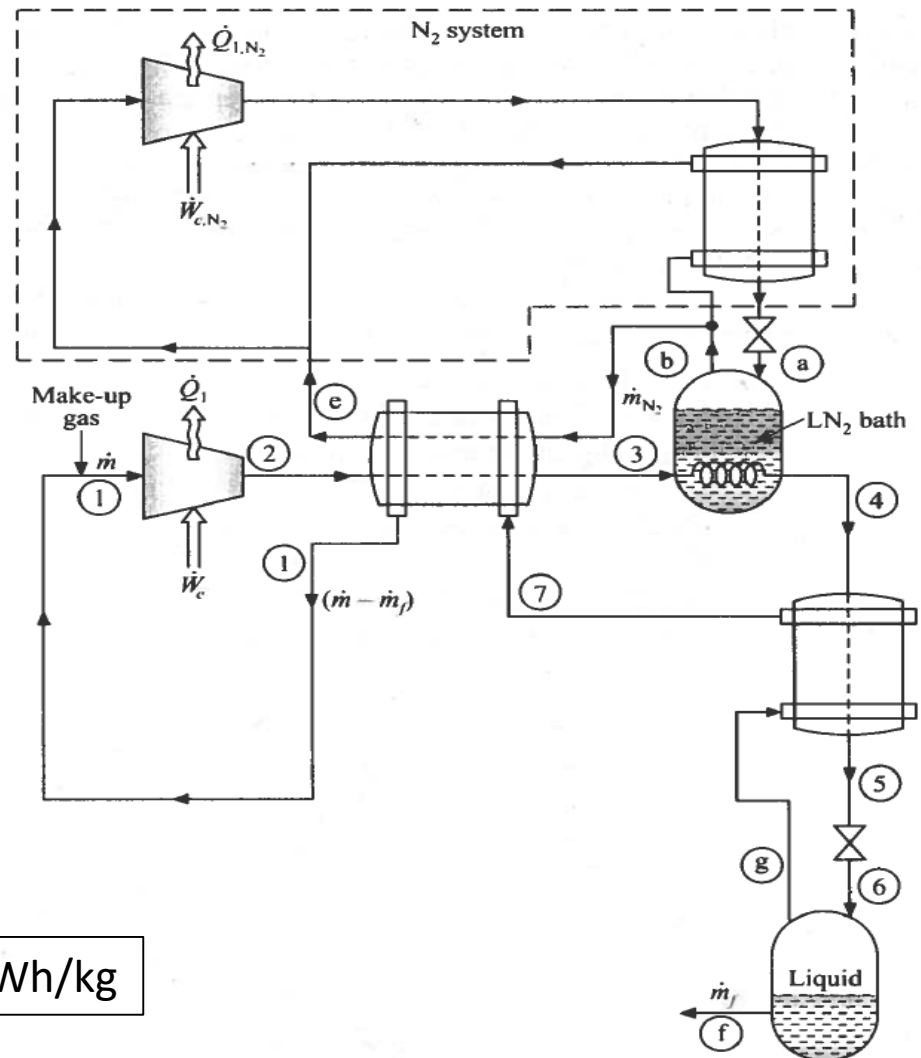
FOM = 0.085

$y = 0.087$

$z = 1.013$

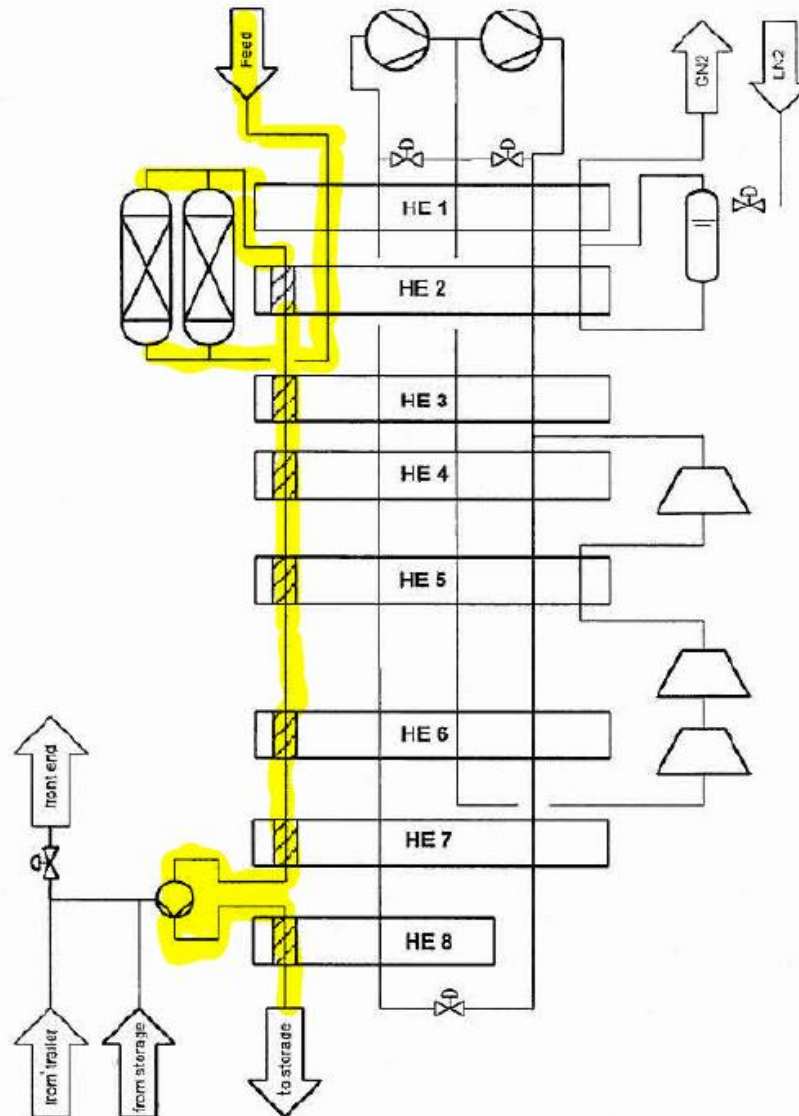
$Wl_{H2} = 142.469 \text{ (kJ/g)}$

40 kWh/kg



# Esercizio 3: Linde-Hampson pre-raffreddato per idrogeno

$$W_l = 11.9 \frac{kWh}{kg_{LH_2}}$$



# Grazie per l'attenzione!



Per eventuali domande: Davide Pivetta – [davide.pivetta@phd.units.it](mailto:davide.pivetta@phd.units.it)