

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Relazione per la prova finale

***Liquefazione dell'idrogeno e sue
applicazioni in campo aerospaziale***

Tutor universitario: Prof. Azzolin Marco

Padova, 08/03/2024

Laureando: *Zampieri Mattia*

1) LIQUEFAZIONE DELL'IDROGENO



Figura 1.1: Impianto di raffreddamento per idrogeno tipo Linde-Hampson pre-raffreddato, Leuna (Germania) [1]

2) IDROGENO LIQUIDO NEL SETTORE AEROSPAZIALE

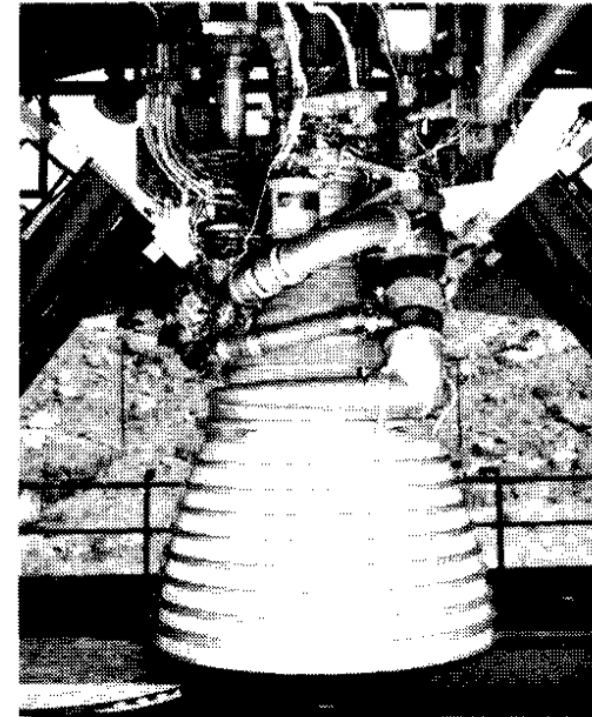


Figura 1.2: motore J-2 del SATURN V [2]

1. PERCHE' IDROGENO ?

- ❑ IDROGENO ABBONDANTEMENTE PRESENTE IN NATURA
- ❑ COMBUSTIONE (CON OSSIGENO) → VAPORE ACQUEO → COMBUSTIBILE SOSTENIBILE

2. PERCHE' IN FORMA LIQUIDA ?

- ❑ GH_2 → BASSA DENSITA' RISPETTO A LH_2
 - VOLUME SPECIFICO COSTANTE → AUMENTARE PRESSIONE → PROBLEMI STOCCAGGIO
- ❑ LH_2 → FACILITA' D'USO

3. COME OTTENERE LH_2 ?

- ❑ CICLO INVERSO LINDE-HAMPSON (E VARIANTI)
- ❑ CICLO INVERSO CLAUDE

LH_2 → TEMPERATURE CRIOGENICHE → ISOLAMENTO TERMICO

❖ PARETE ISOLANTE:

- MATERIALI CON BASSA CONDUCIBILITA' TERMICA
- MLI

❖ SUPERFICIE DI SCAMBIO TERMICO → DIMINUIRE L'AREA DI SCAMBIO TERMICO

- SERBATOIO SFERICO

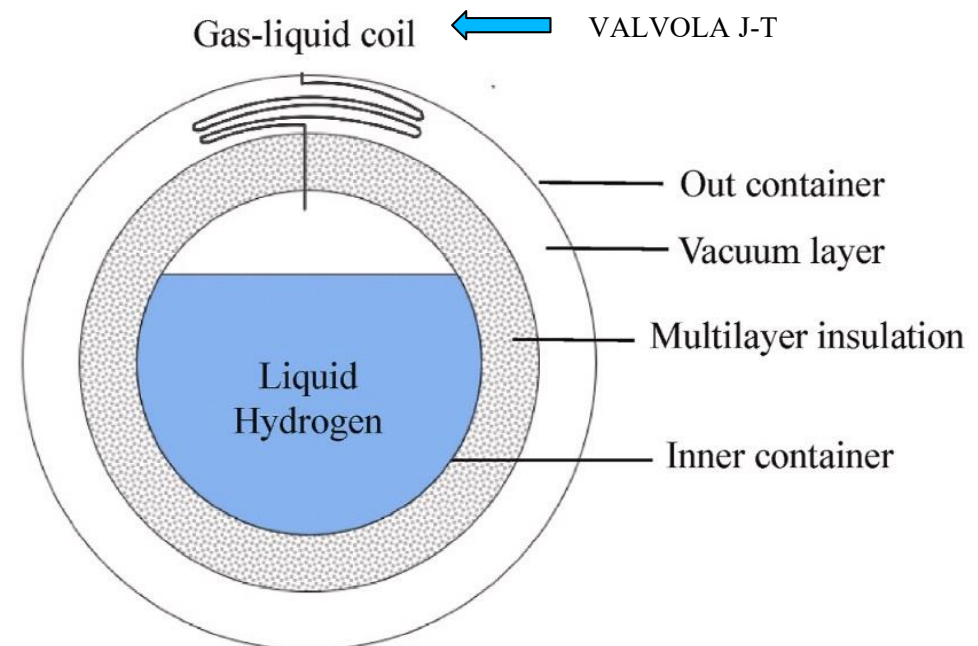


Figura 2.1: schematizzazione serbatoio sferico isolato termicamente [3]

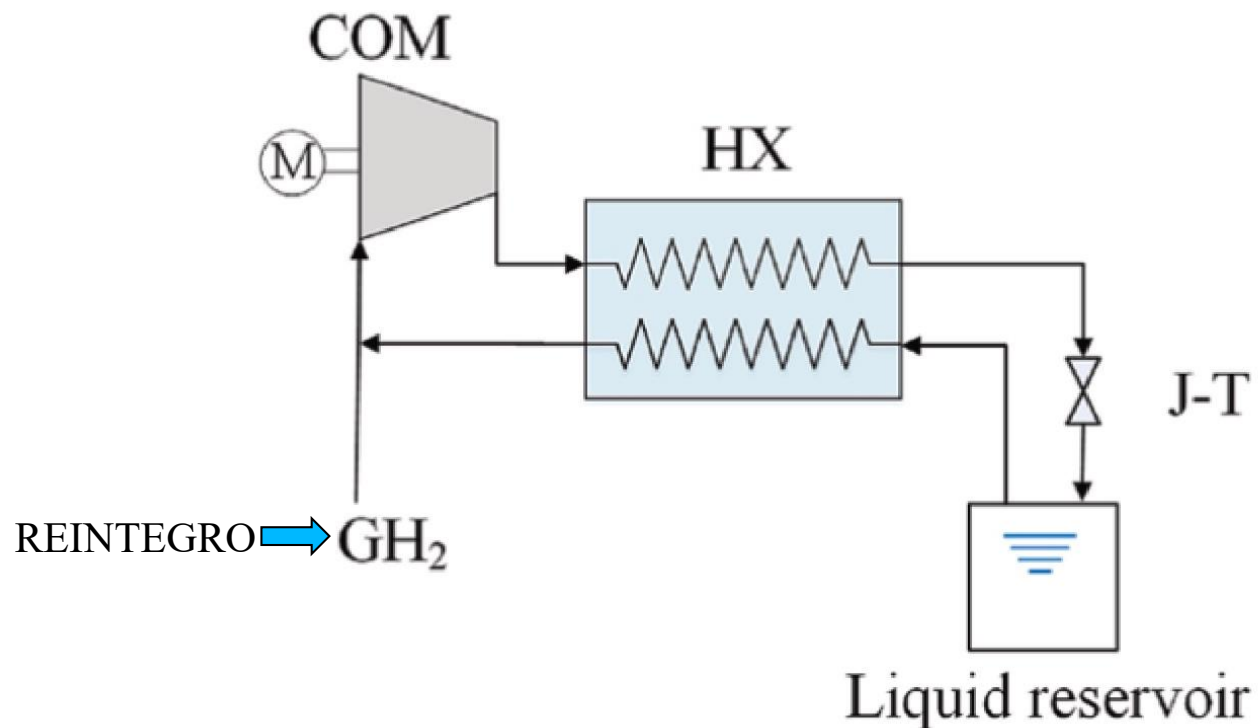


Figura 3.1: schema d'impianto ciclo Linde-Hampson [3]

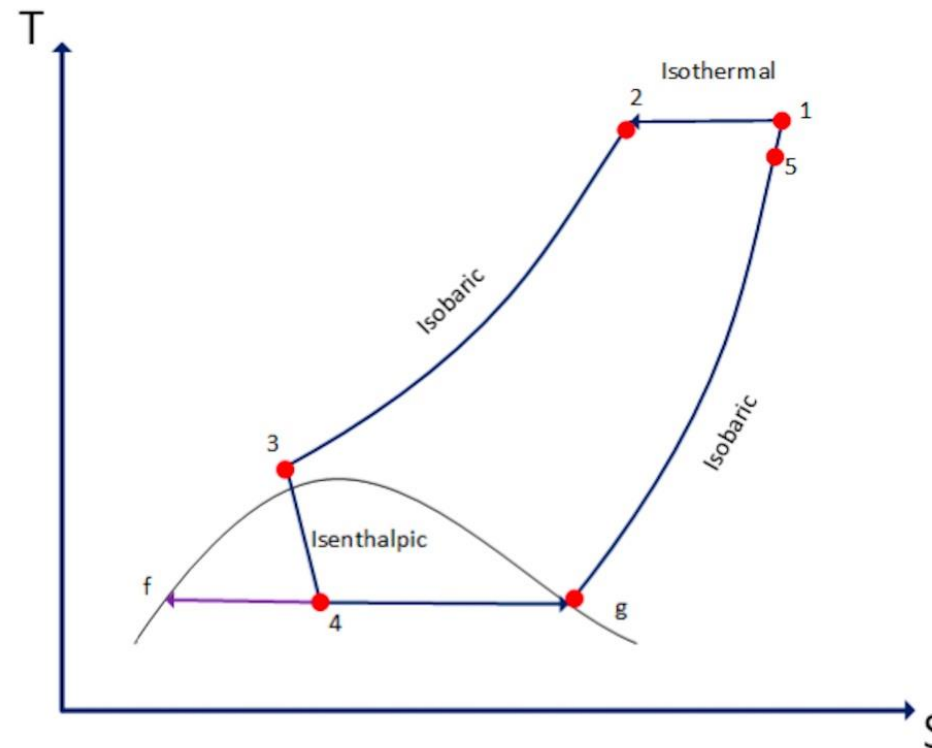


Figura 3.2: grafico ciclo L-H su diagramma T-s [4]

- **1-2 ISOTERMA** → SERIE DI COMPRESSORI INTERPOSTI DA INTER-COOLER → 'DENTE DI SEGA'
- **2-3 ISOBARA** → SERIE DI SCAMBIATORI DI CALORE
- **3-4 ISOENTALPICA** → VALVOLA DI JOULE-THOMSON

- **4-G SEPARAZIONE** → SEPARAZIONE LIQUIDO SATURO DA VAPORE SATURO (GRAVITA') → ISOBARA
 ❖ PRELIEVO PORTATA DI LIQUIDO SATURO \dot{m}_f
- **G-5 ISOBARA** → SERIE DI SCAMBIATORI (GLI STESSI DI TRASFORMAZIONE 2-3)
- **5-1 MISCELAZIONE (ISOBARA)** → REINTEGRO PORTATA \dot{m}_f

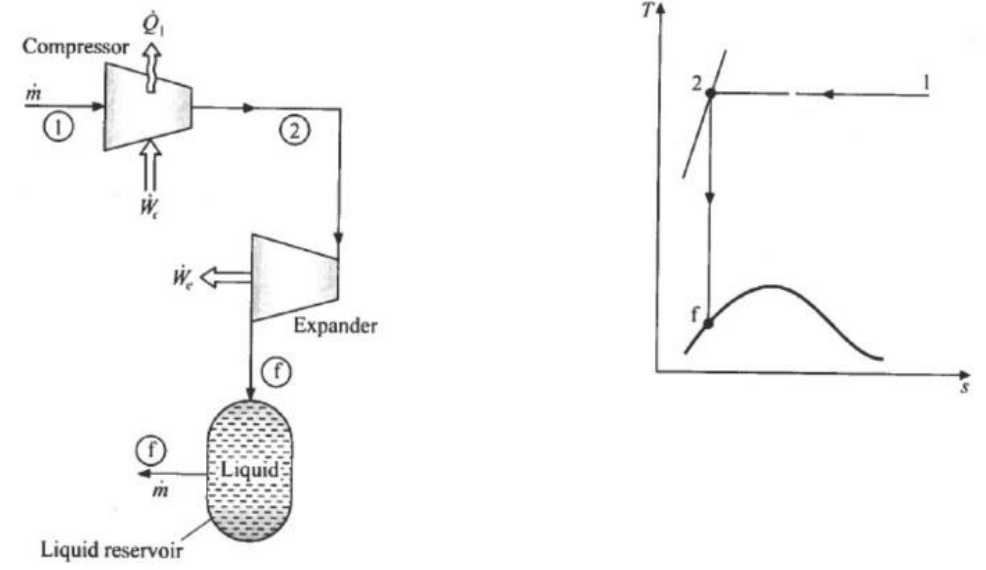
PARAMETRI DI EFFICIENZA

- ❖ LIQUID YIELD → $y = \dot{m}_f / \dot{m}_v$ \dot{m}_f = massa liquido saturo
 \dot{m}_v = massa vapore saturo
- ❖ FOM (figure of merit) → $FOM = |w_i| / |w|$
 - w = potenza per unità di portata di liquido saturo (ciclo reale)
 - w_i = potenza per unità di portata sistema ideale (figura 3.3)

Applicando il bilancio energetico e quello entropico tra punto 1 e f :

$$\begin{cases} q = \dot{m} (h_f - h_1) + P \\ q = \dot{m} T_1 (s_2 - s_1) = \dot{m} T_1 (s_f - s_1) \end{cases} \quad \rightarrow \quad -w_i = P / \dot{m} = T_1 (s_f - s_1) - (h_f - h_1)$$

Sistema ideale di liquefazione



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

Figura 3.3: sistema ideale di liquefazione (schema e grafico) [1]

1. CICLO L-H PRE-RAFFREDDATO

LH_2 → TEMPERATURE CRIOGENICHE → CICLO AUSILIARIO → PRE-RAFFREDDARE IDROGENO

↓
CICLO LINDE
CON N_2

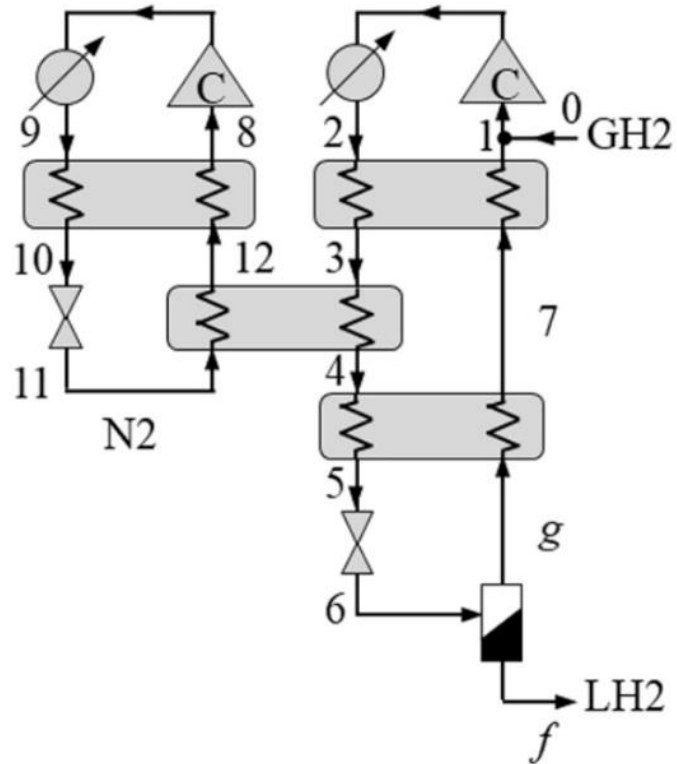


Figura 5.1: schema d'impianto ciclo L-H pre-raffreddato ad azoto (N_2) [6]

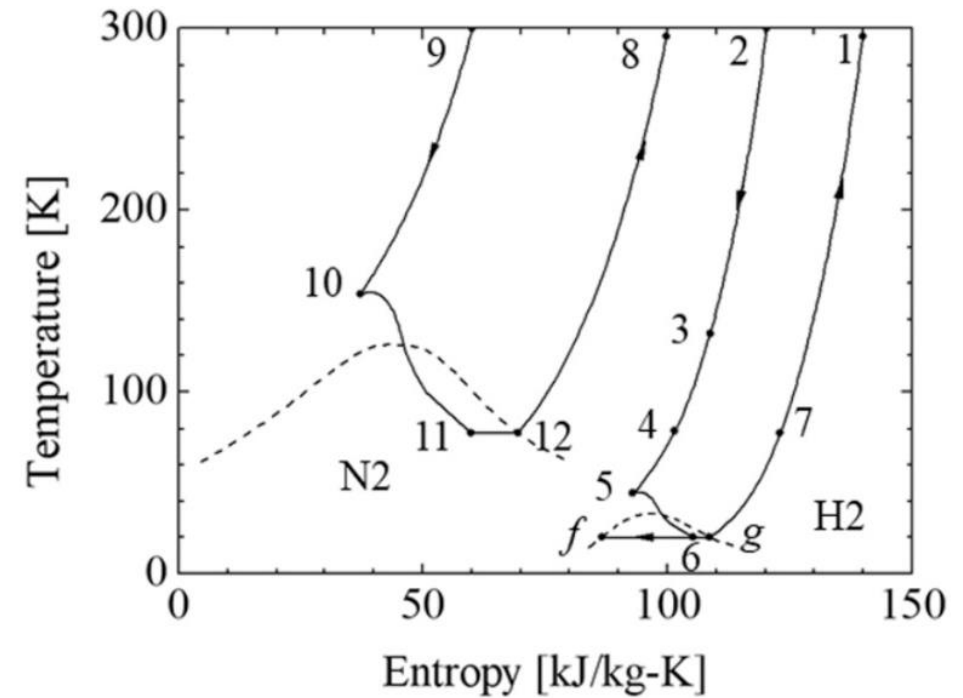


Figura 5.2: ciclo L-H pre-raffreddato rappresentato sul diagramma T-s [6]

IPOTESI



- PORTATA IDROGENO DEL CICLO $\Rightarrow \dot{m} = 1 \frac{Kg}{s}$
- TEMPERATURA INIZIO CICLO 1° ITERAZIONE $\Rightarrow T_{iniziale} = 300 \text{ K}$
- PORTATA DI VAPORE SATURO $\Rightarrow \dot{m}_v = 0.80 \frac{kg}{s}$ \Rightarrow COSTANTE PER OGNI ITERAZIONE
- EFFICIENZA SCAMBIATORI $\Rightarrow \epsilon = 0.65-0.75$
- EFFICIENZA SCAMB. AZOTO $\Rightarrow \epsilon = 0.78 \Rightarrow NTU = -\ln(1 - \epsilon) = 1.55$

SCRIPT MATLAB



1. CALCOLO POTENZA FASE DI COMPRESSIONE + CALCOLO CALORE CEDUTO IN INTERCOOLER

**2. 7 SCAMBIATORI
1 VASCA DI AZOTO**



- REFPROP \Rightarrow CONTROLLO $X_v > \frac{\dot{m}_v}{\dot{m}}$
- REFPROP $\Rightarrow T_{vapore saturo} = 20.324 \text{ K}$
1 atm

3. MISCELAZIONE $\Rightarrow T = \frac{\dot{m}_f T_{amb} + \dot{m}_v T_v}{\dot{m}} \Rightarrow T \text{ INIZIO CICLO ITERAZIONE SUCCESSIVA}$

IPOTESI



- PORTATA IDROGENO DEL CICLO $\Rightarrow \dot{m} = 1 \frac{Kg}{s}$
- TEMPERATURA INIZIO CICLO 1° ITERAZIONE $\Rightarrow T_{iniziale} = 300 K$
- TITOLO DI VAPORE $\Rightarrow X_V = 0.80$
- EFFICIENZA SCAMBIATORI $\Rightarrow \epsilon = 0.65-0.75$
- EFFICIENZA SCAMB. AZOTO $\Rightarrow \epsilon = 0.78 \Rightarrow NTU = -\ln(1 - \epsilon) = 1.55$

SCRIPT MATLAB



METODO ITERATIVO \Rightarrow CICLO WHILE
PUNTO FISSO

1. CALCOLO POTENZA FASE DI COMPRESSIONE + CALCOLO CALORE CEDUTO IN INTERCOOLER

**2. 7 SCAMBIATORI
1 VASCA DI AZOTO**



- 7 EQUAZIONI BILANCIO ENERGETICO
- 7 EQ. EFFICIENZA SCAMBIATORI INTERMEDI
- 1 EQ. SCAMBIATORE AZOTO (CAMB. DI FASE)



TEMPERATURE
INTERMEDIE

3. JOULE-THOMSON



TEMPERATURA ENTRATA VALVOLA $T_{valvola}$



Funzione matlab
refprom



entalpia

4. TITOLO DI VAPORE



Funzione matlab
refprom



X_V ITERAZIONE SUCCESSIVA

5. MISCELAZIONE



$$T = \frac{\dot{m}_f T_{amb} + \dot{m}_v T_V}{\dot{m}}$$



T INIZIO CICLO ITERAZIONE SUCCESSIVA

COMPRESSIONE CON
RAFFREDDAMENTI
INTERMEDI

IPOTESI DI GAS
IDEALE VALIDA

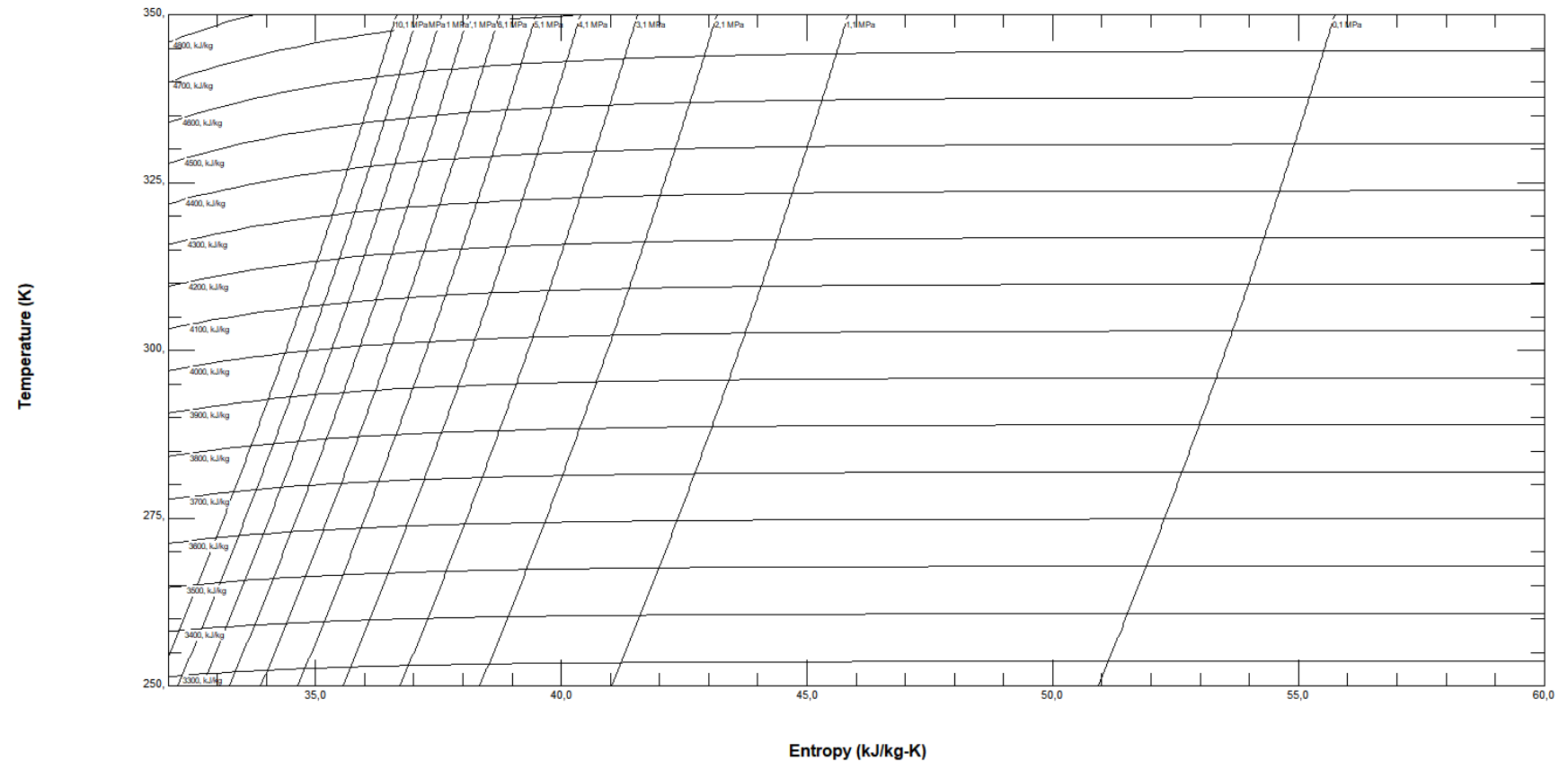
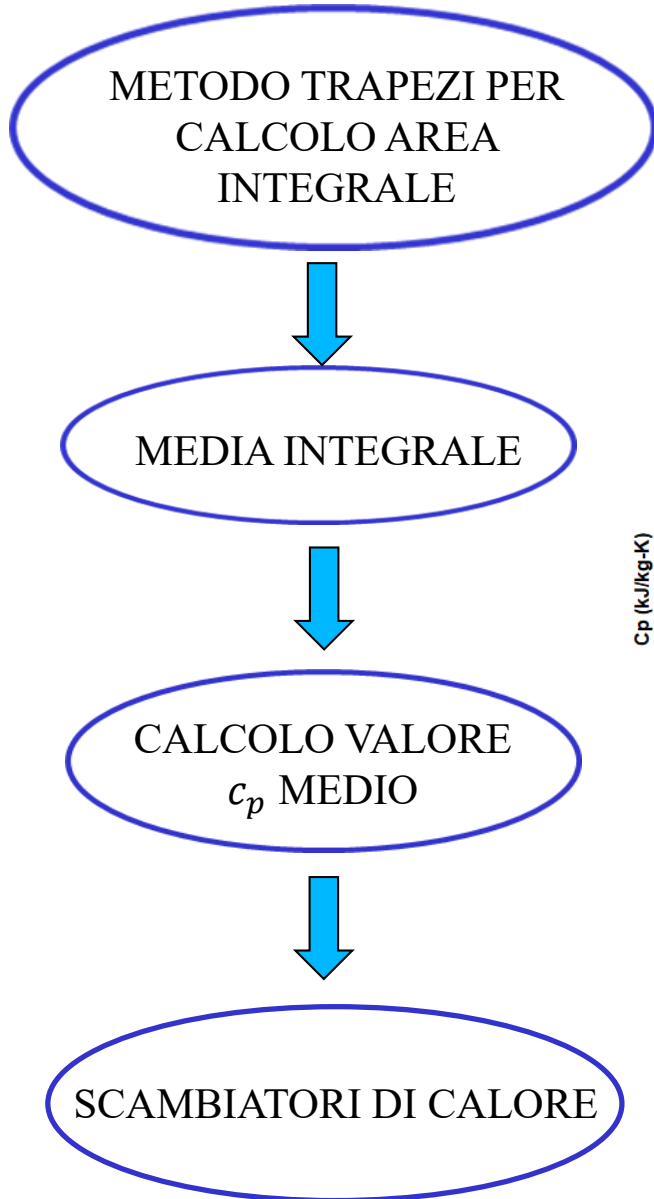


Figura 4.1: diagramma entropico T-s ($p = 0.1-10$ MPa; $T = 250-350$ K) [5]



- c_p GAS IDEALE= $14.406 \frac{kJ}{kg K}$
- c_p GAS A 0.1 MPa= $12.260 \frac{kJ}{kg K}$
- c_p GAS A 10 MPa= $14.146 \frac{kJ}{kg K}$

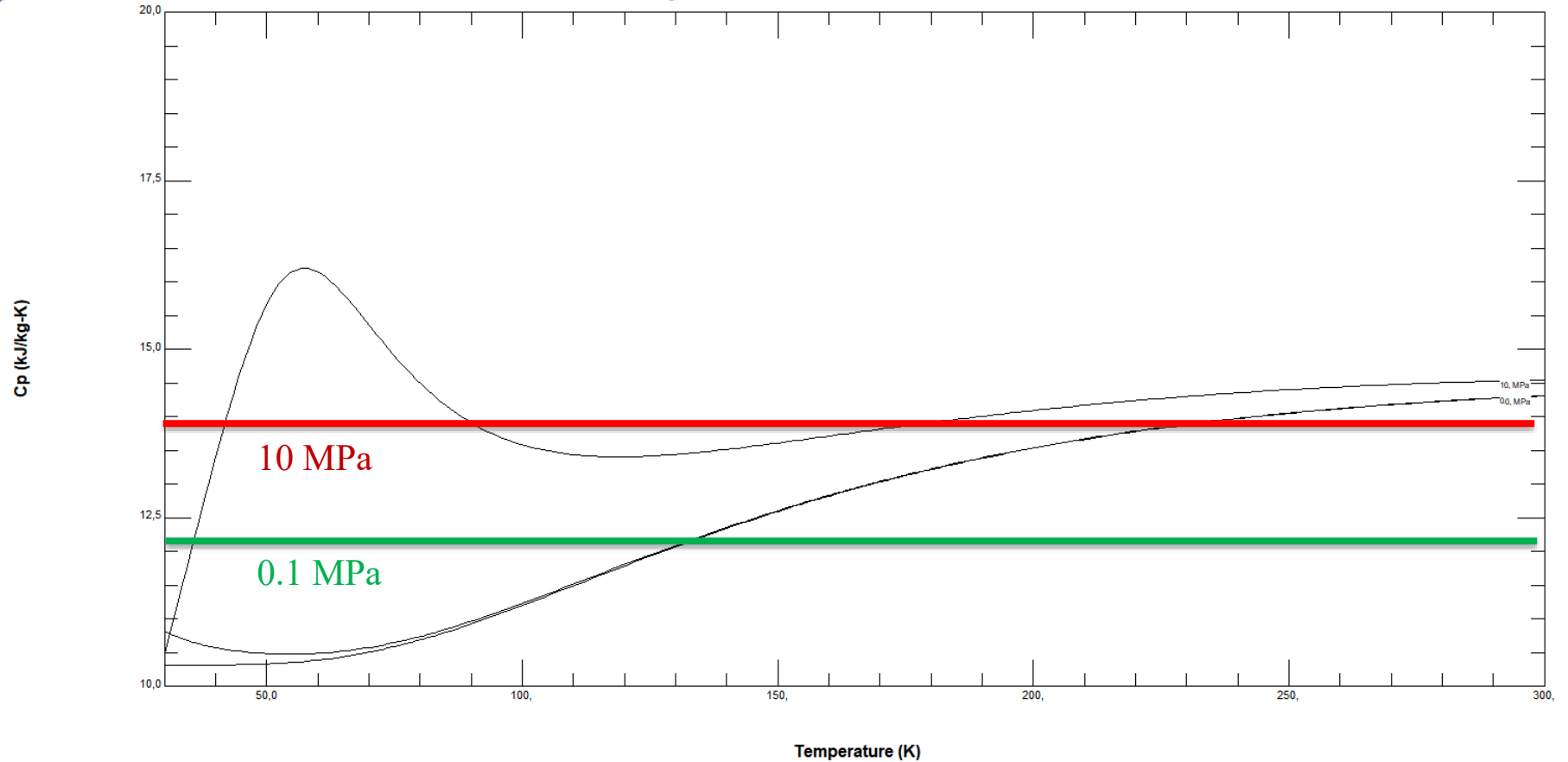


Figura 4.2: diagramma c_p -T ($c_p = 10-20 \frac{kJ}{kg K}$; T= 30-300 K) [5]

VALVOLA DI J-T

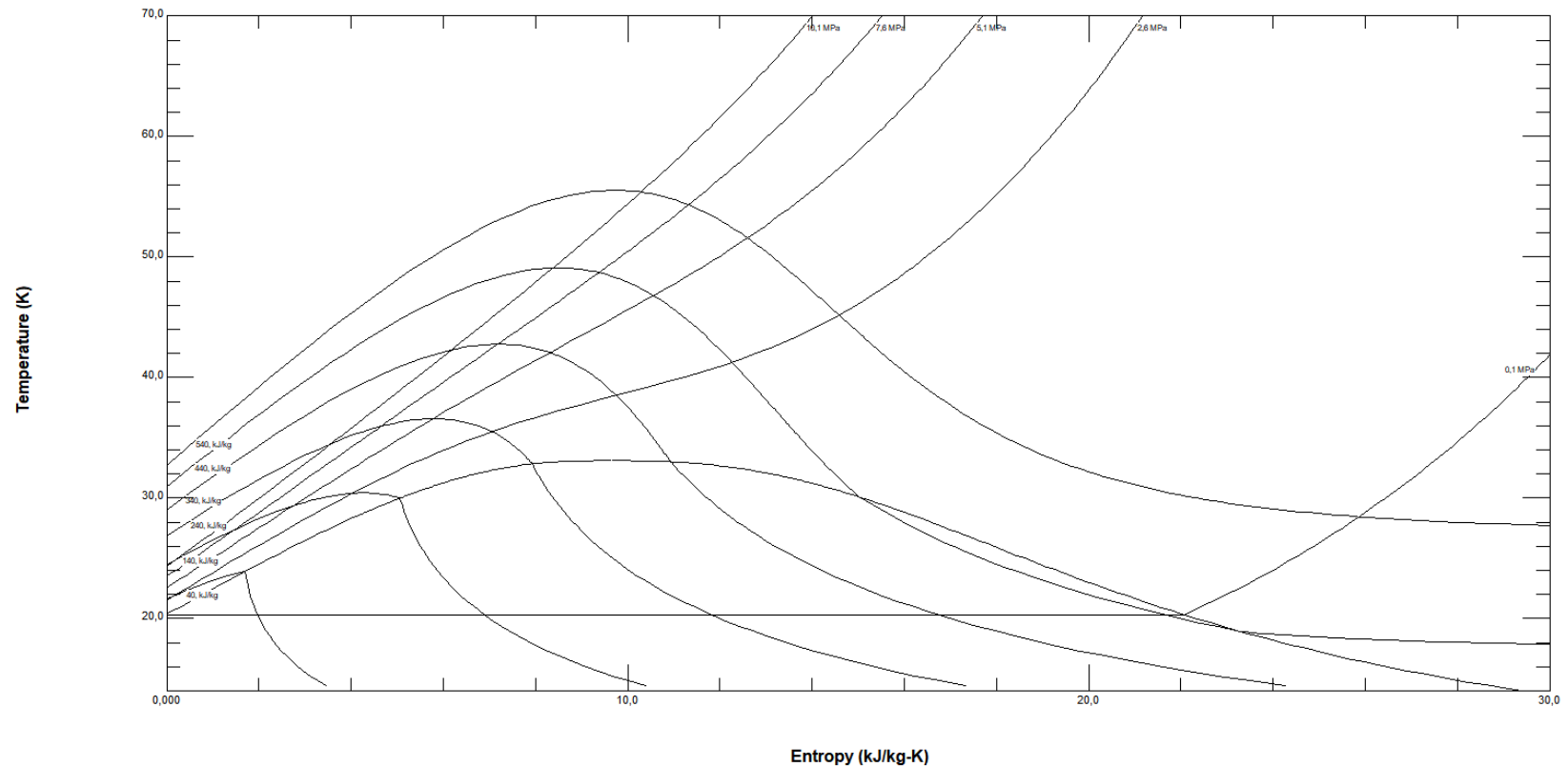
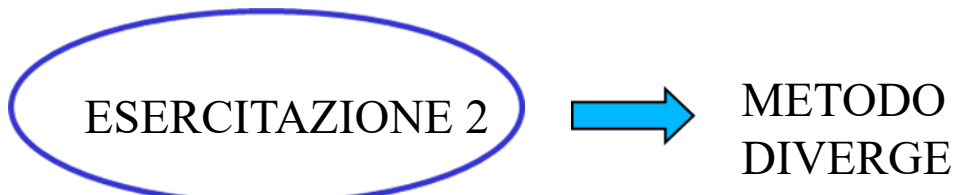
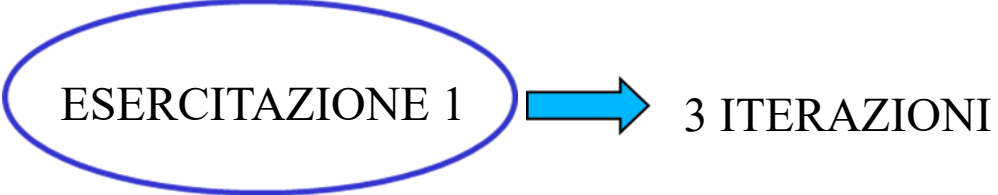


Figura 4.3: diagramma entropico T-s ($p= 0.1-10$ MPa; $T= 14-70$ K) [5]

SCRIPT MATLAB :

- $h_0 = h_{VS}$; $p = 10$ MPa $\longrightarrow T_0 = 49.63$ K
- SE ULTIMA ITERAZIONE $\longrightarrow T_{valvola} > T_0 \longrightarrow$ FUORI DALLA CURVA DI ANDREWS
- DIFFICOLTA' PROGETTO: area scambiatore ad azoto $\longrightarrow K = \frac{1}{\frac{1}{200} + \frac{1}{1000}}$ $[\frac{W}{K m^2}] \longrightarrow A = \frac{K A}{K} = 128.42 m^2$



□ ULTIMA ITERAZIONE:

- $FOM_{\%} = 8.27 \%$
- $COP = 1.046$

- $P_{compressori} = -2.435e+07 \text{ W}$
- $T_{iniziale} = 339.948 \text{ K}$
- $T_{valvola} = 45.475 \text{ K}$

scarti X_v :		T in entrata valvola:
0.0590	↓ AUMENTO SCARTO	45.4748
0.1287		41.4359
0.3081		<u>50.7287</u>

temperatura iniziale del ciclo in K:

339.9398
340.8549
338.2753

ALTERNATIVA

1. T INIZIALE DEL CICLO FISSATA → OPPORTUNA PROGETTAZIONE FASE DI COMPRESSIONE
2. X_v iterato

2. CICLO L-H A DUE PRESSIONI

SUDDIVIDERE LA TRASFORMAZIONE
ISOENTALPICA



2 VALVOLE J-T



PASSAGGIO PER UNA
PRESSIONE
INTERMEDIA

VANTAGGI



AUMENTO DEL
LIQUID YIELD

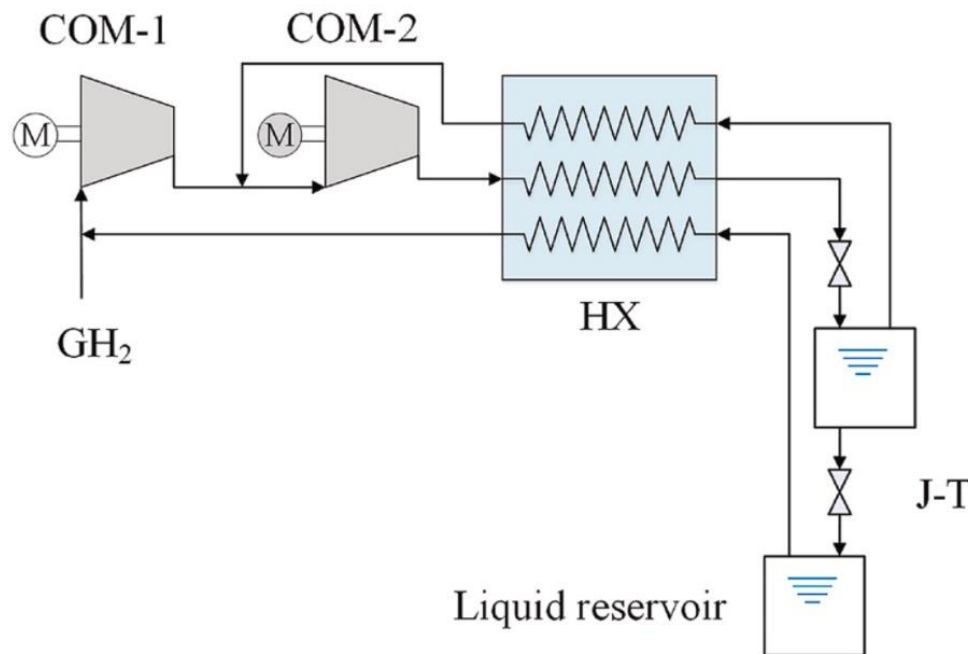


Figura 5.3: schema d'impianto ciclo L-H a doppia pressione [3]

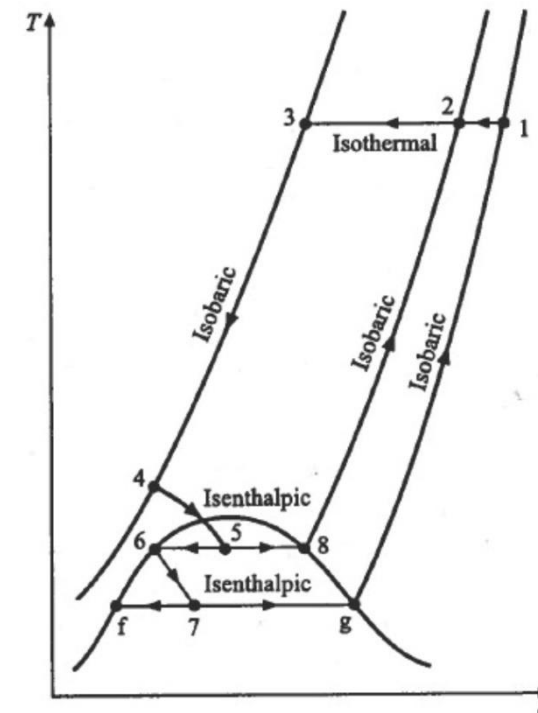


Figura 5.4: ciclo L-H a doppia pressione rappresentato nel diagramma di stato T-s [1]

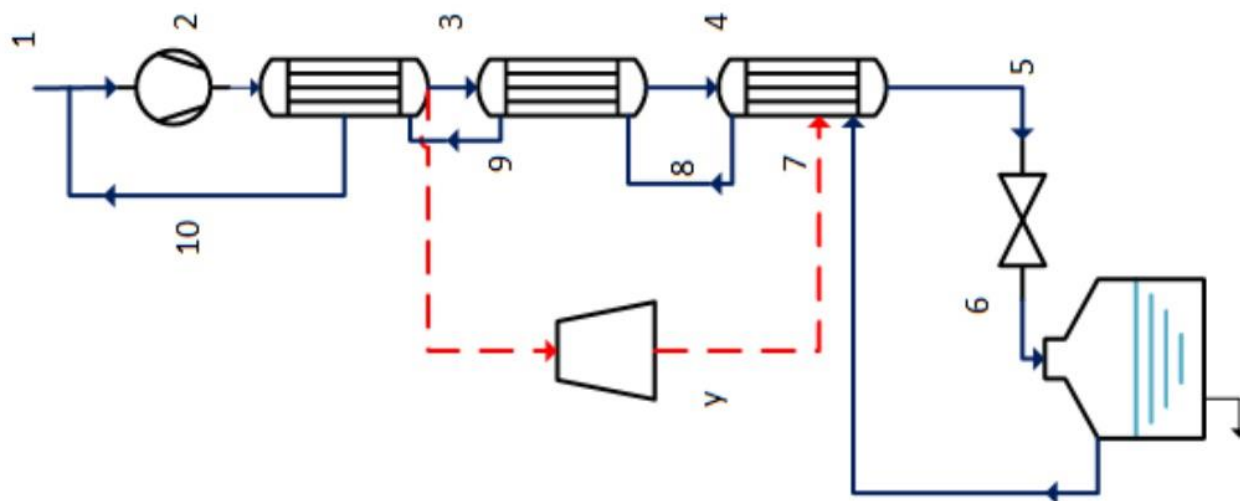


Figura 6.1: schema d'impianto ciclo Claude [4]

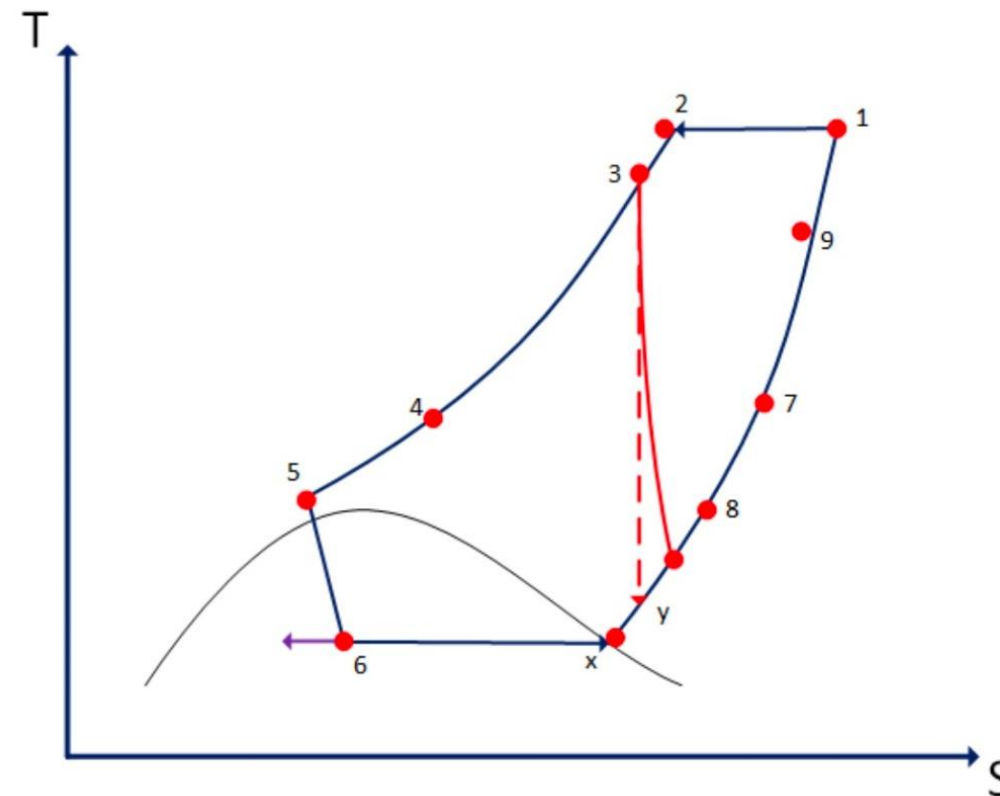


Figura 6.2: ciclo Claude rappresentato nel diagramma di stato T-s [4]

ESPANSIONE
ISOENTROPICA



VANTAGGI



MAGGIOR SALTO DI T RISPETTO A SCAMBIATORI



POTENZA
EROGATA



AUMENTO
FOM

□ APPLICAZIONI AERONAUTICHE :

- CELLE A COMBUSTIBILE AD IDROGENO → ALIMENTAZIONE DISPOSITIVI ELETTRONICI DELL'AEROMOBILE
- CARBURANTE PER AEROMOBILI IPERSONICI (MACH > 5) → SCRAM-JET

□ APPLICAZIONI SPAZIALI : MISCELA LO_2/LH_2

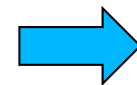
- PROPULSIONE STADI LANCIATORE →
 - MOTORE J-2 DEL SATURN V (NASA)
 - MOTORE 'VINCI' DELL'ARIANE 5 (ESA)

PROBLEMI

COMBUSTIONE
 H_2/AIR

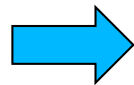


OSSIDI DI AZOTO



IMPATTO AMBIENTALE

LH_2 A TEMPERATURE CRIOGENICHE

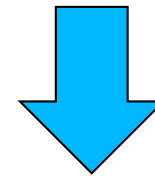


COMPLESSITA' SISTEMA DI STOCCAGGIO



Figura 7.1: distributore di GH_2 a Mestre (VE) [7]

ALTERNATIVE



IDROGENO IN FORMA
GASSOSA

- [1] Impianti criogenici; Prof. Rodolfo Taccani, Ing. Pivetta Davide; AA 2019-20;
https://moodle2.units.it/pluginfile.php/386200/mod_resource/content/1/Presentazione%20impianti%20criogenici.pdf
- [2] Flight Data Analysis of HyShot 2; 13th AIAA/CIRA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference; Neal E. Hass , Michael K. Smart; NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia; Allan Paull, University of Queensland, Brisbane, Australia;
<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20050215040/downloads/20050215040.pdf>
- [3] Hydrogen liquefaction and storage: Recent progress and perspectives; Renewable and Sustainable Energy Reviews 176 (2023) 113204;
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113204>
- [4] State of the art in hydrogen liquefaction Amir Abdi1, Justin Chiu and Viktoria Martin;
<http://proceedings.ises.org/paper/swc2019/swc2019-0128-Abdi.pdf>
- [5] <https://www.nist.gov/srd/refprop>
- [6] Cascade JT systems with single-component refrigerants for hydrogen liquefaction; Ho-Myung Chang , Min Gyun Park; Cryogenics 121(2022) 103410; <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011227521001685?via%3Dihub>
- [7] https://www.ansa.it/veneto/notizie/2022/06/10/eni-a-venezia-primo-distributore-a-idrogeno-per-mobilita_2665f278-81f1-4527-8be5-d99dc8938d44.html