

# Corso di impiego industriale dell'energia

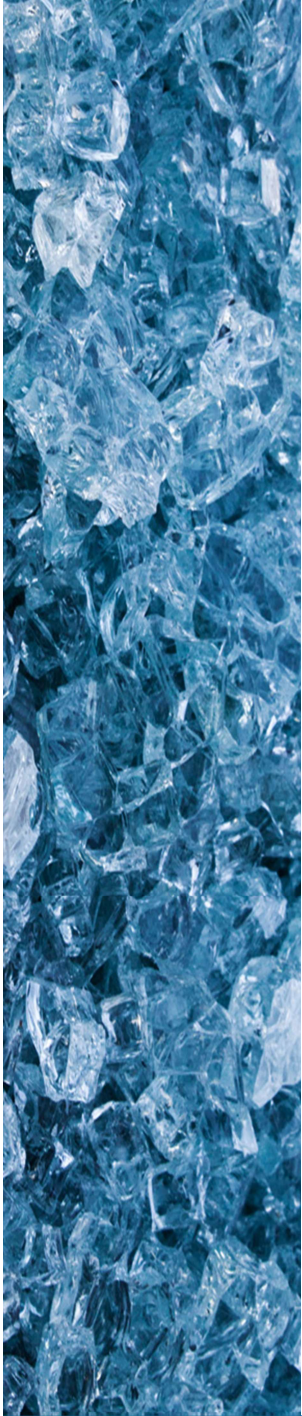


IMPIANTI CRIOGENICI

Prof. Rodolfo Taccani

Ing. Pivetta Davide

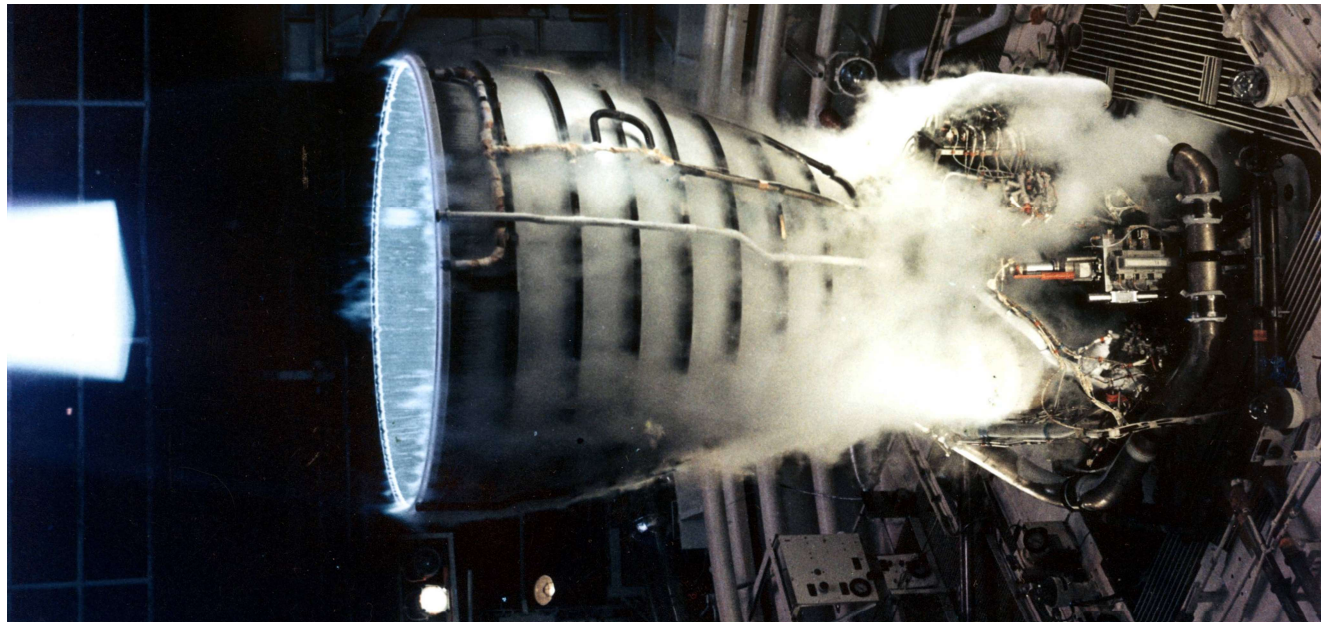
AA 2019-20



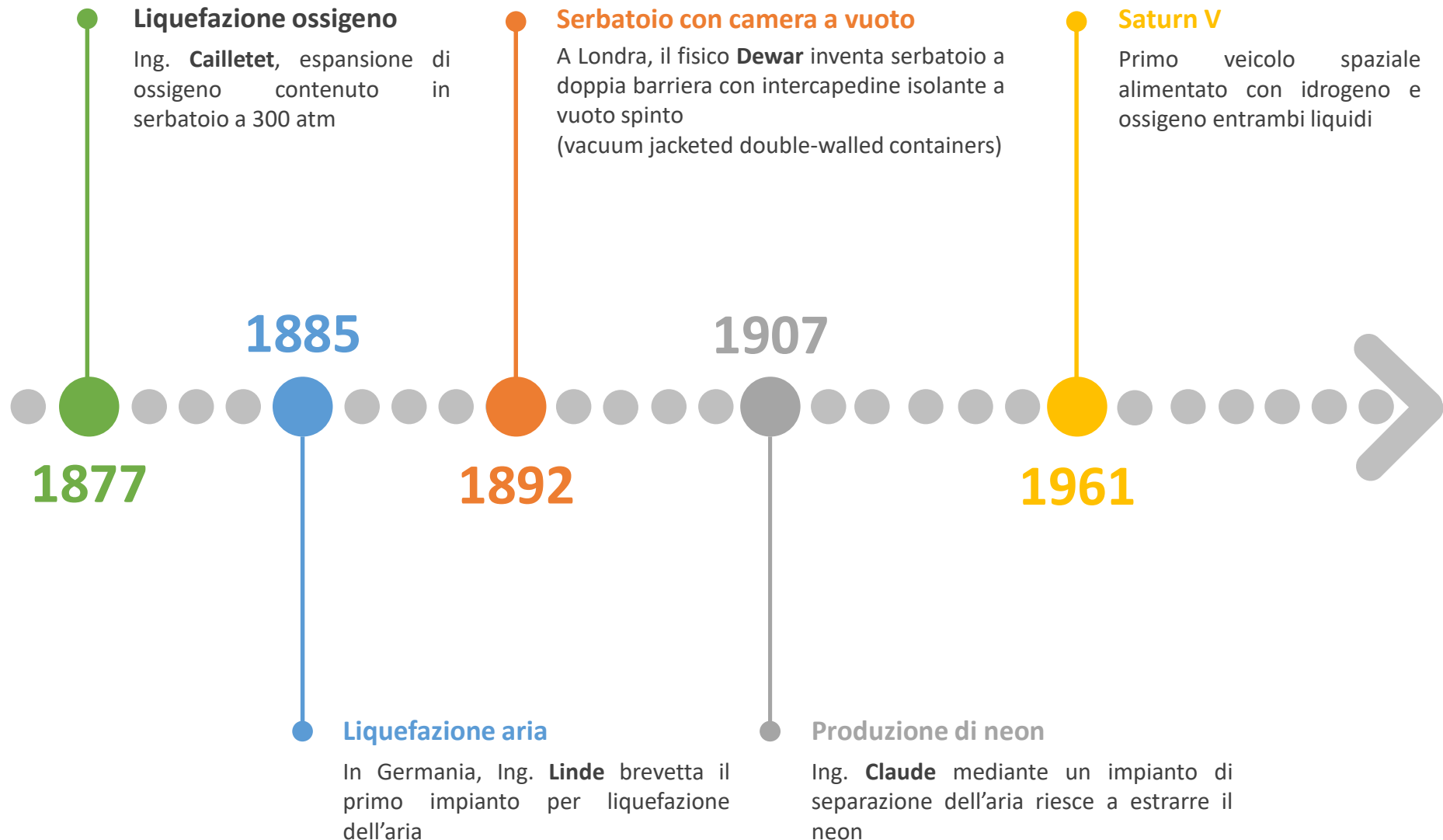
# Processi di liquefazione criogenica

- 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

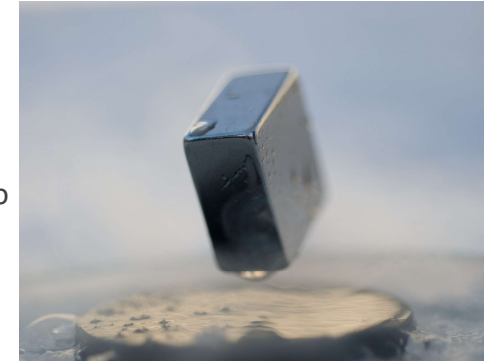




# Aree di applicazione della criogenia

## 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 l'azzeramento delle emissioni di anidride carbonica.



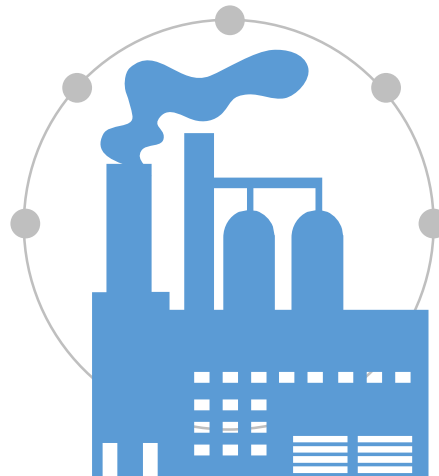
## Applicazioni all'industria spaziale

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

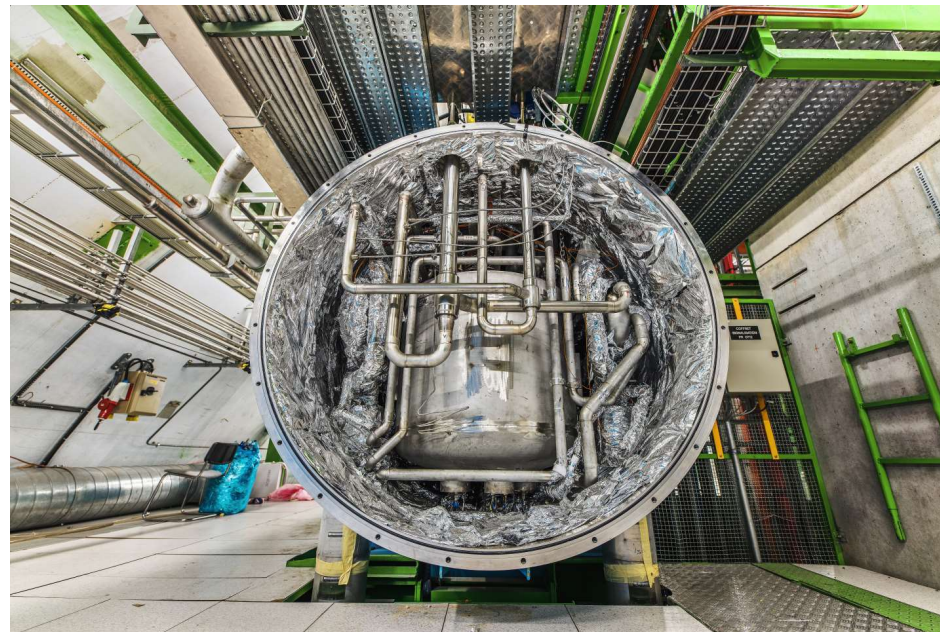
Vi sono applicazioni che riguardano la chirurgia, la cryo-preservazione di embrioni e gameti, o la conservazione di tessuti e componenti del sangue.



## 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



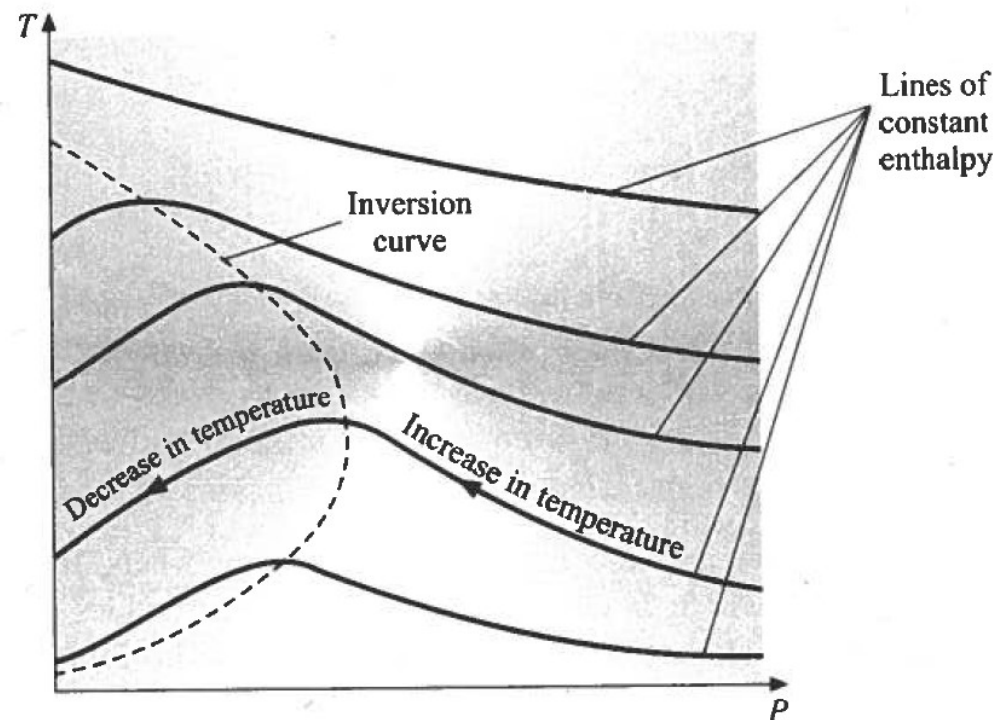
# Espansione di Joule-Thomson

Fluido subisce un'espansione isoentalpica attraverso un orifizio 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**

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



## Diapositiva 7

---

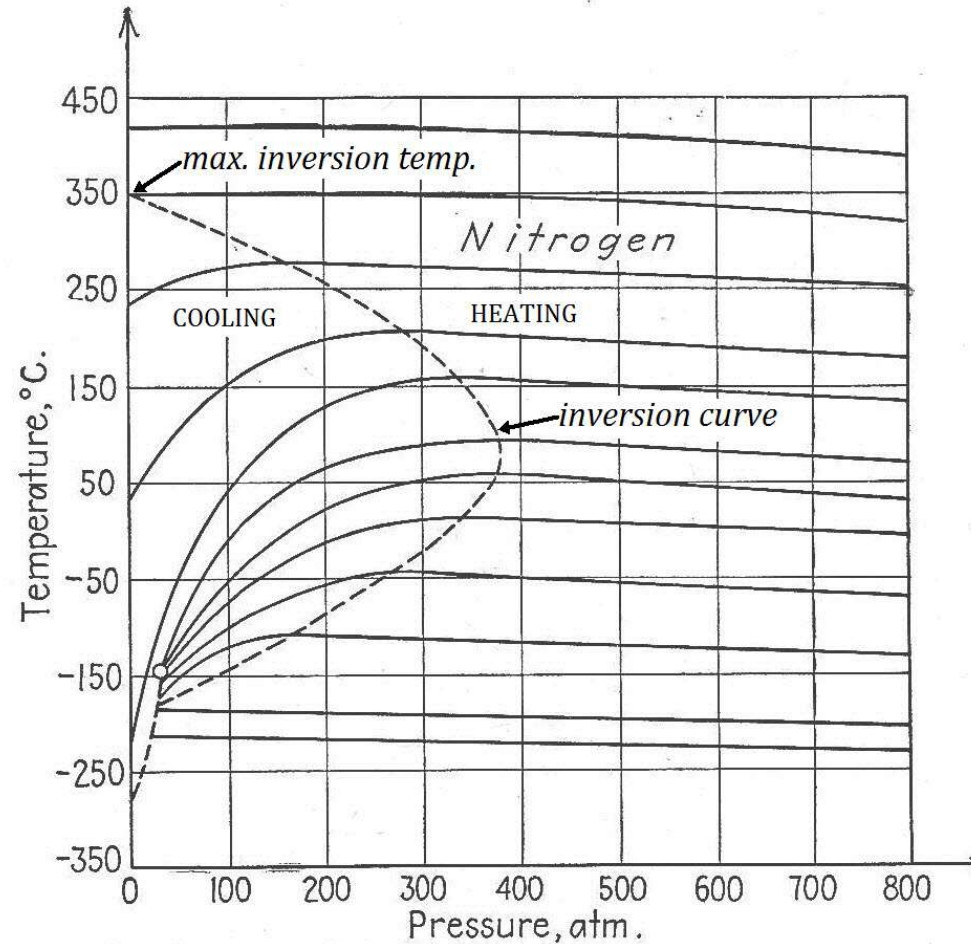
**DP1**

Inserisci una dimostrazione del coefficiente di J-T e magari un breve video per far vedere come funziona il processo

Daide Pivetta; 25/03/2020

# Espansione di Joule-Thomson

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



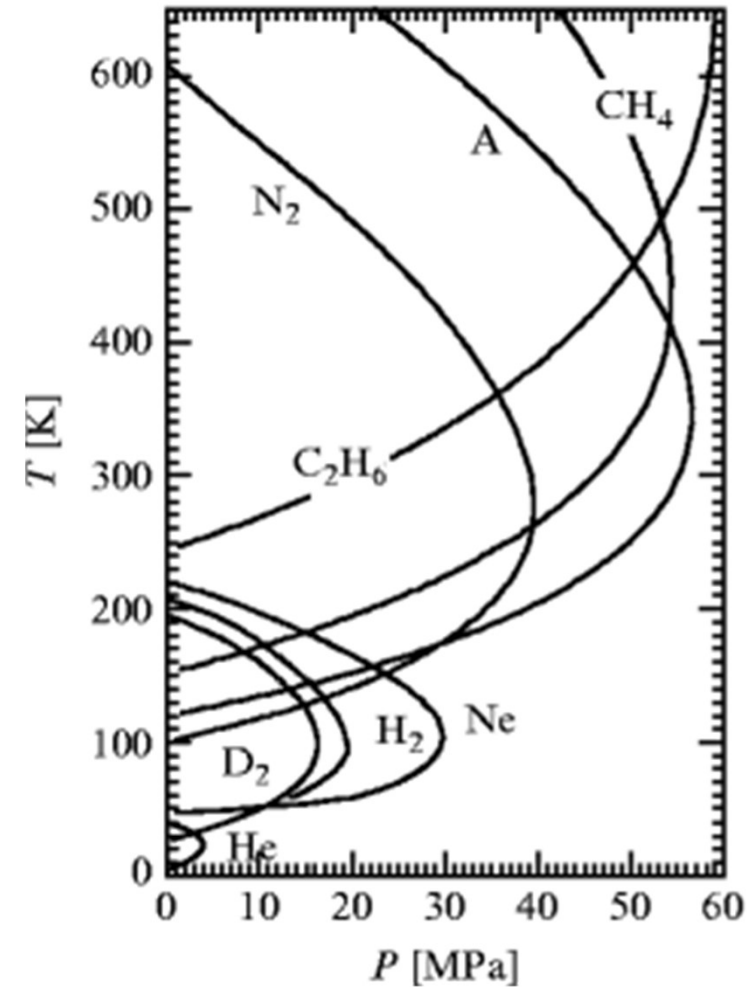
Isenthalpic curves and inversion curve for nitrogen



# Espansione di Joule-Thomson

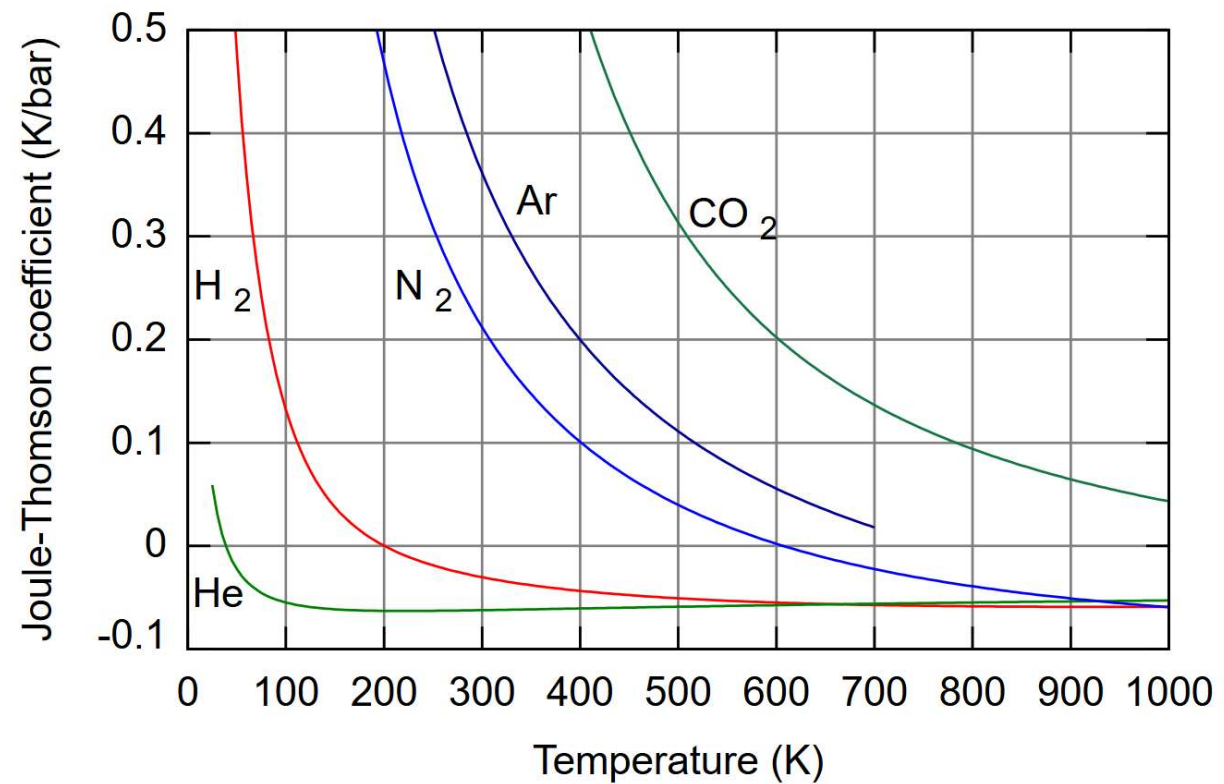
$$\mu_{JT} = \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_h$$

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

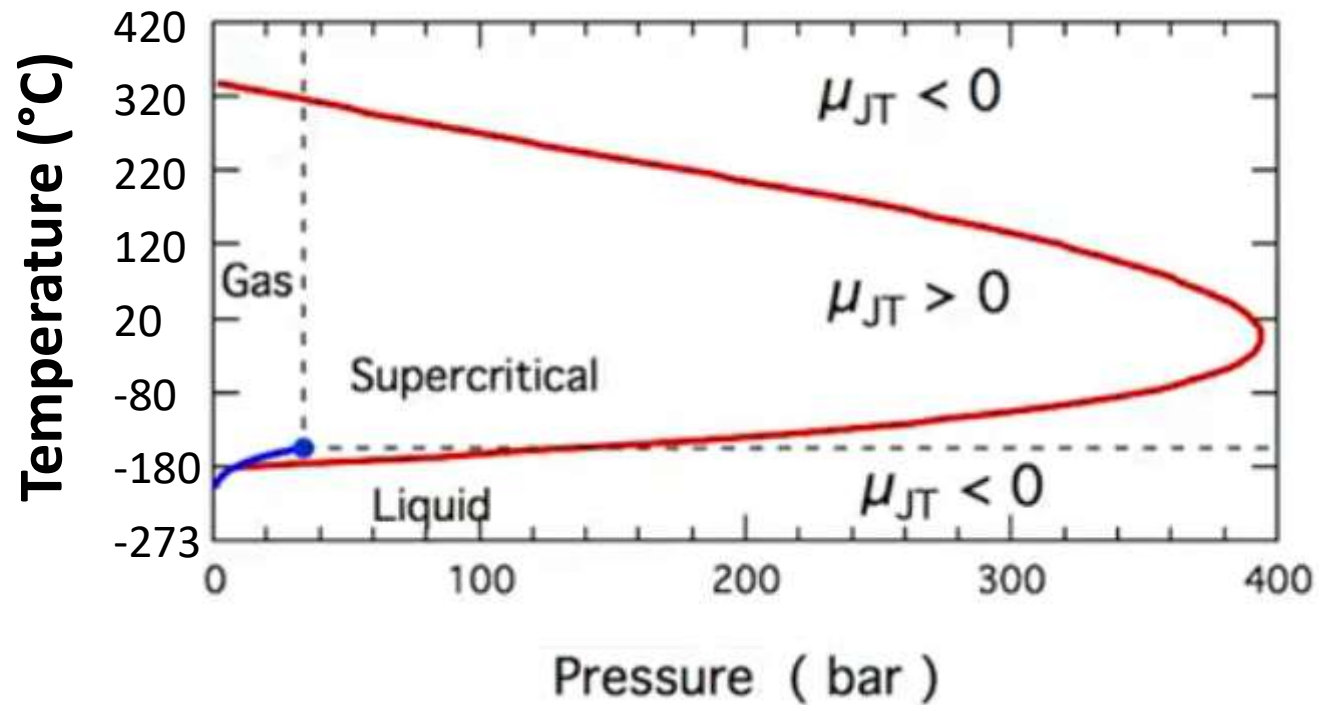


# Espansione di Joule-Thomson

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



# Espansione di Joule-Thomson



# Espansione di Joule-Thomson

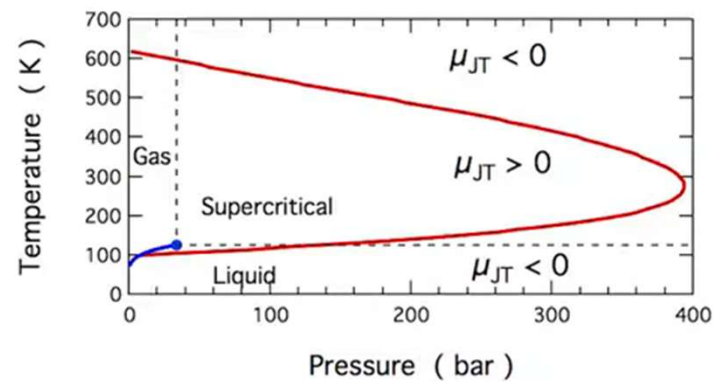
$$\Delta p = 7 \text{ bar} \longrightarrow \Delta T = 4 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$p_{in} = 62 \text{ bar}$$

$$T_{in} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$p_{fin} = 14 \text{ bar}$$

$$T_{fin} = -1 \text{ }^\circ\text{C}$$

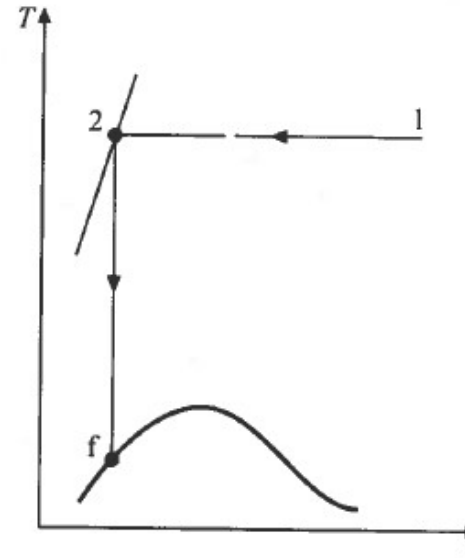
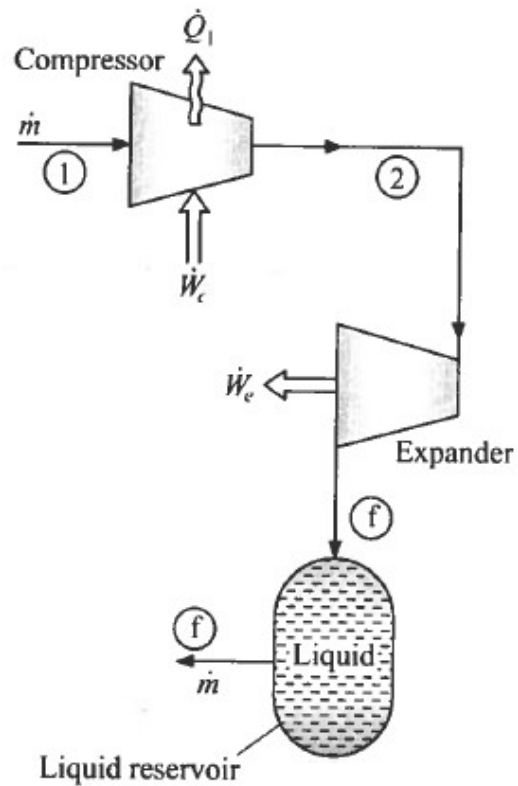


# 3. Processi criogenici di liquefazione



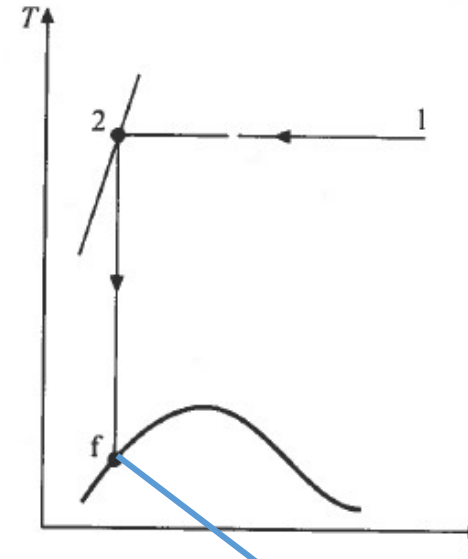
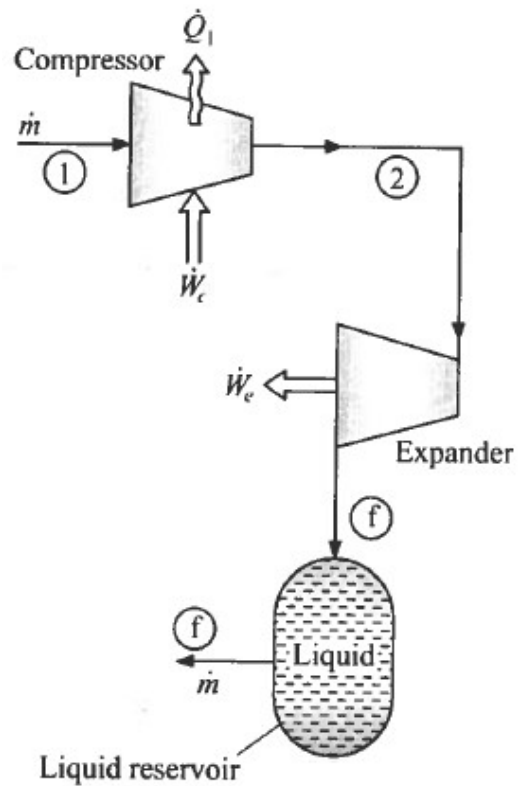


# Sistema ideale di liquefazione



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

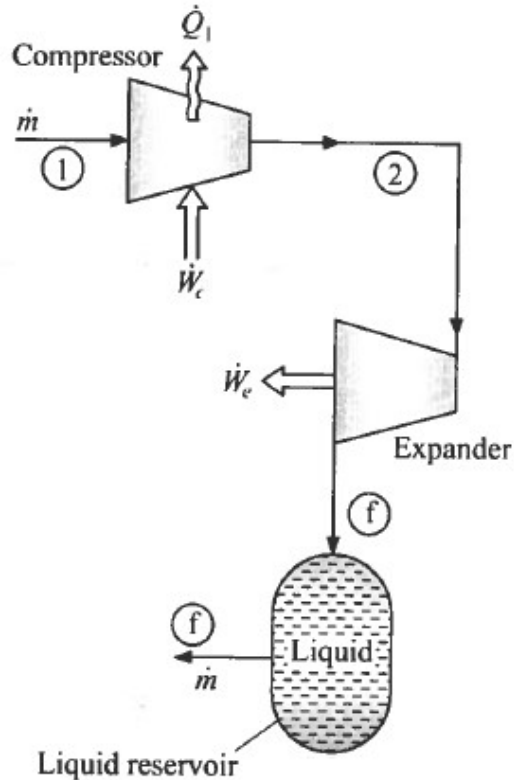
# Sistema ideale di liquefazione



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:

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

# 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)	$\Delta h$ (differenza di entalpia)	
		Calore Sens.	Calore Lat.
		(kJ/kg)	
Elio	3,19	1509	21
<b>Idrogeno</b>	<b>20,27</b>	<b>3413</b>	<b>434</b>
Neon	27,09	275	86
Azoto	77,36	224	199
Ossigeno	90,18	197	213
<b>Metano</b>	<b>111,7</b>	<b>397</b>	<b>512</b>
Etilene	169,4	163	485

# 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.

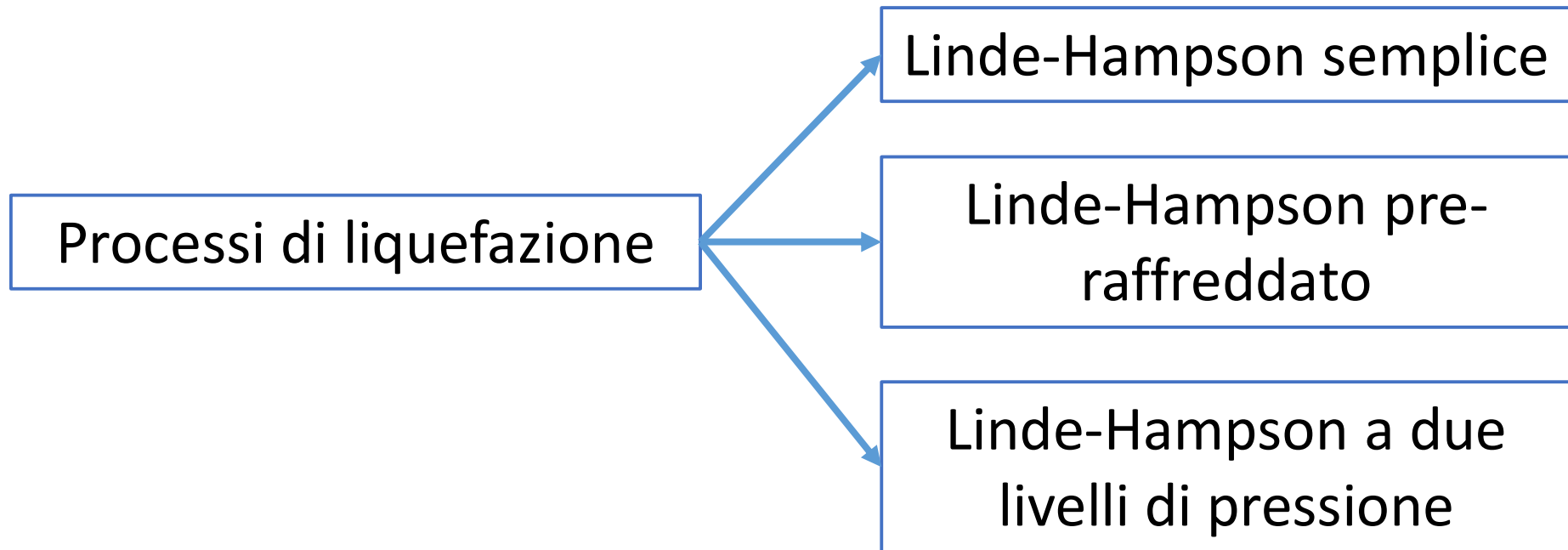
$$-W_i = T_0 * (s_1 - s_f) - (h_1 - h_f)$$

  $T_0 = \text{temp. ambiente}$

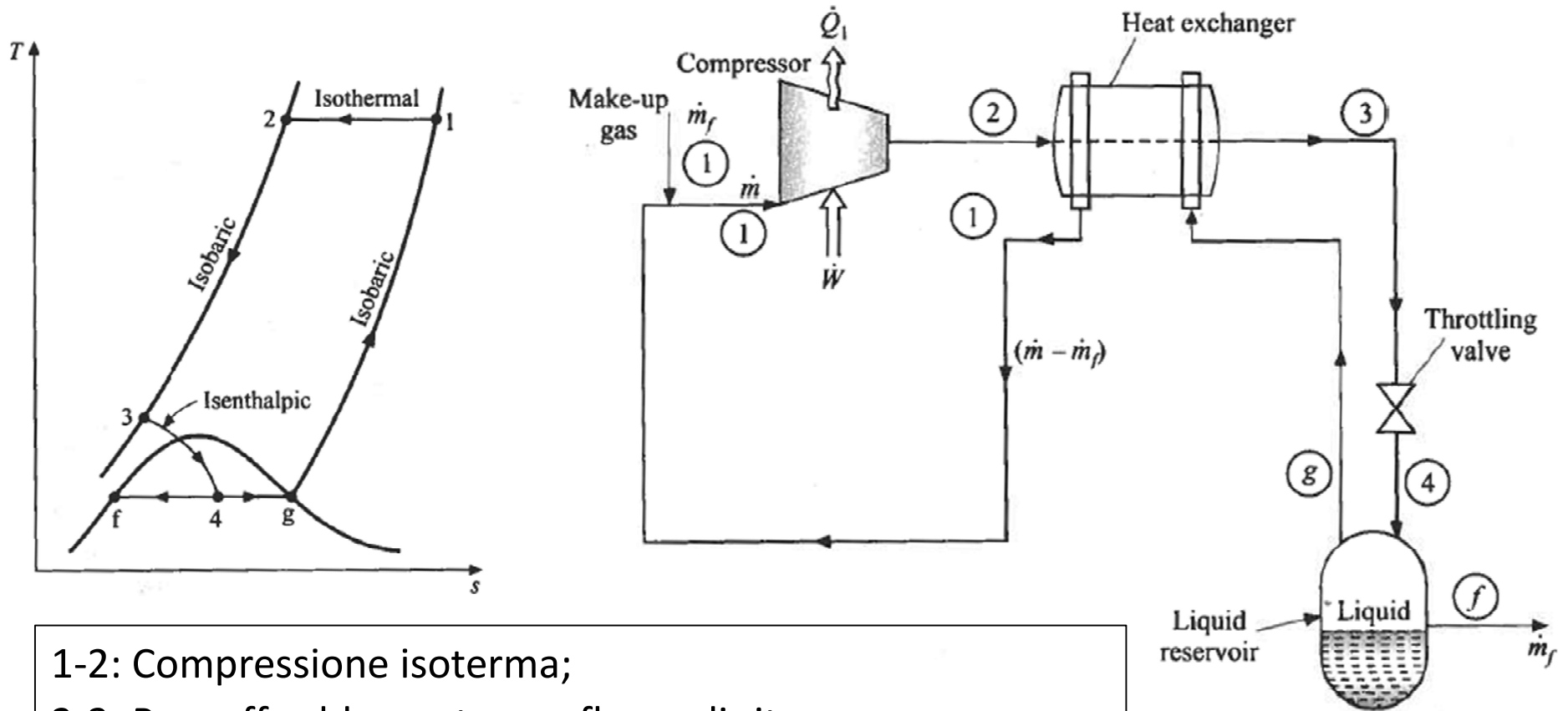
Il lavoro reale risulterà molto maggiore rispetto a quello ideale a causa delle **limitazioni termodinamiche** e dalle **irreversibilità di processo**.

# Processi di liquefazione per azoto, argon e ossigeno

Tali processi si basano sull'utilizzo dell'espansione di Joule-Thomson e sfruttando efficacemente 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).

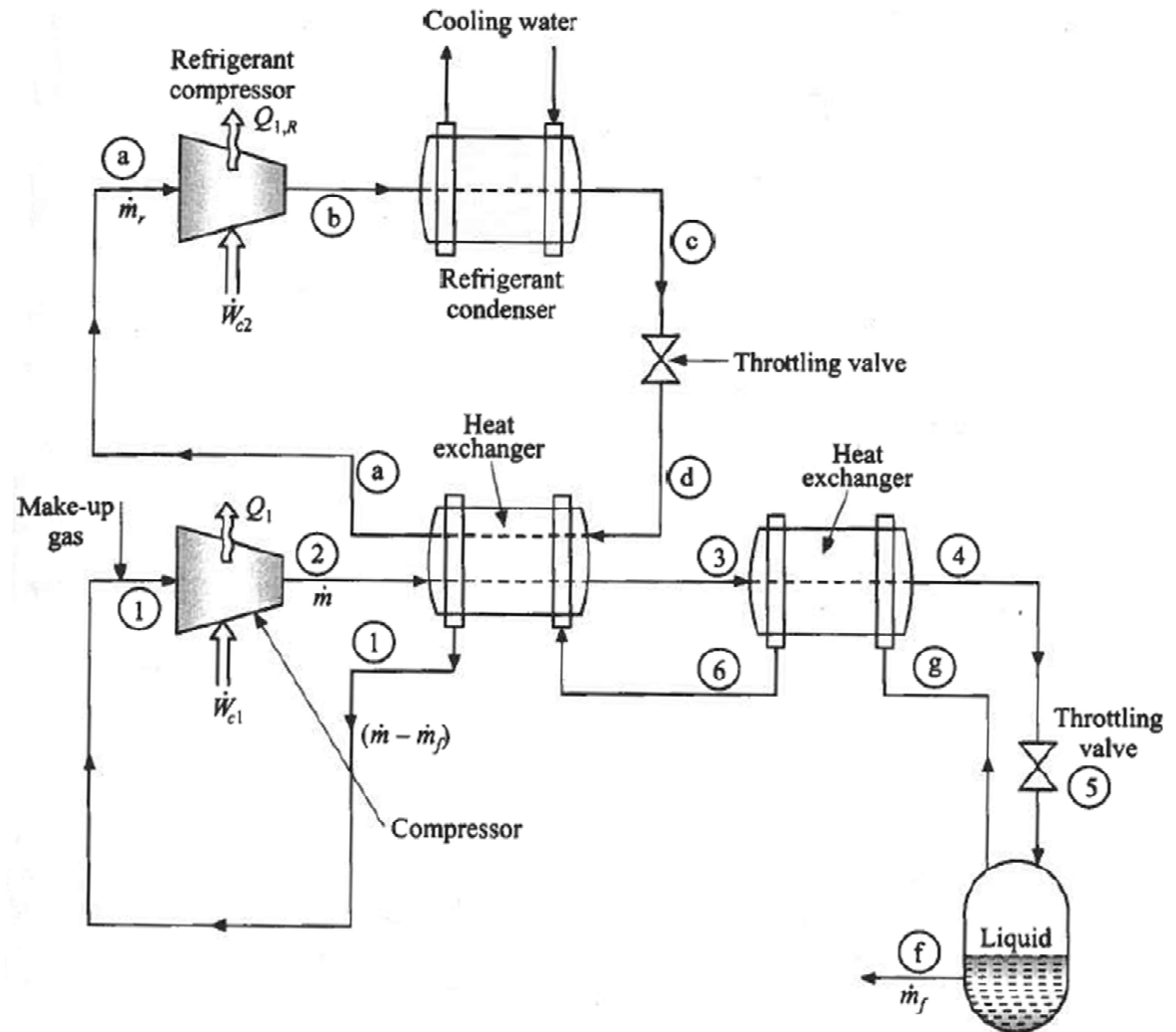
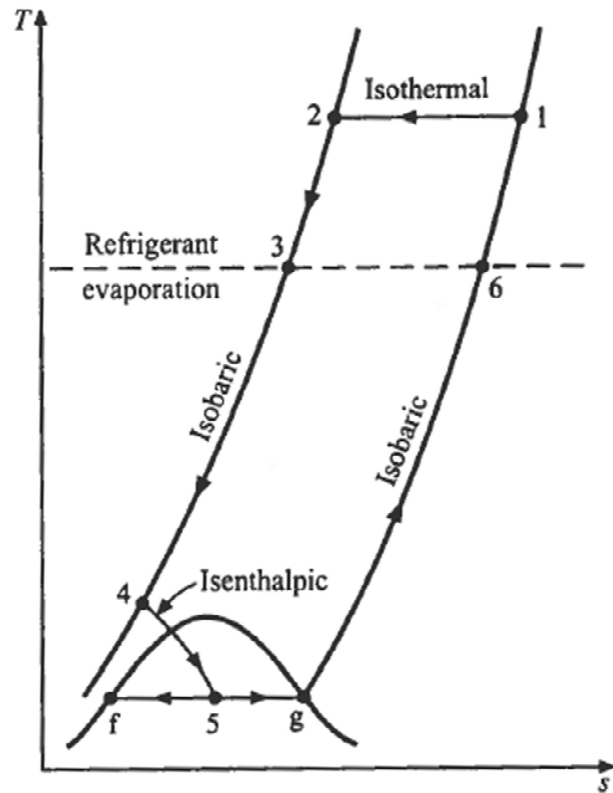


# Processo semplice di Linde-Hampson

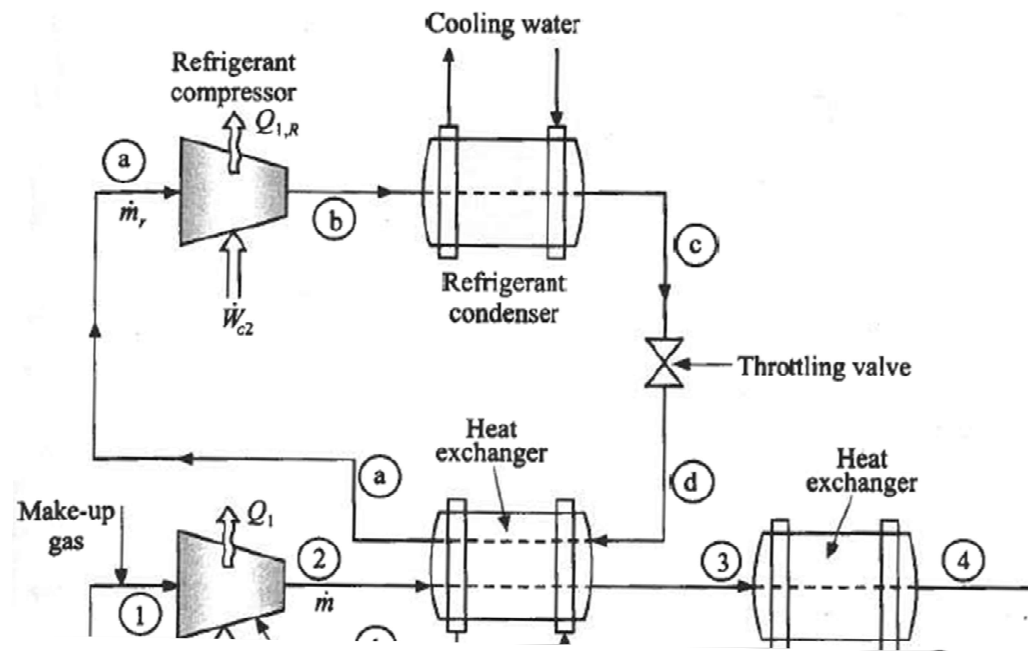


- 1-2: Compressione isoterma;
- 2-3: Pre-raffreddamento con flusso di ritorno;
- 3-4: Laminazione isoentalpica;
- 4-g: Separazione vapore saturo;
- 4-f: Separazione liquido saturo;
- g-1: Vapore saturo scambia calore e viene riportato a  $T_{amb}$

# Processo di Linde-Hampson pre-raffreddato



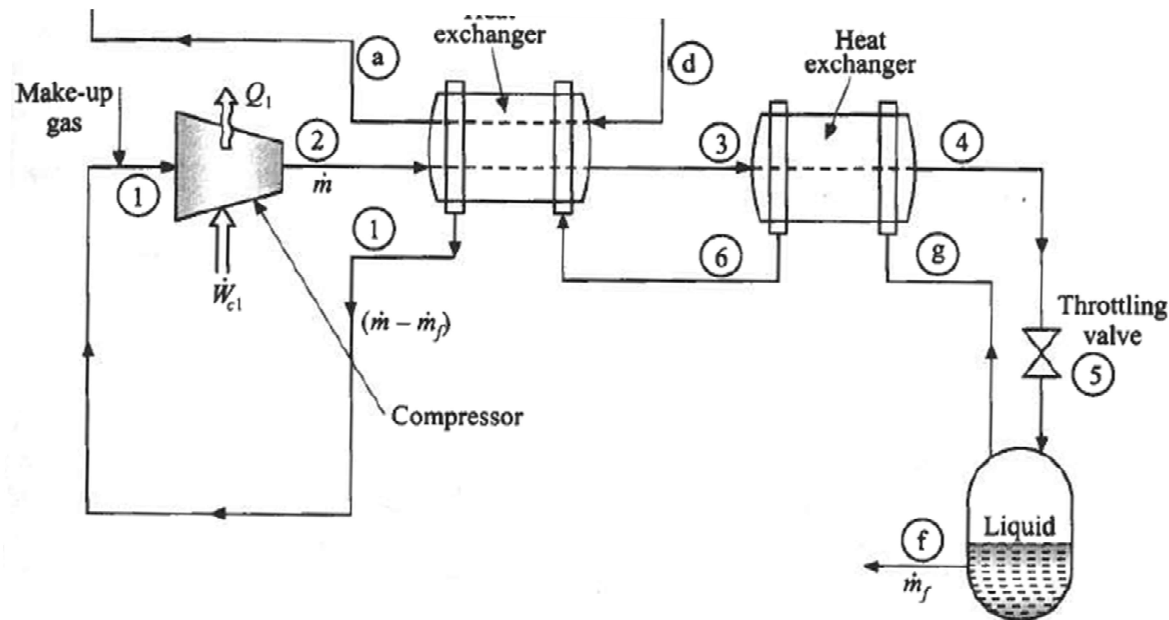
# Processo di Linde-Hampson pre-raffreddato



- **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;

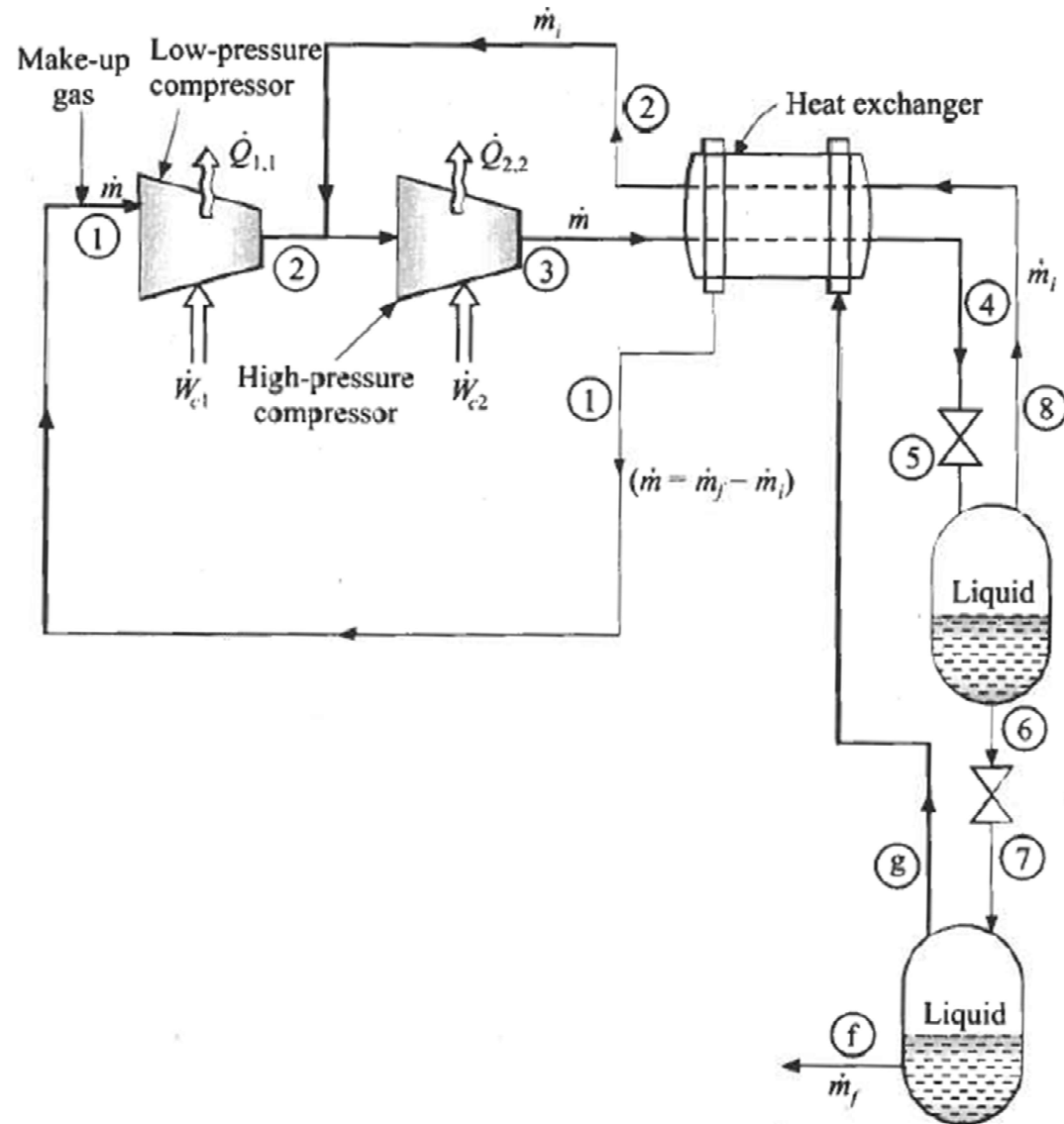
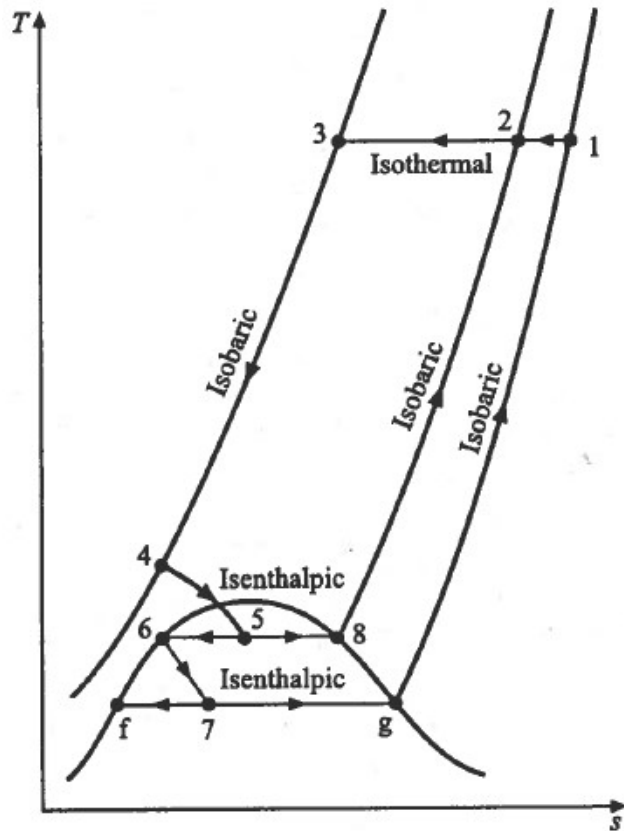


# Processo di Linde-Hampson pre-raffreddato

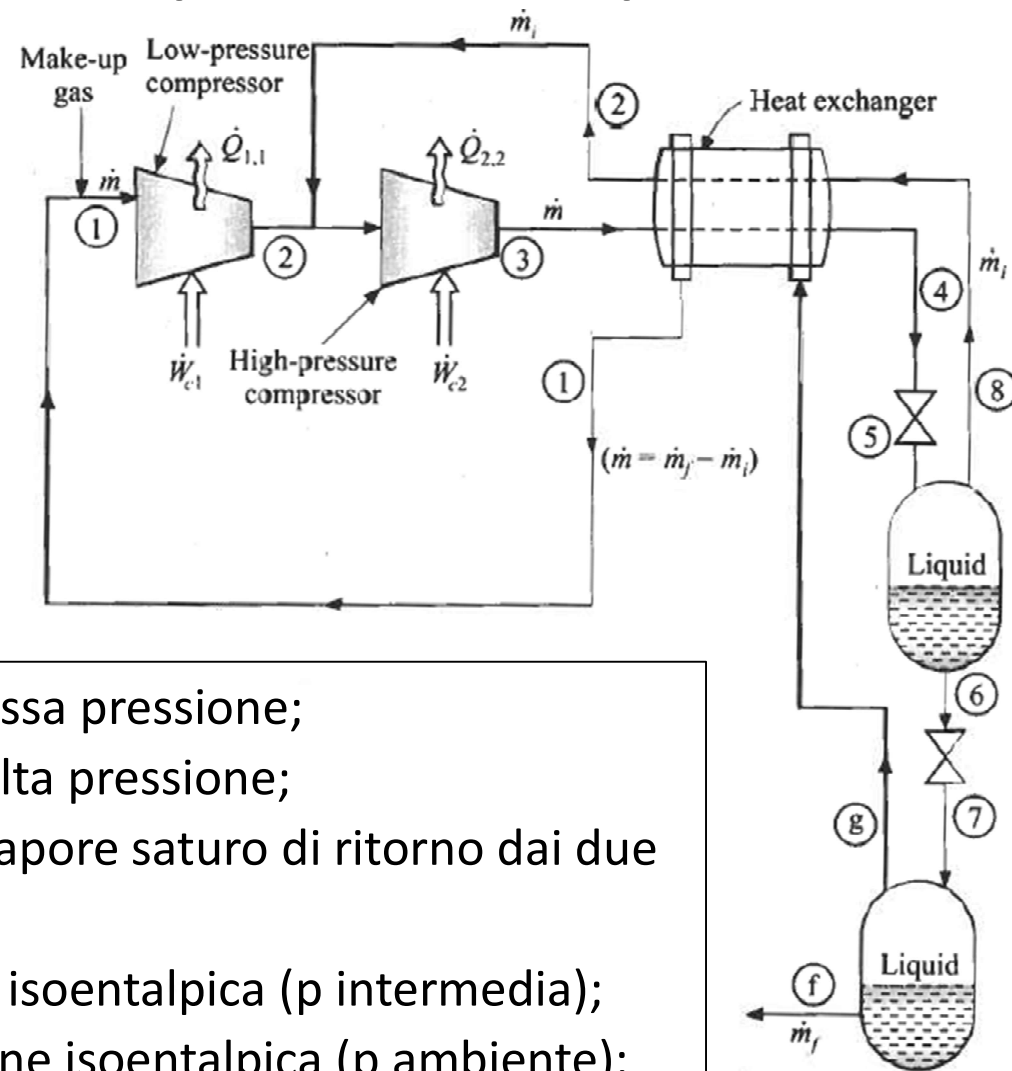
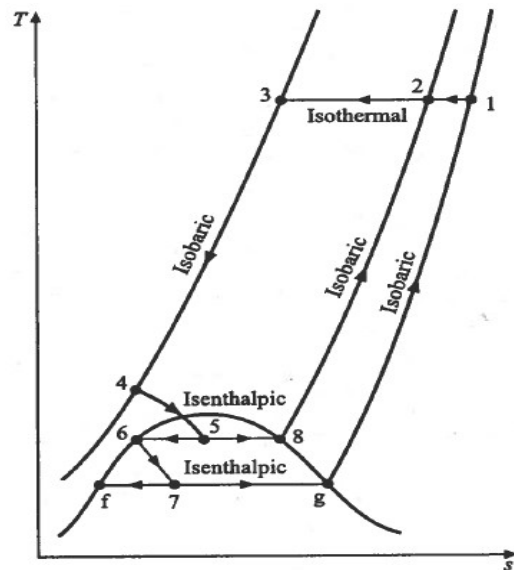


- **1-2**: Compressione isoterma;
- **2-3**: Flusso preraffreddato da refrigerante e flusso di ritorno;
- **3-4**: Raffreddamento mediante vapore saturo di ritorno;
- **4-5**: Laminazione isoentalpica;
- **5-f (g)**: Separazione in liquido saturo (vapore saturo);
- **g-6**: Vapore saturo raffredda flusso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

# Processo di Linde-Hampson a due pressioni

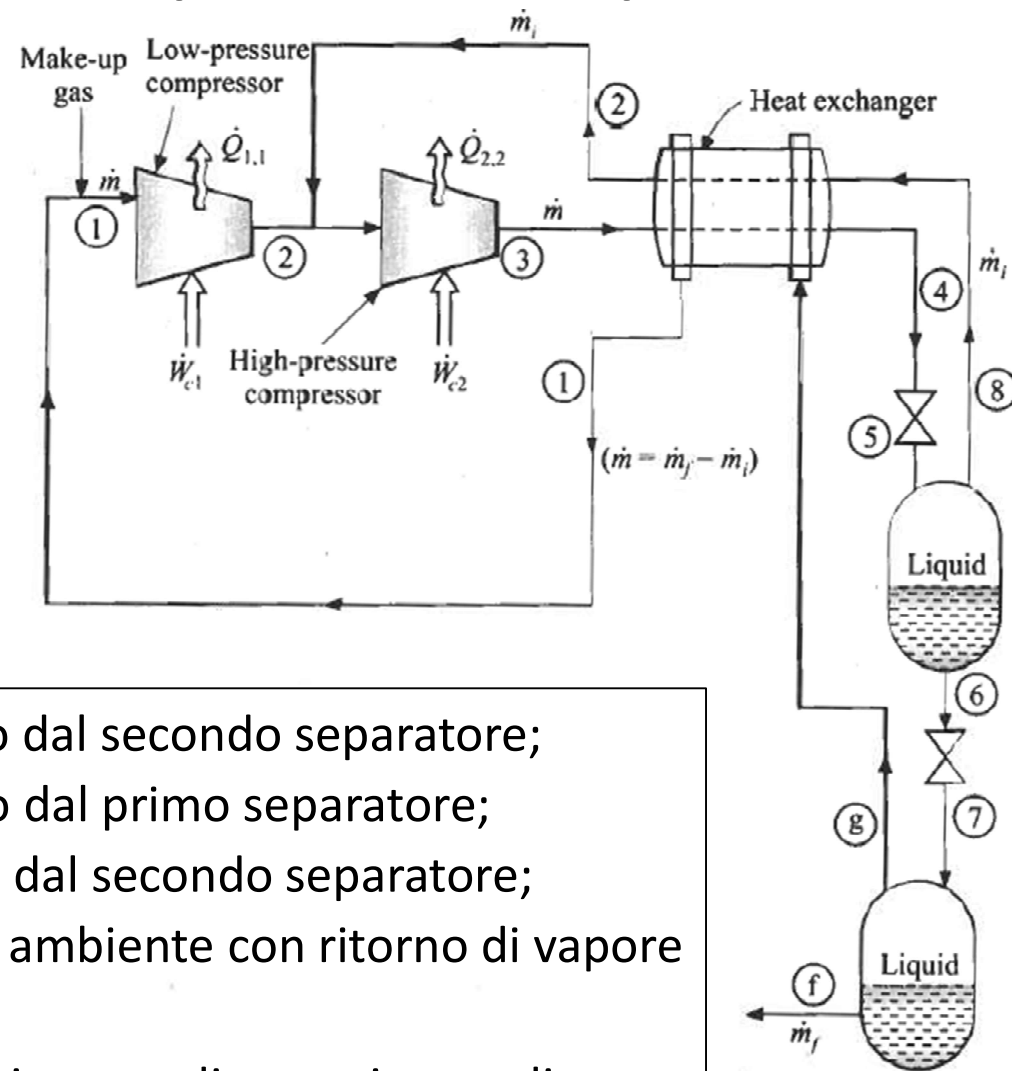
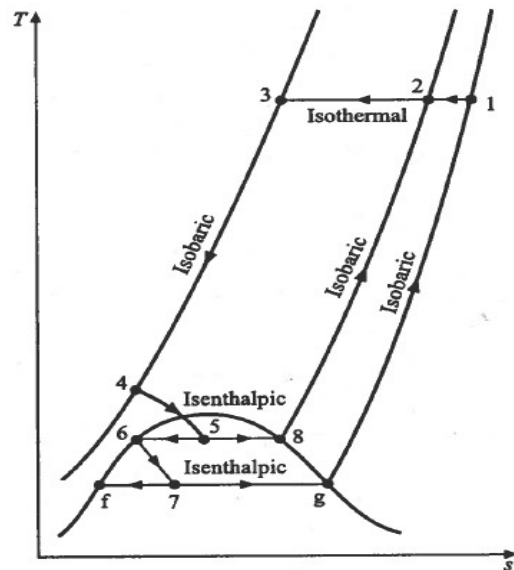


# Processo di Linde-Hampson a due pressioni



- **1-2:** Compression 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;

# 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;

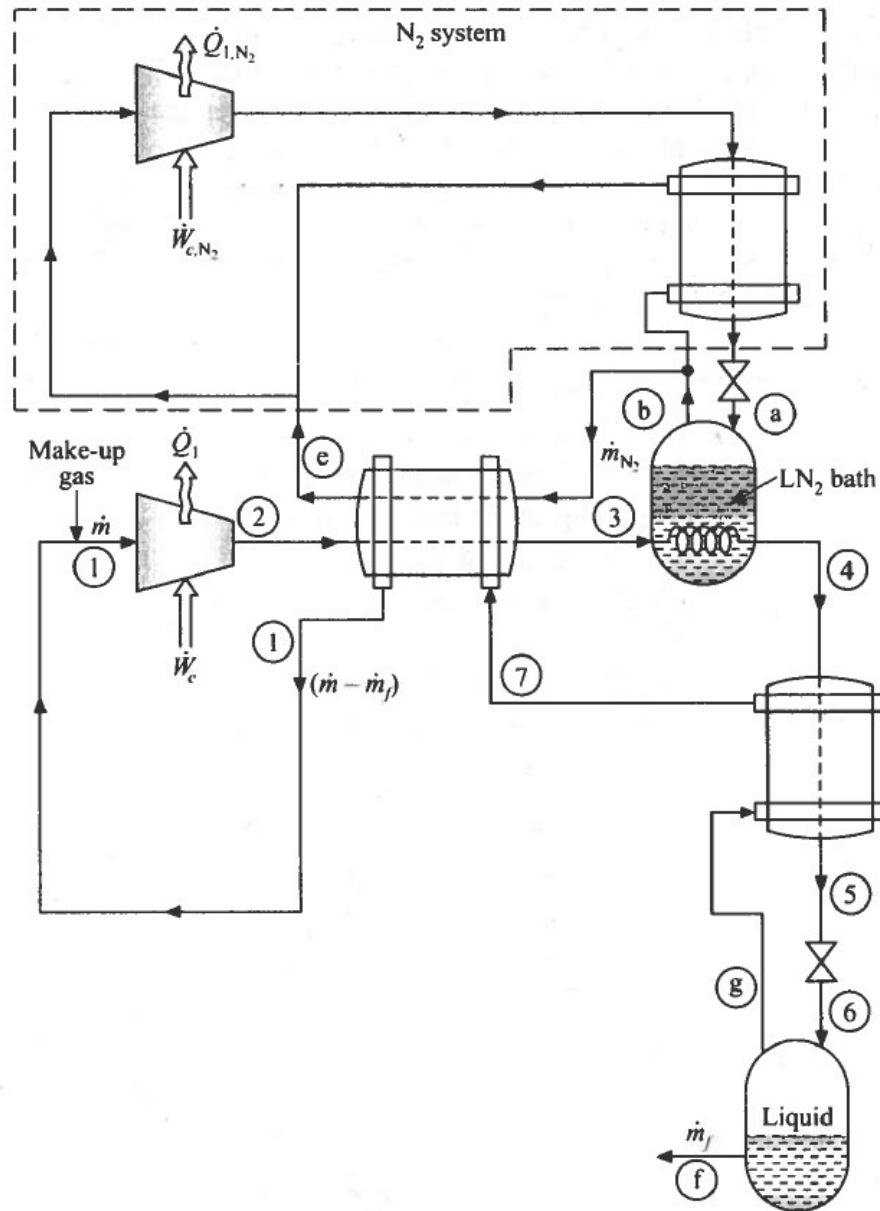
b) Utilizzo di gel di silice o carboni attivi per rimuoverle a temperatura dell'azoto liquido;

## 3. Conversione da orto-idrogeno a para-idrogeno:

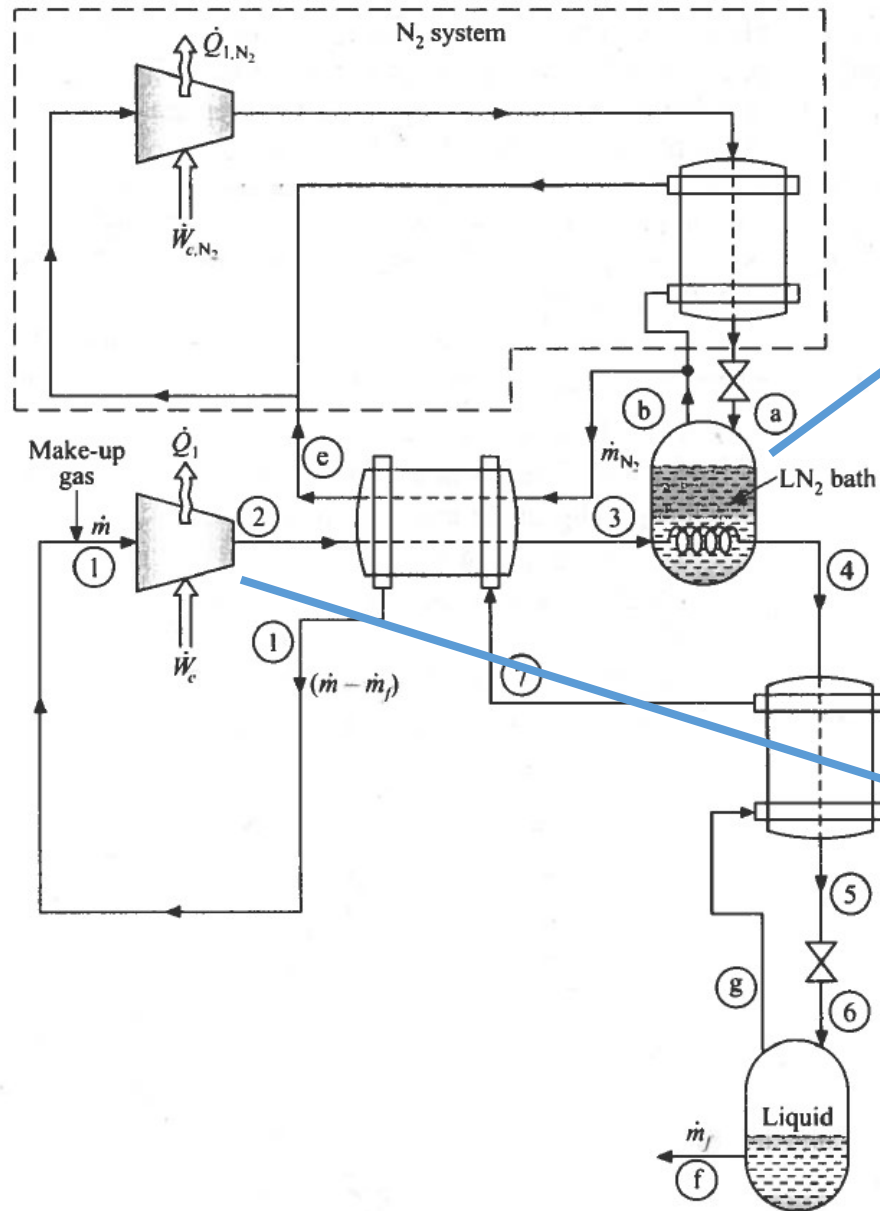
a) **Lenta**, sarà necessario l'utilizzo di catalizzatori metallici (ossido di cromo in supporto di alluminio o gel di idrossido di ferro granulare);

b) **Esotermica**, sarà necessario estrarre calore a bassa temperatura;

# Processo di Linde-Hampson pre-raffreddato



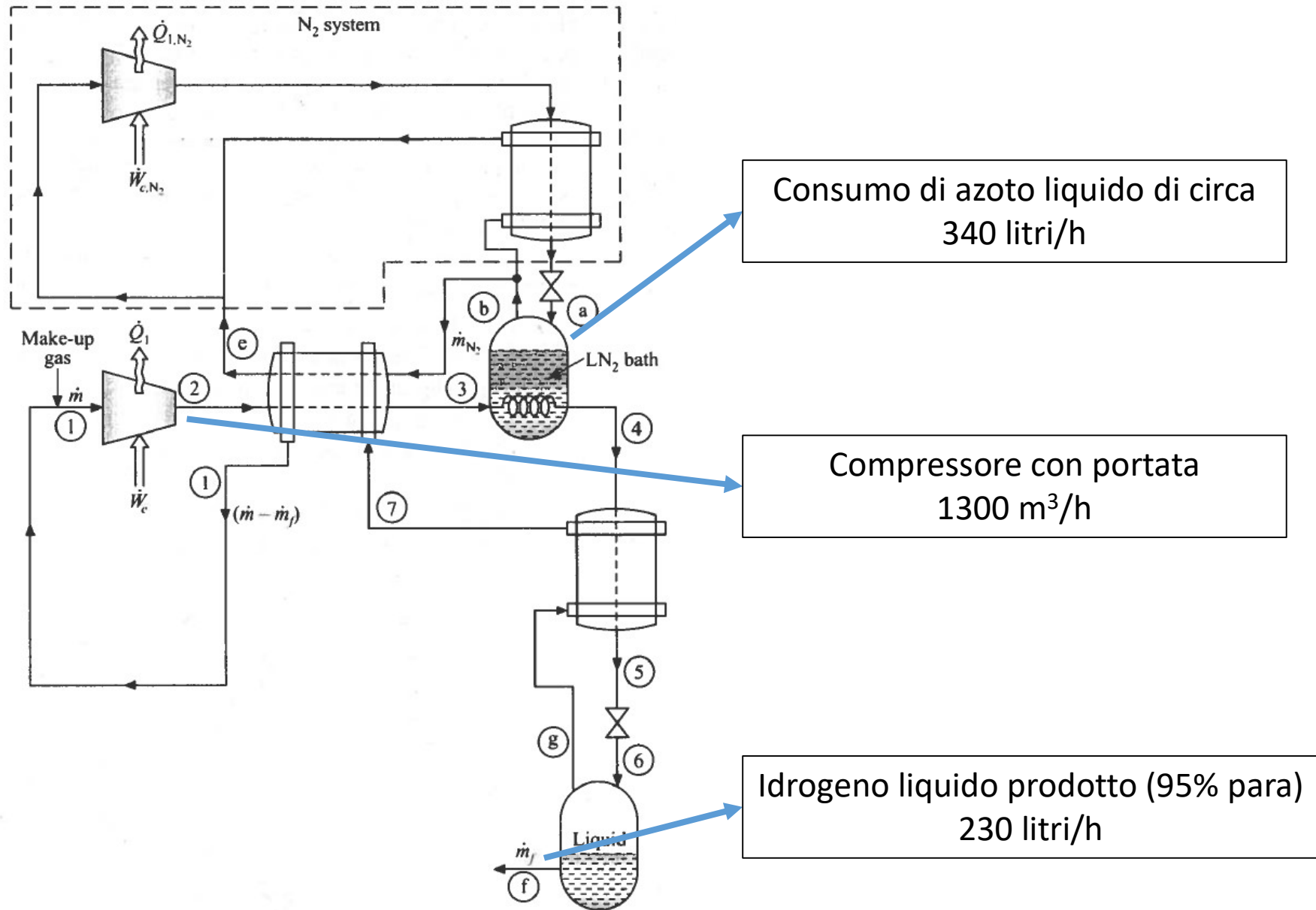
# Processo di Linde-Hampson pre-raffreddato



Azoto si trova allo stato liquido a  $T=66\text{ K}$  e  $p=0,2\text{ bar}$

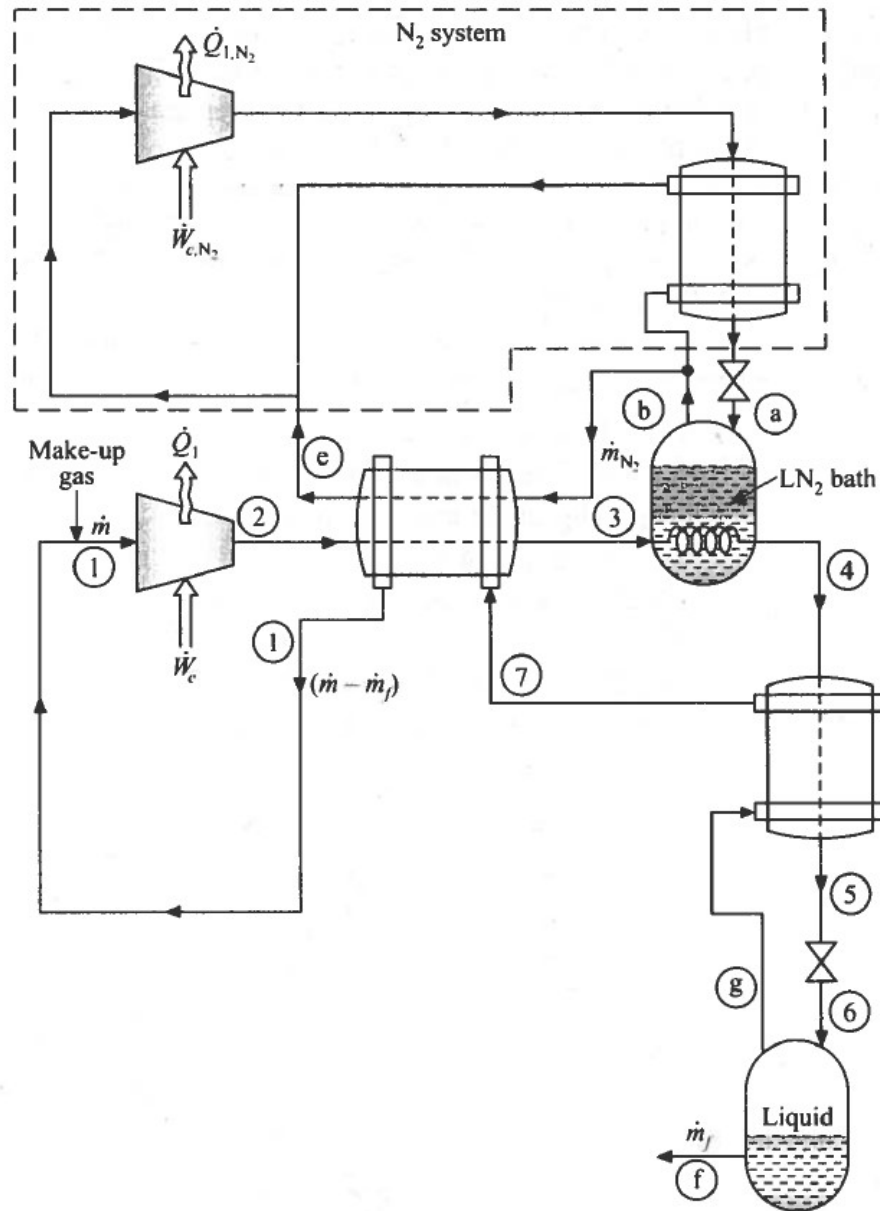
Compressione di idrogeno fino a circa 100 bar

# 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>/gg

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:*

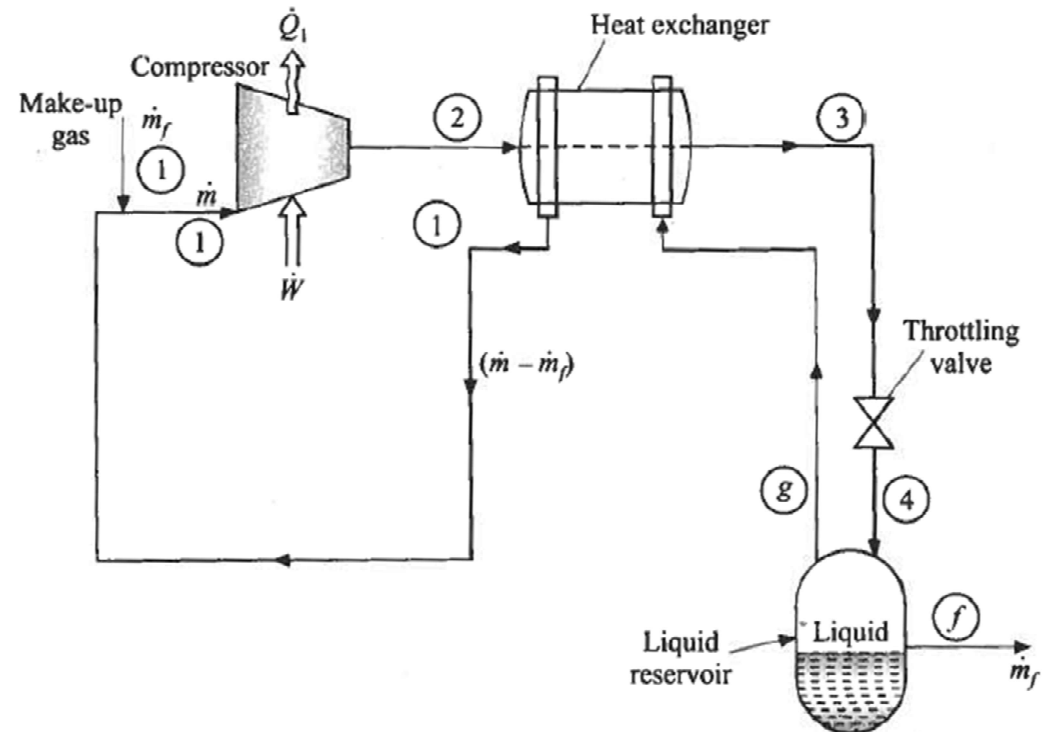
$$T_{amb} = T_1 = 300 \text{ K}$$

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

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

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

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



# 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
--
```

# 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

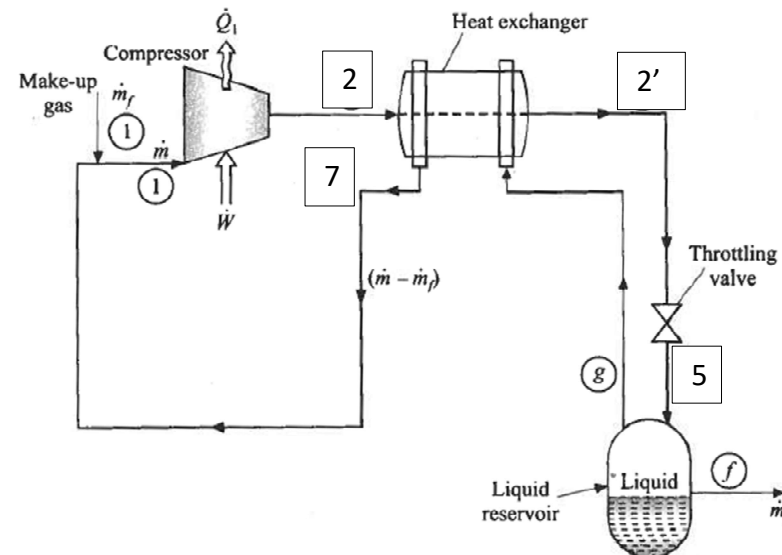
# Esercizio 1: Linde-Hampson semplice

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

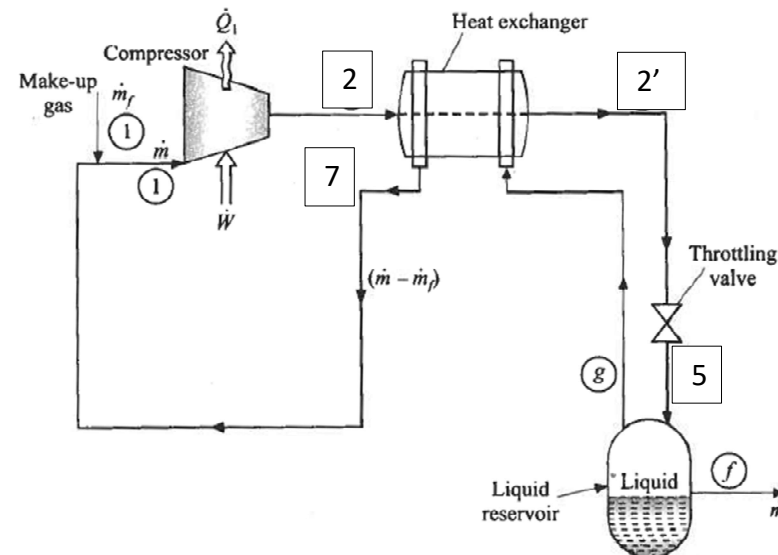
10) Bilancio secondo il primo principio della termodinamica:

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

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

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

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



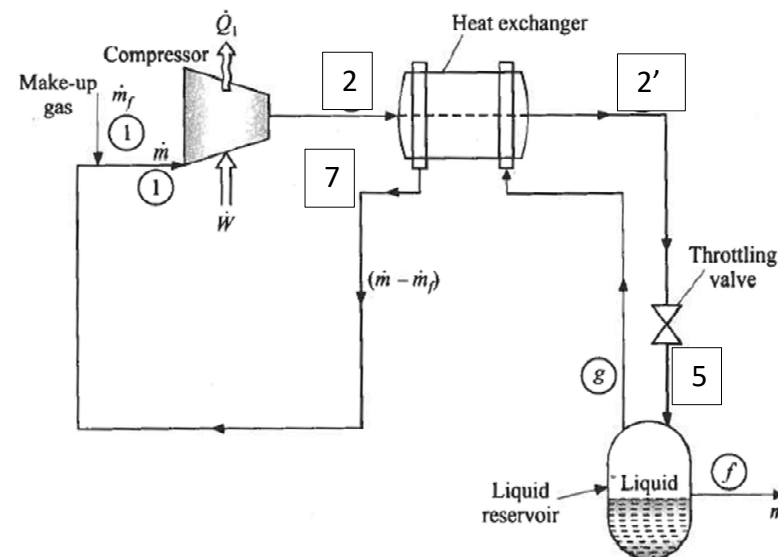
# Esercizio 1: Linde-Hampson semplice

- 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:

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



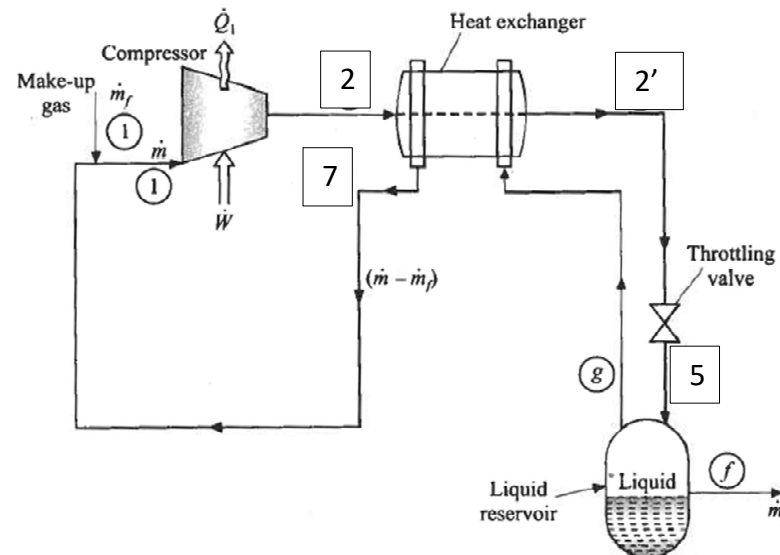
# Esercizio 1: Linde-Hampson semplice

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

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

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

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



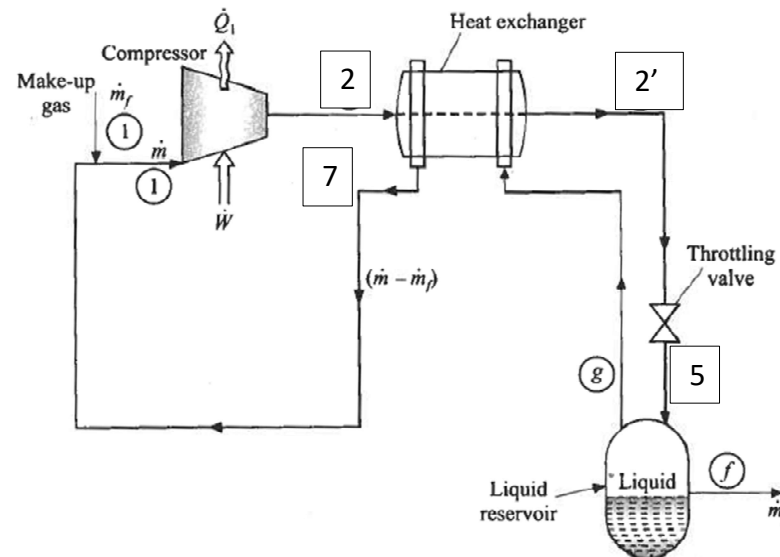
# Esercizio 1: Linde-Hampson semplice

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

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

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

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

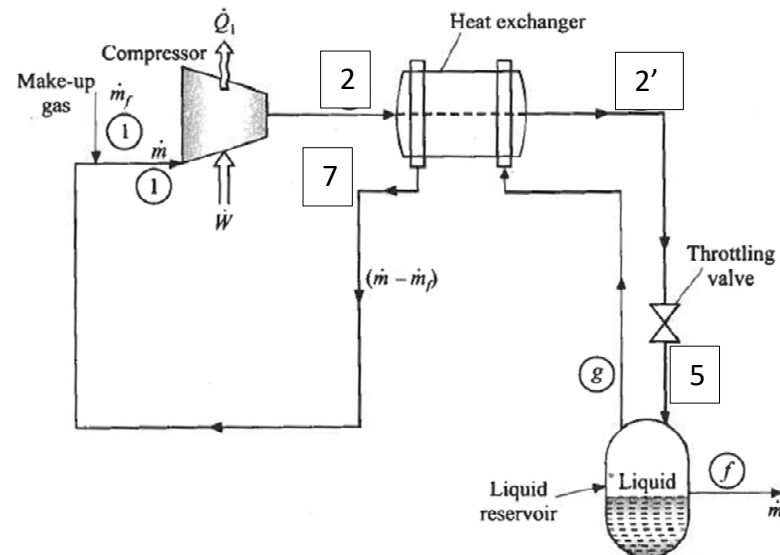




# Esercizio 1: Linde-Hampson semplice

- 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
```

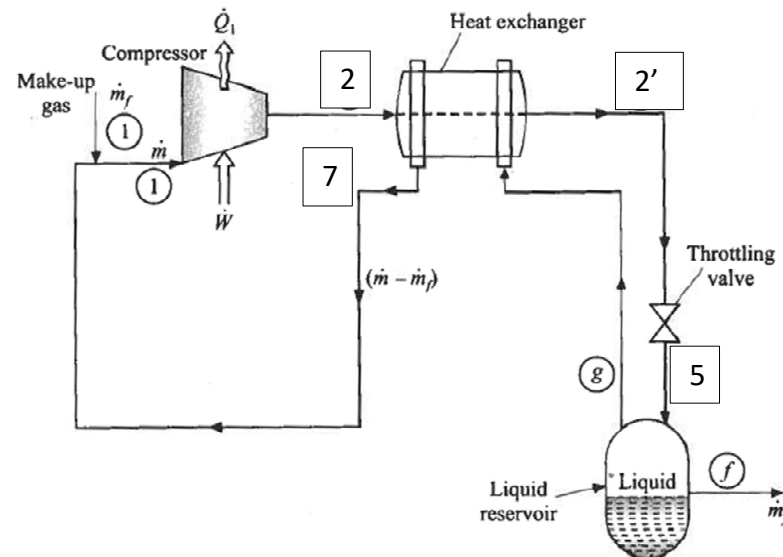


# Esercizio 1: Linde-Hampson semplice

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

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

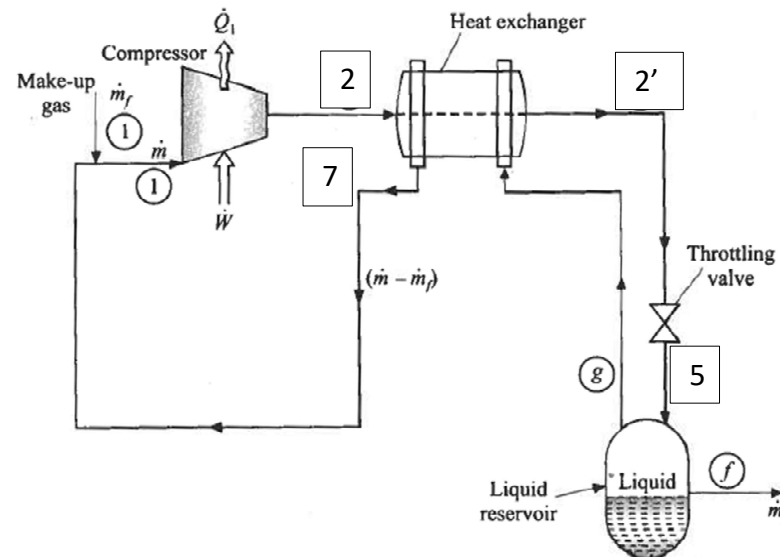
39  
40 FOM=W\_i/W\_l  
41



# 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:

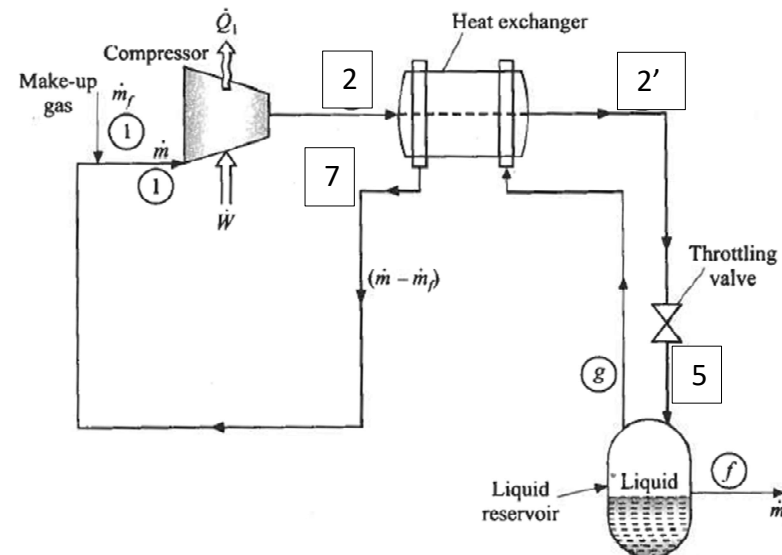
```
In [6]: runfile('C:/Users/david/Desktop/NP Files/Modello/Modello/prova_2.py',  
wdir='C:/Users/david/Desktop/NP Files/Modello/Modello')  
Fino a che pressione comprimo azoto
```

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

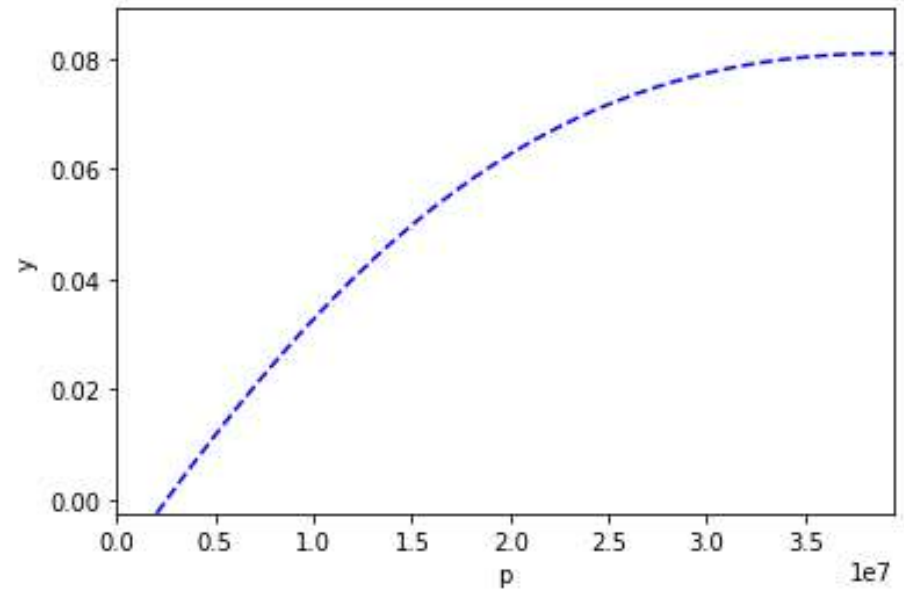
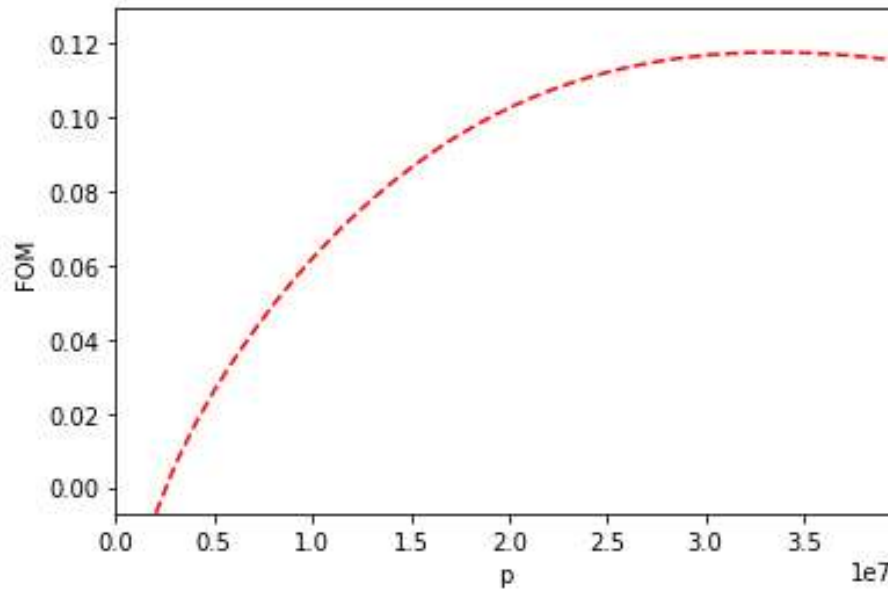
8) Creo i grafici con matplotlib;

```
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:*

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

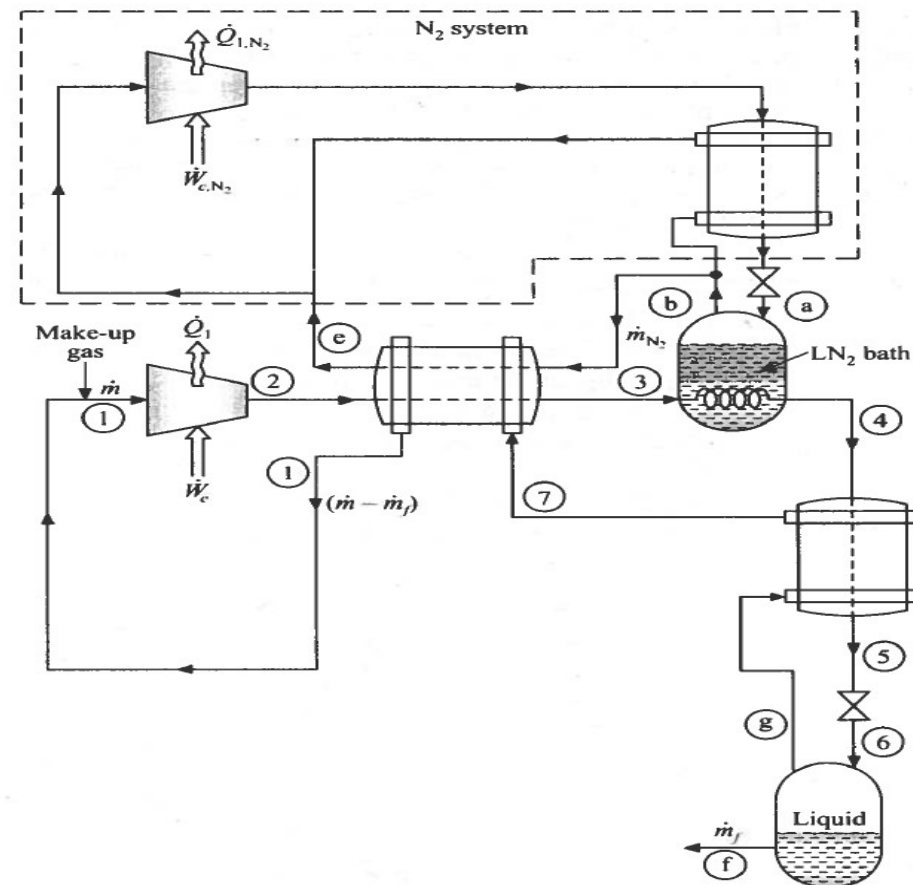
$$p_{amb} = p_1 = 1 \text{ atm}$$

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

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

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

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



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

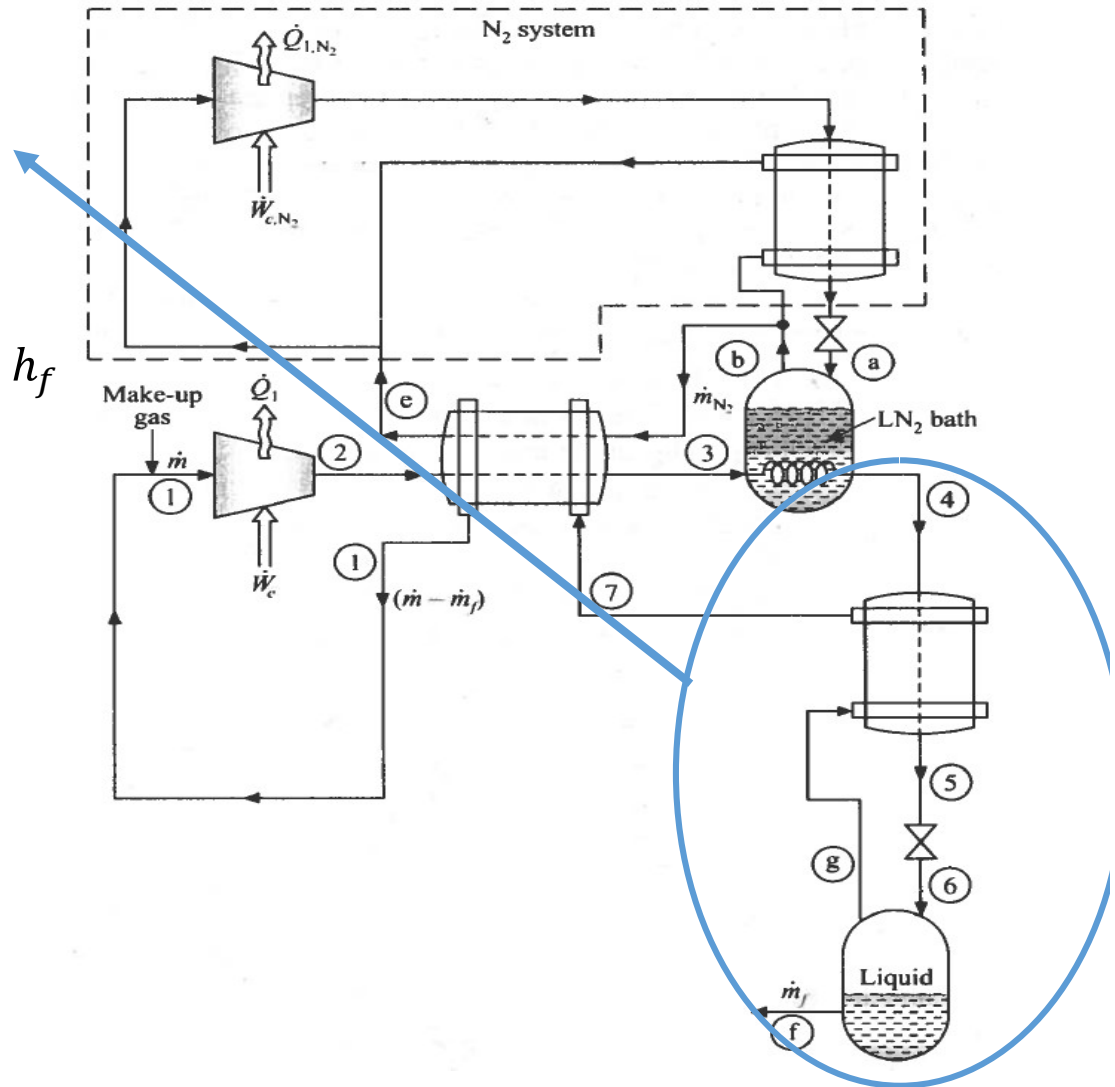
Primo principio della Termodinamica:

$$m_{TOT} * h_4 - m_g * h_7 = m_f * h_f$$

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

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

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



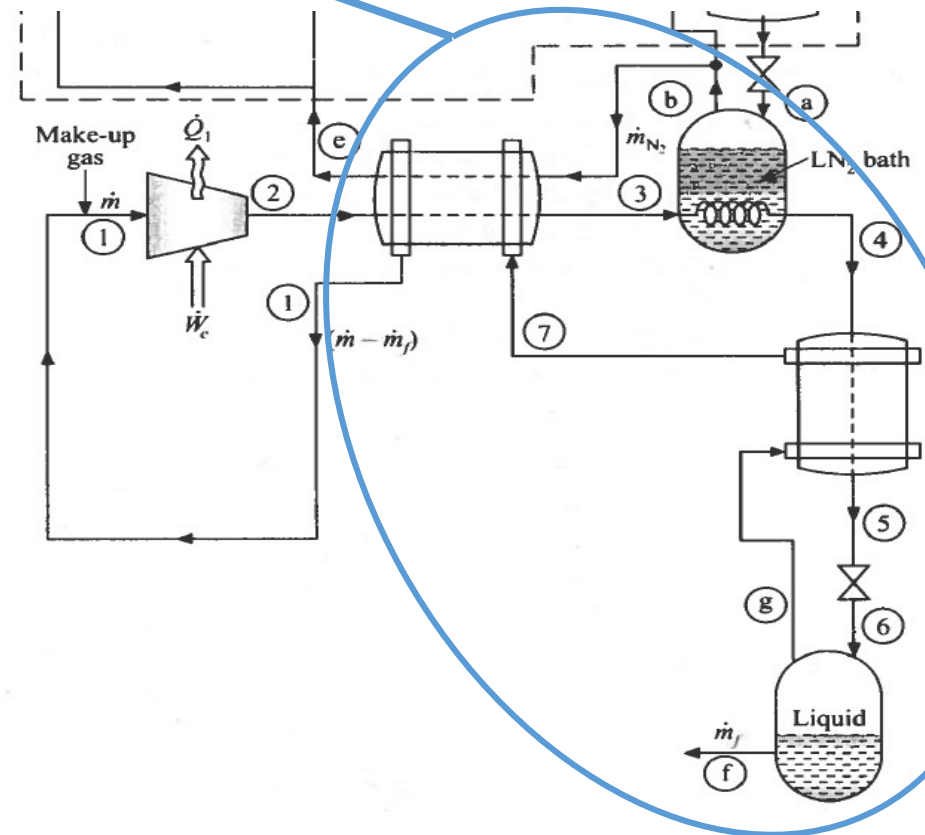


# Esercizio 3: Linde-Hampson pre-raffreddato per idrogeno

Primo principio della Termodinamica:

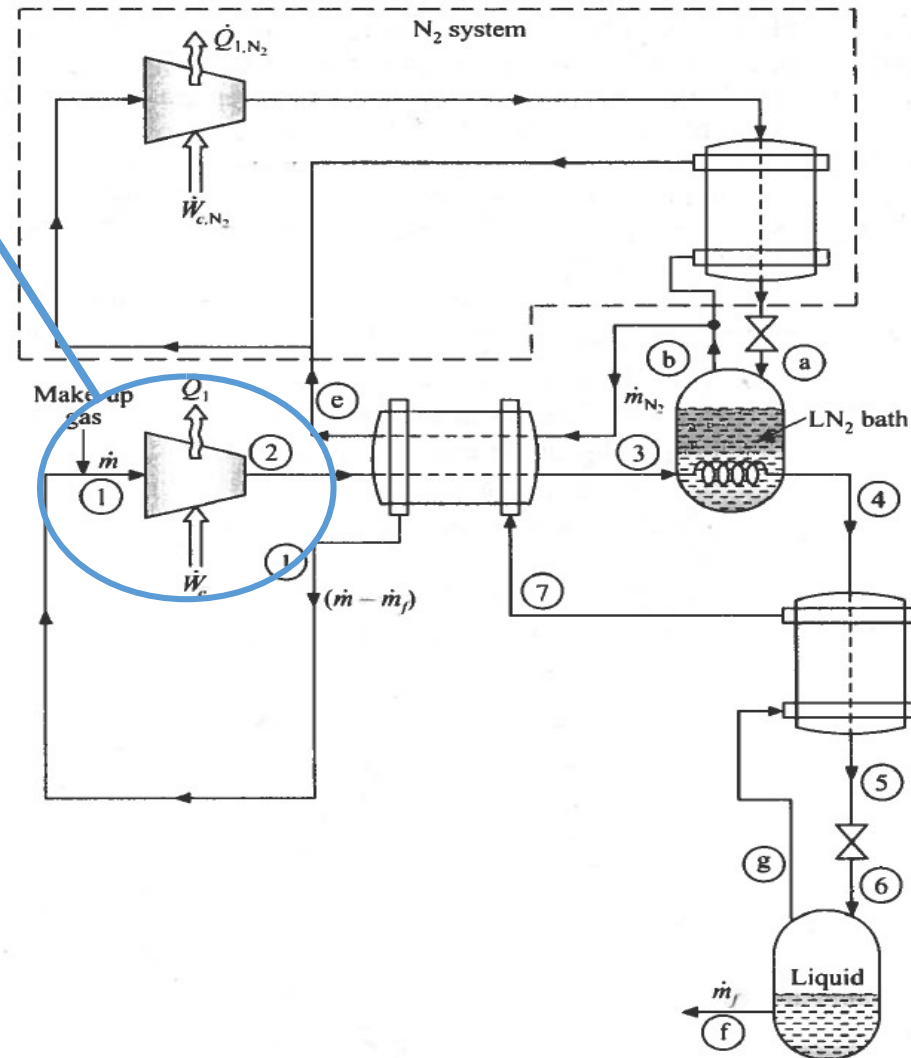
$$m_{TOT} * h_2 + m_N * h_a = m_N * h_c + (m_{TOT} - m_L) * h_1 + m_L * h_f$$

$$z = \frac{h_2 - h_g}{h_c - h_a} + y * \frac{h_g - h_f}{h_c - h_a}$$



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

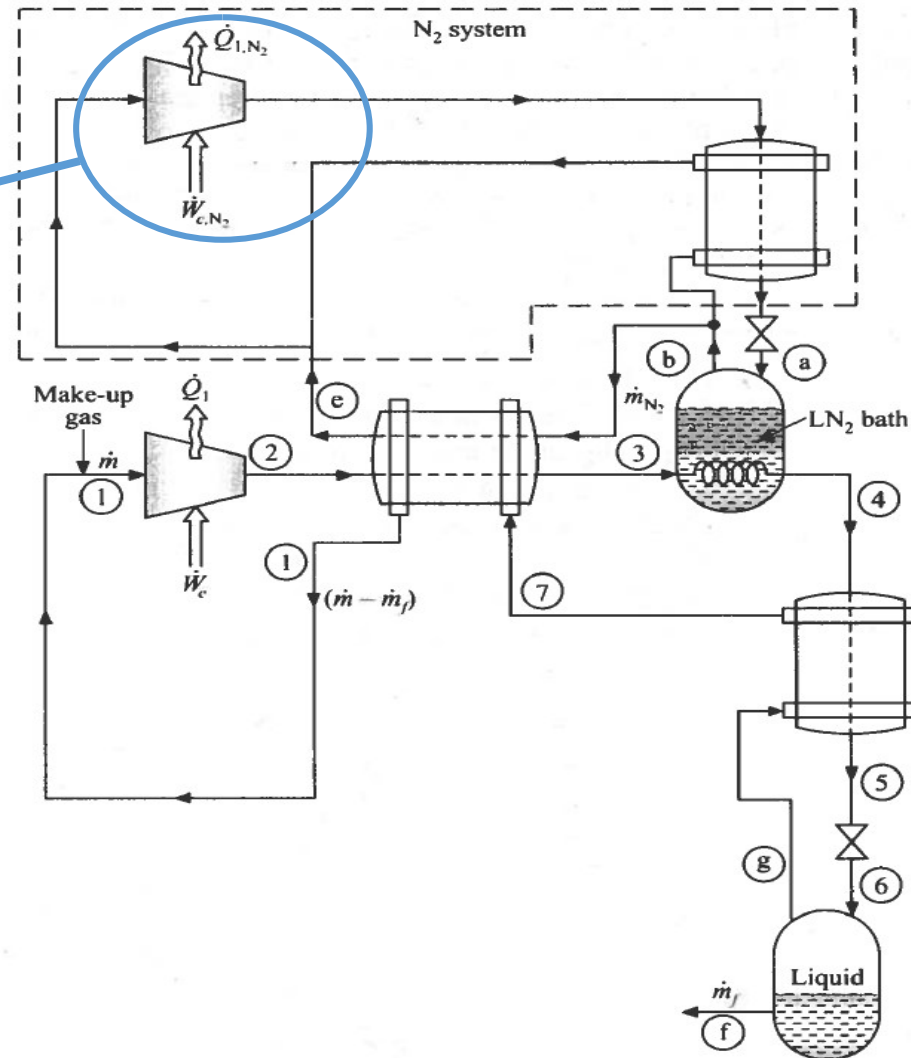
$$\frac{\dot{W}}{\dot{m}_{TOT}} = [T_1(s_1 - s_2) - (h_1 - h_2)]$$



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

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

$$\frac{\dot{W}_{TOT}}{\dot{m}_{TOT}} = \frac{\dot{W}}{\dot{m}_{TOT}} + \frac{W_l}{z}$$

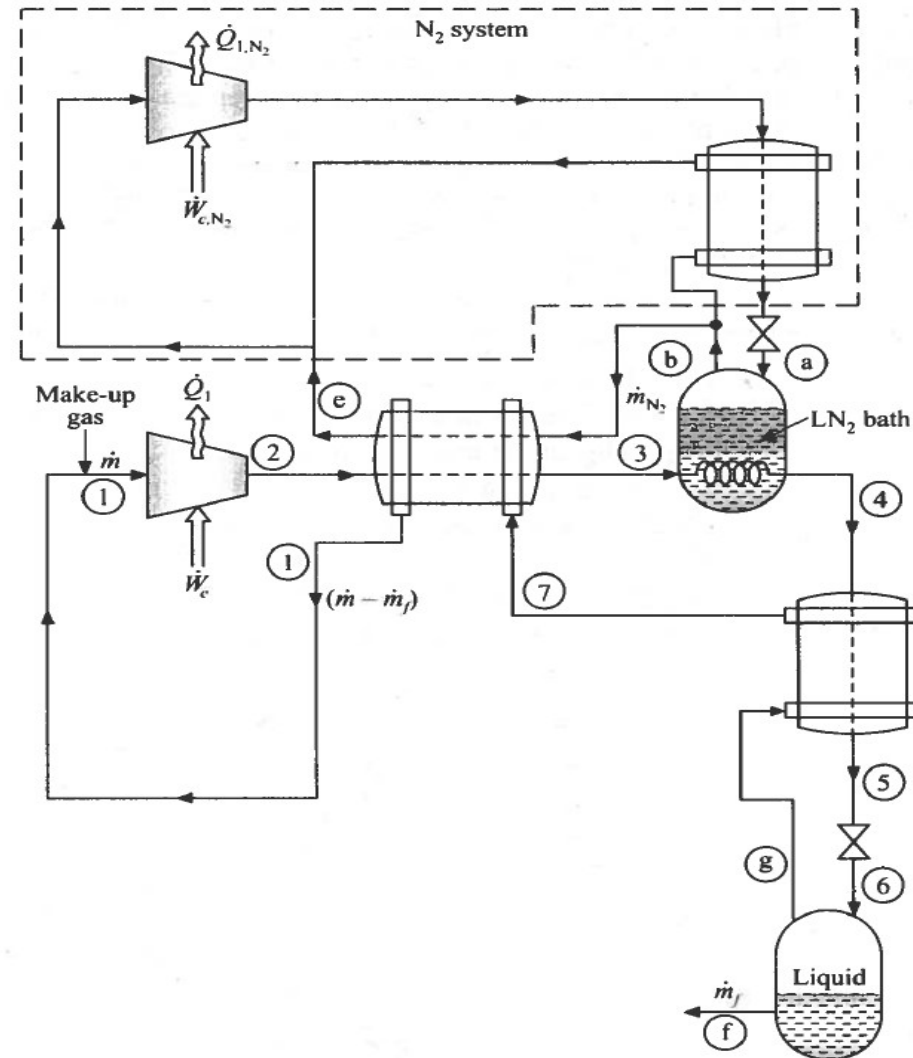


# Esercizio 3: Linde-Hampson pre-raffreddato per idrogeno

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

$$\frac{\dot{W}_{TOT}}{\dot{m}_{TOT}} = \frac{\dot{W}}{\dot{m}_{TOT}} + \frac{W_l}{z}$$

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



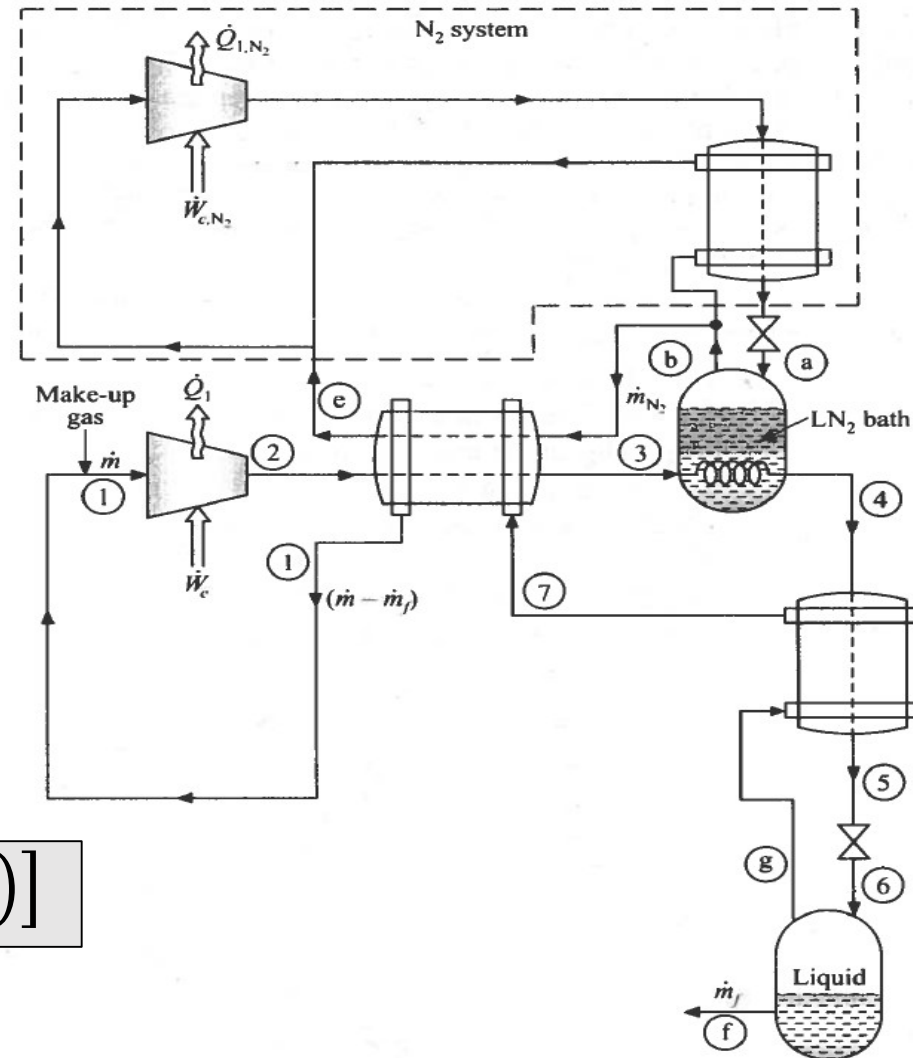
# Esercizio 3: Linde-Hampson pre-raffreddato per idrogeno

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

$$\frac{\dot{W}_{TOT}}{\dot{m}_{TOT}} = \frac{\dot{W}}{\dot{m}_{TOT}} + \frac{W_l}{z}$$

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

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



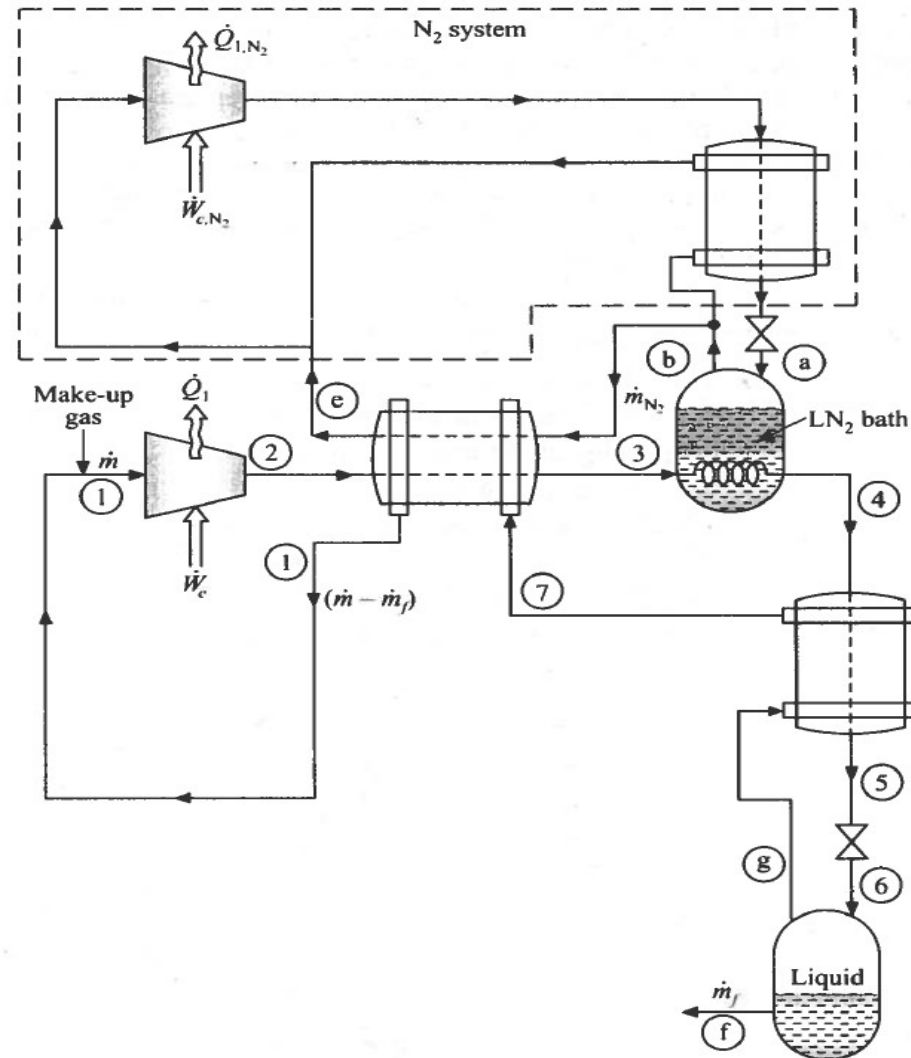
# Esercizio 3: Linde-Hampson pre-raffreddato per idrogeno

## 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

```



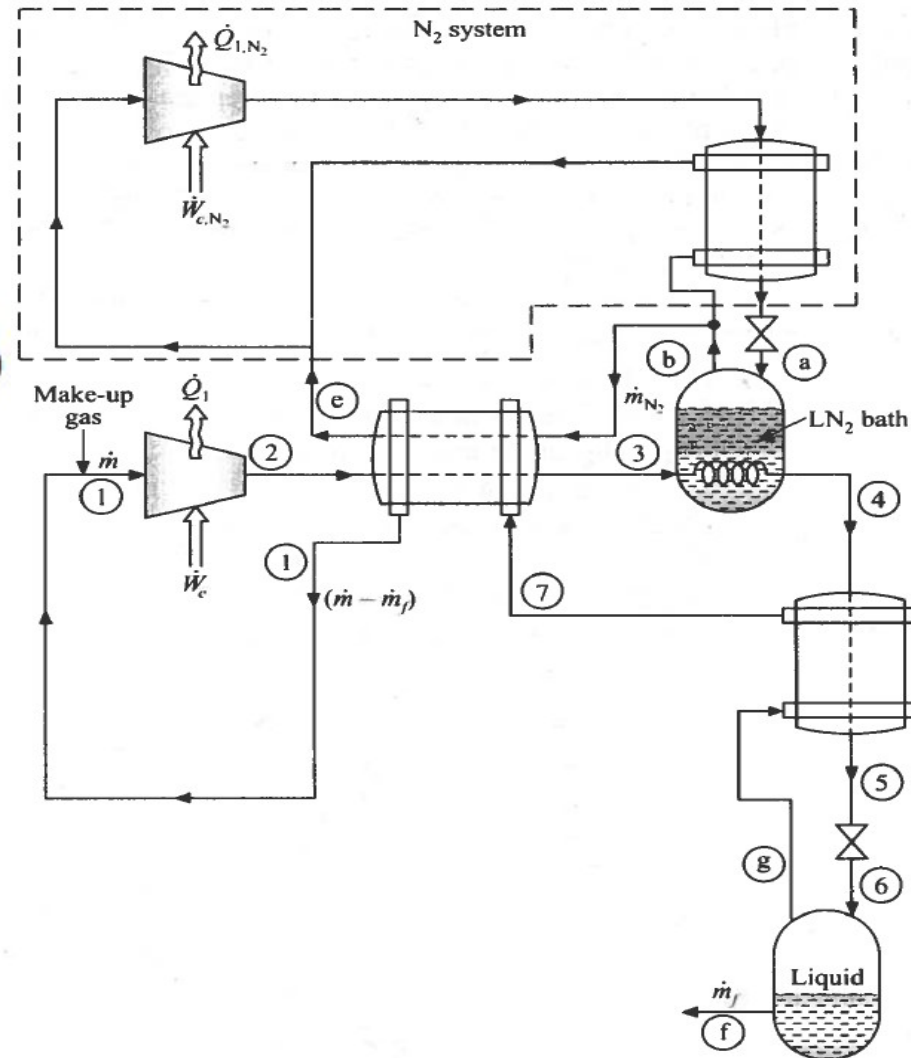
# Esercizio 3: Linde-Hampson pre-raffreddato per idrogeno

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

```

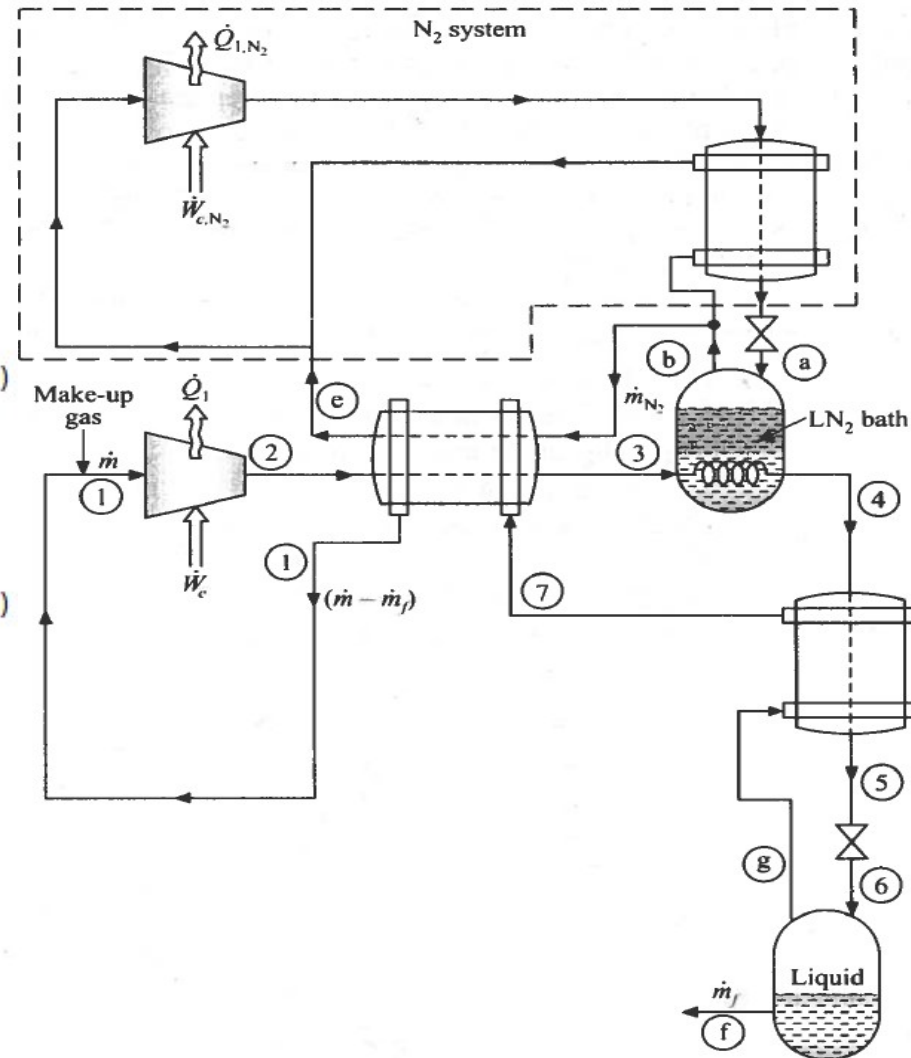


# Esercizio 3: Linde-Hampson pre-raffreddato per idrogeno

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')
    
```





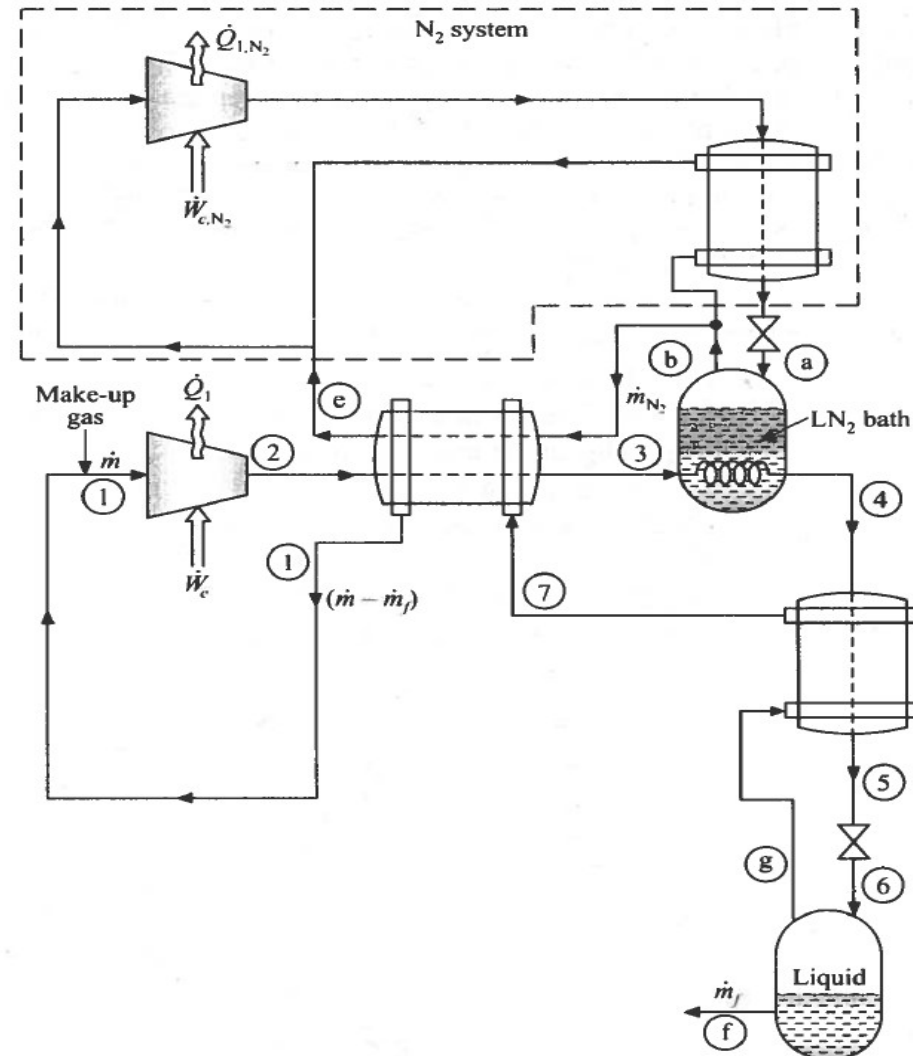
# Esercizio 3: Linde-Hampson pre-raffreddato per idrogeno

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  $w_{l\_N2} = w_l$ 
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  $FOM = w_i / w_{l\_H2}$ 

```

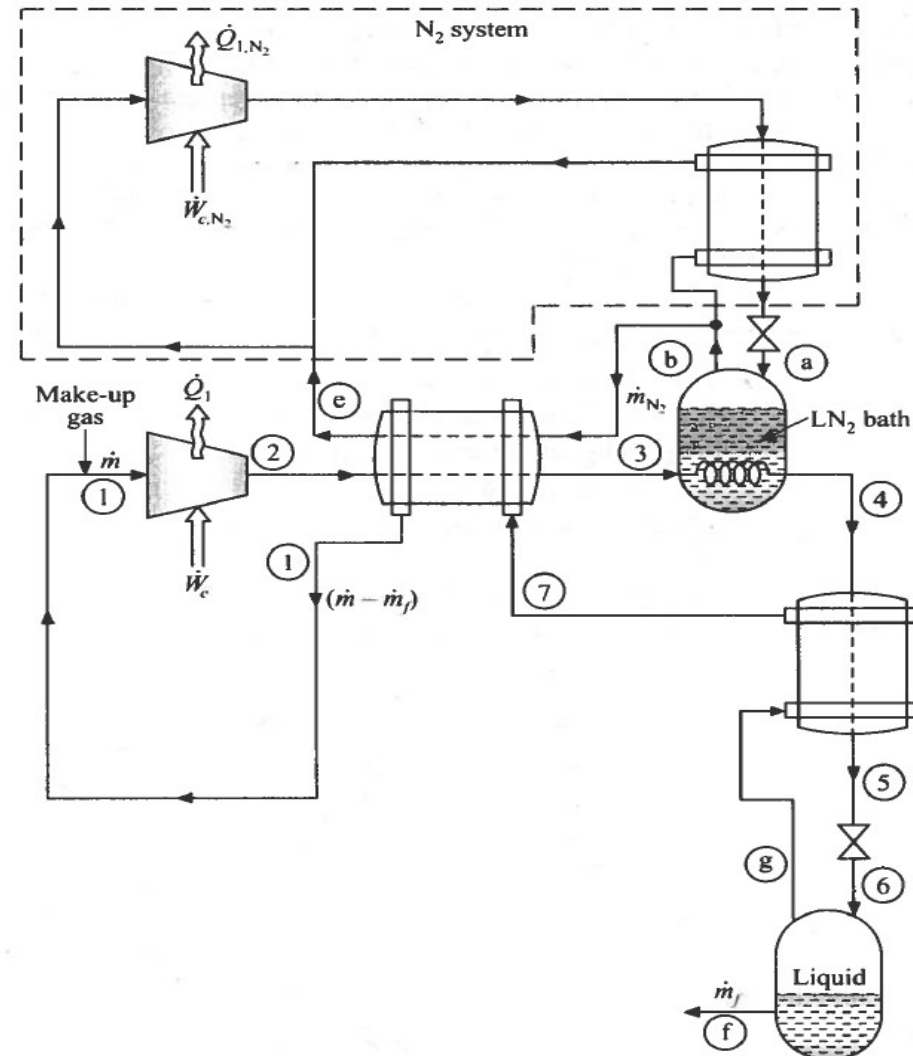


# Esercizio 3: Linde-Hampson pre-raffreddato per idrogeno

Presento i risultati:

```

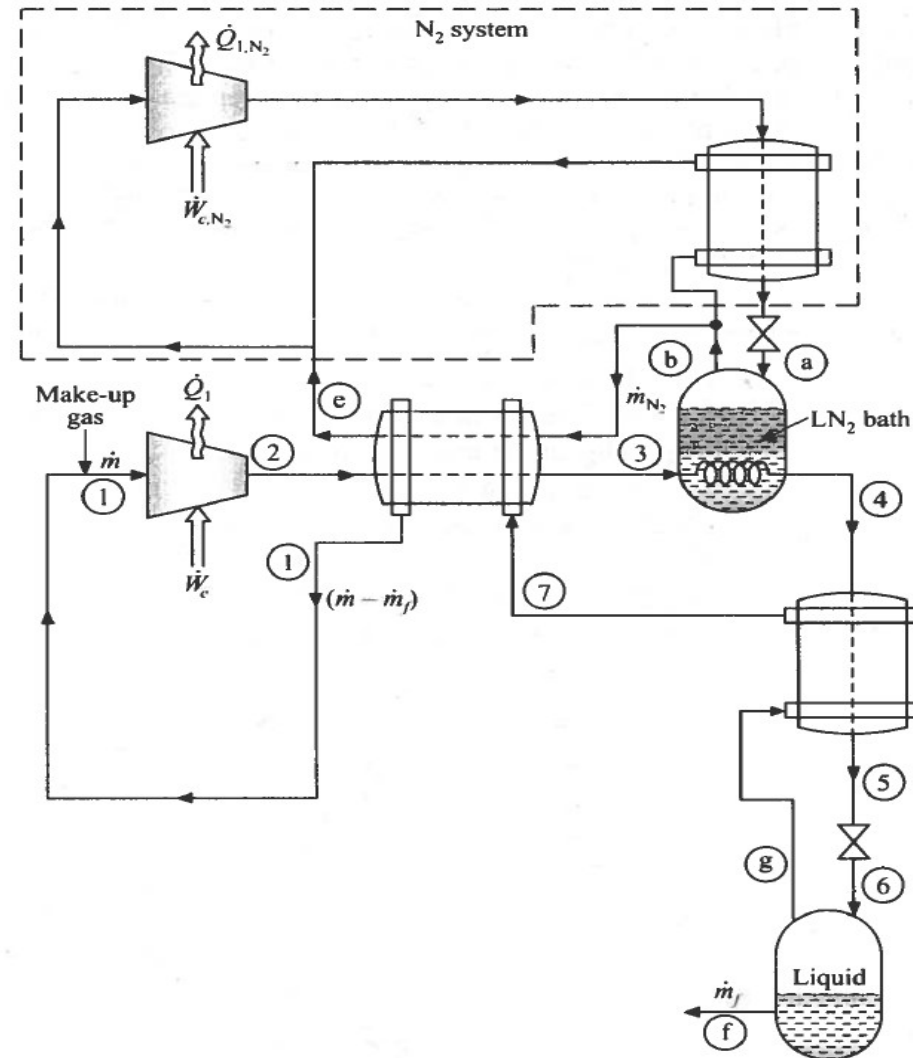
68 #Risultati
69 print('')
70 print('Risultati esercizio 3')
71 print('')
72 print(f'FOM= {("%.3f" % FOM)} ')
73 print('')
74 print(f'y= {("%.3f" % y)} ')
75 print('')
76 print(f'z= {("%.3f" % z)} ')
77 print('')
78 print(f'wL_H2= {("%.3f" % (wL_H2/1000))} [J/g]
    
```



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

Presento i risultati:

Risultati Esercizio 1
Pressione $p_2 = 200$
FOM = 0.103
$y = 0.063$
$w_l = 7473.227$ [J/g]
-----
Risultati esercizio 3
FOM= 0.085
$y = 0.087$
$z = 1.013$
$w_{l\_H2} = 142469.045$ [J/g]



# Grazie per l'attenzione!

