

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

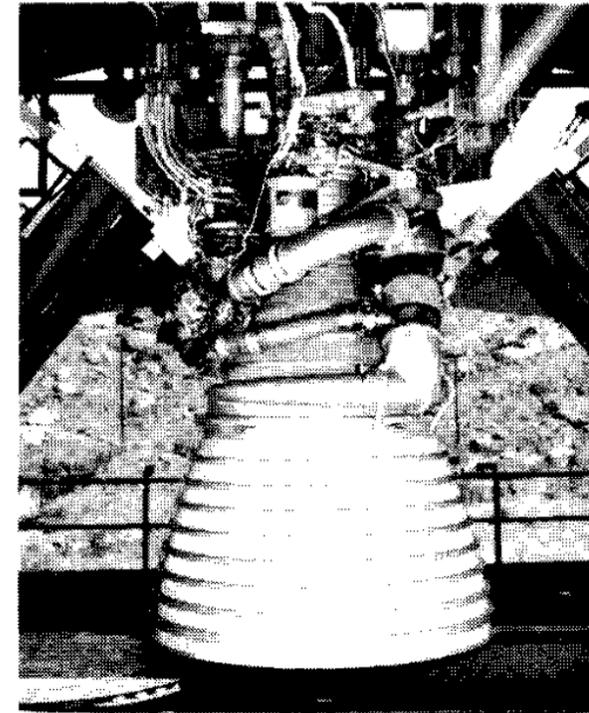


Figura 1.2: motore J-2 del SATURN V [2]

## 1. PERCHE' IDROGENO ?

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

## 2. PERCHE' IN FORMA LIQUIDA ?

- ❑  $\text{GH}_2$  → BASSA DENSITA' RISPETTO A  $\text{LH}_2$ 
  - VOLUME SPECIFICO COSTANTE → AUMENTARE PRESSIONE → PROBLEMI STOCCAGGIO
- ❑  $\text{LH}_2$  → FACILITA' D'USO

## 3. COME OTTENERE $\text{LH}_2$ ?

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

$LH_2$  → TEMPERATURE CRIOGENICHE → ISOLAMENTO TERMICO

## ❖ PARETE ISOLANTE:

- MATERIALI CON BASSA CONDUCEBILITA' TERMICA
- MLI

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

- SERBATOIO SFERICO

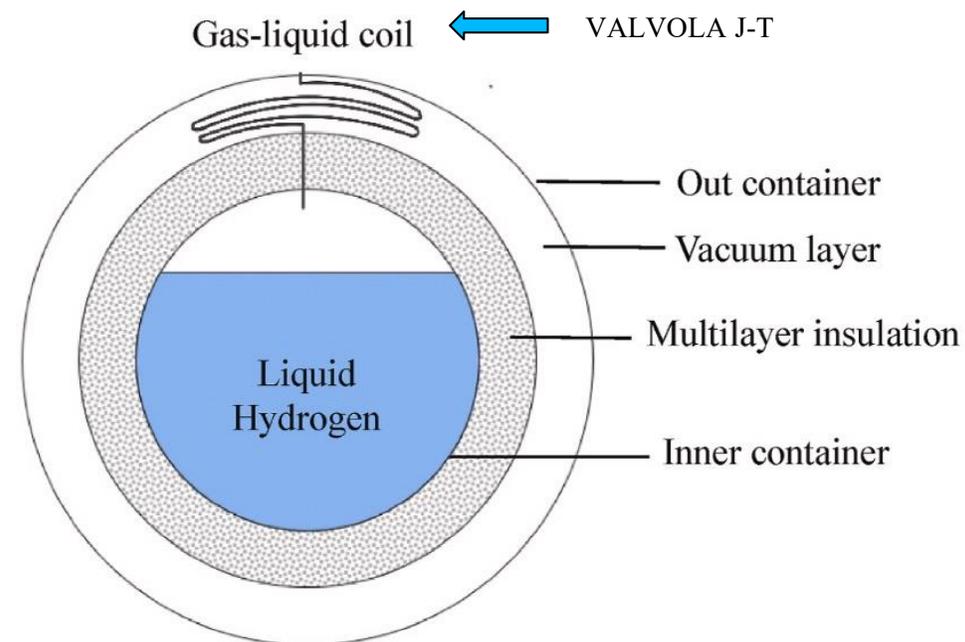


Figura 2.1: schematizzazione serbatoio sferico isolato termicamente [3]

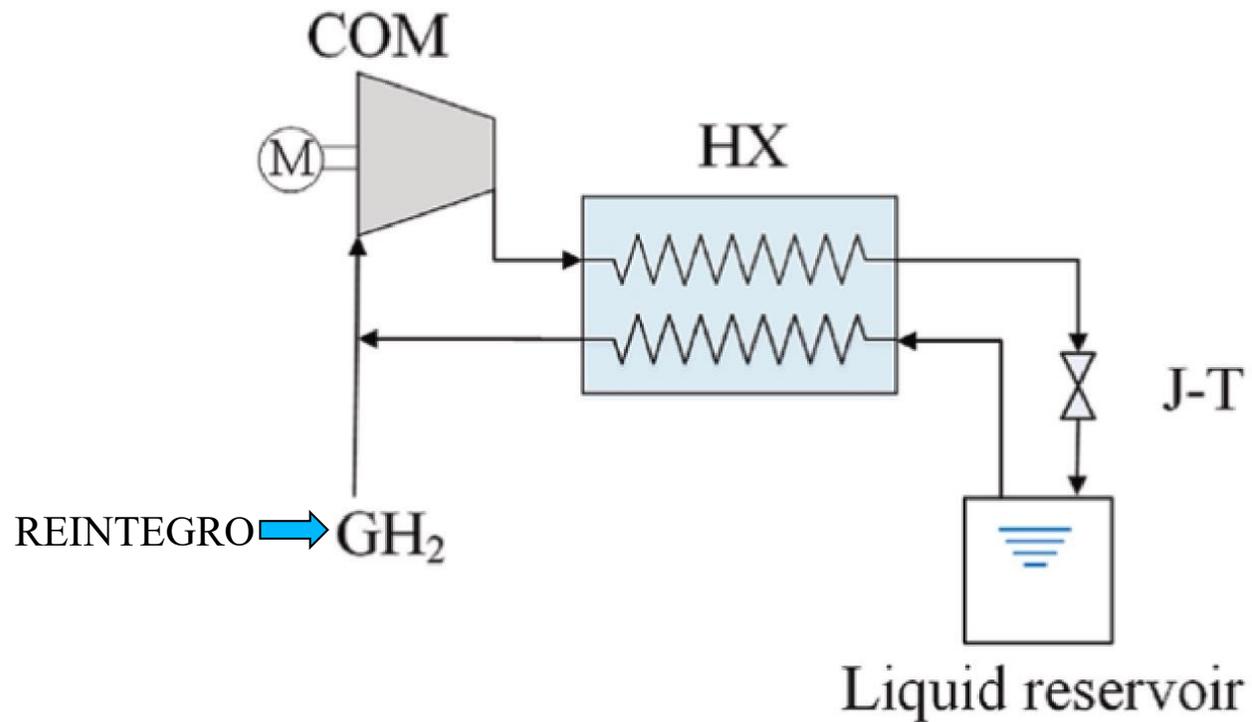


Figura 3.1: schema d'impianto ciclo Linde-Hampson [3]

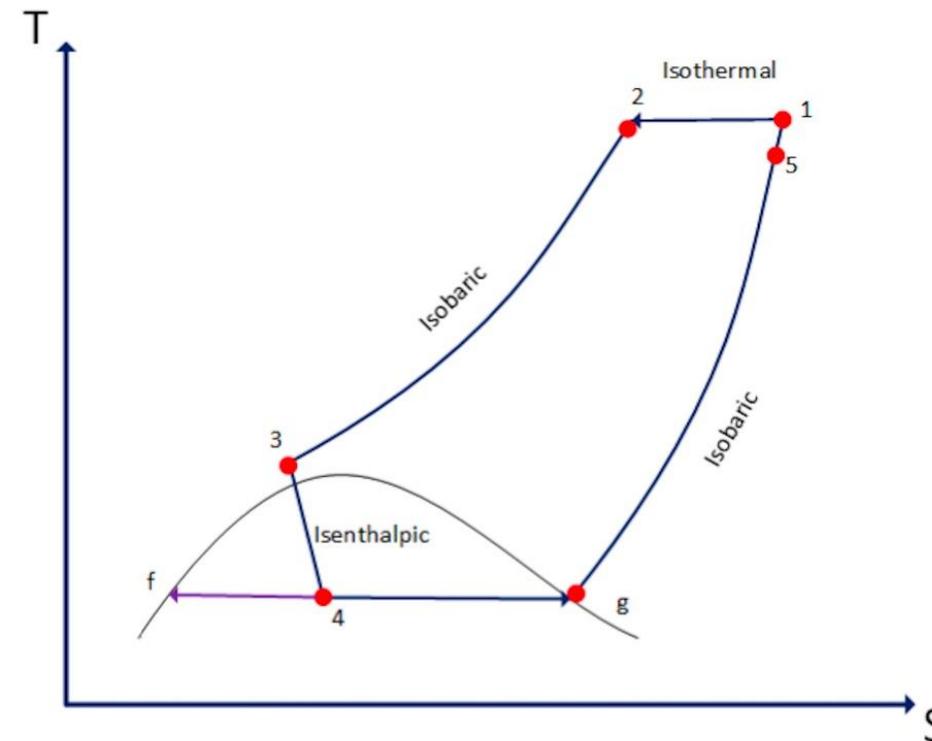


Figura 3.2: grafico ciclo L-H su diagramma T-s [4]

- **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  $\dot{m}_f$

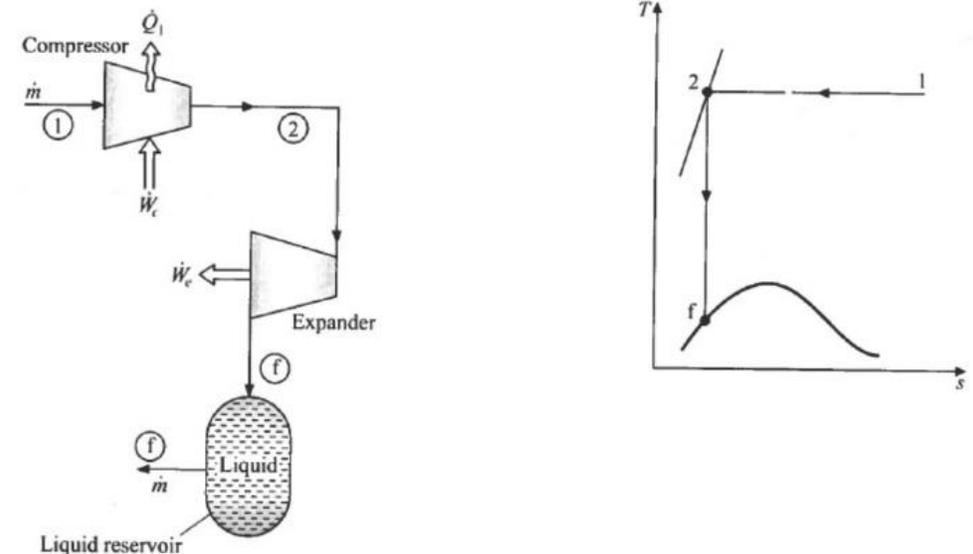
## PARAMETRI DI EFFICIENZA

- ❖ **LIQUID YIELD** →  $y = m_f / m_v$      $m_f$  = massa liquido saturo  
 $m_v$  = 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  $N_2$

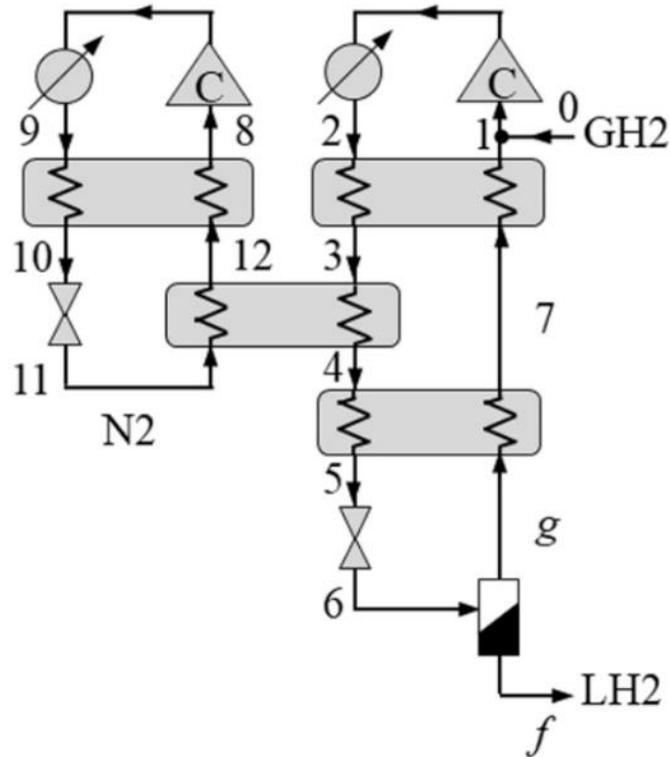


Figura 5.1: schema d'impianto ciclo L-H pre-raffreddato ad azoto ( $N_2$ ) [6]

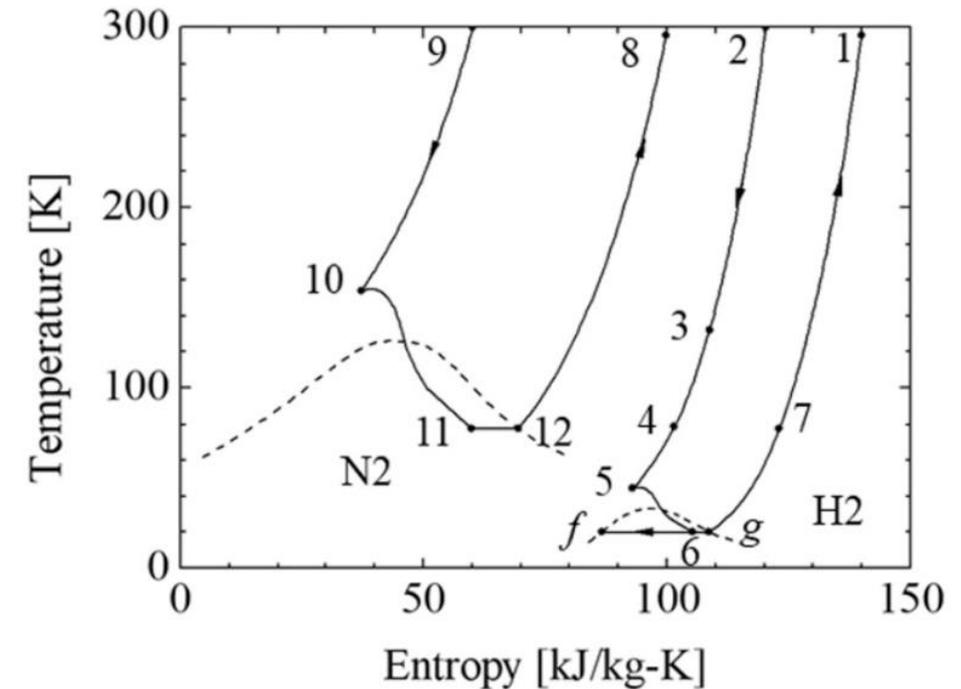


Figura 5.2: ciclo L-H pre-raffreddato rappresentato sul diagramma T-s [6]

**IPOTESI**



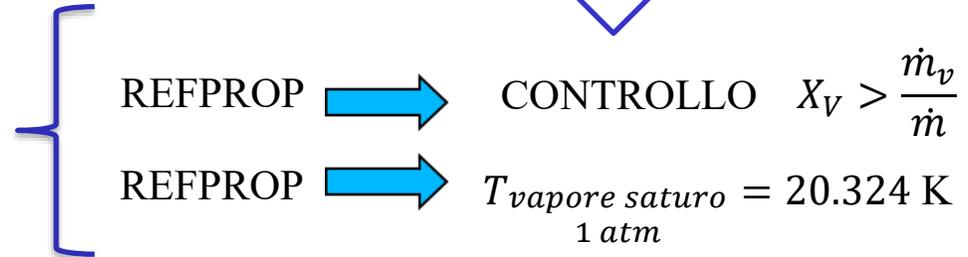
- PORTATA IDROGENO DEL CICLO  $\Rightarrow \dot{m} = 1 \frac{Kg}{s}$
- TEMPERATURA INIZIO CICLO 1° ITERAZIONE  $\Rightarrow T_{iniziale} = 300 K$
- PORTATA DI VAPORE SATURO  $\Rightarrow \dot{m}_v = 0.80 \frac{kg}{s}$   $\Rightarrow$  COSTANTE PER OGNI ITERAZIONE
- EFFICIENZA SCAMBIATORI  $\Rightarrow \epsilon = 0.65-0.75$
- 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**



**3. MISCELAZIONE**  $\Rightarrow T = \frac{\dot{m}_f T_{amb} + \dot{m}_v T_V}{\dot{m}}$   $\Rightarrow$  T 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**

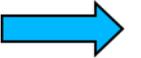


Funzione matlab  
refprom



$X_V$  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

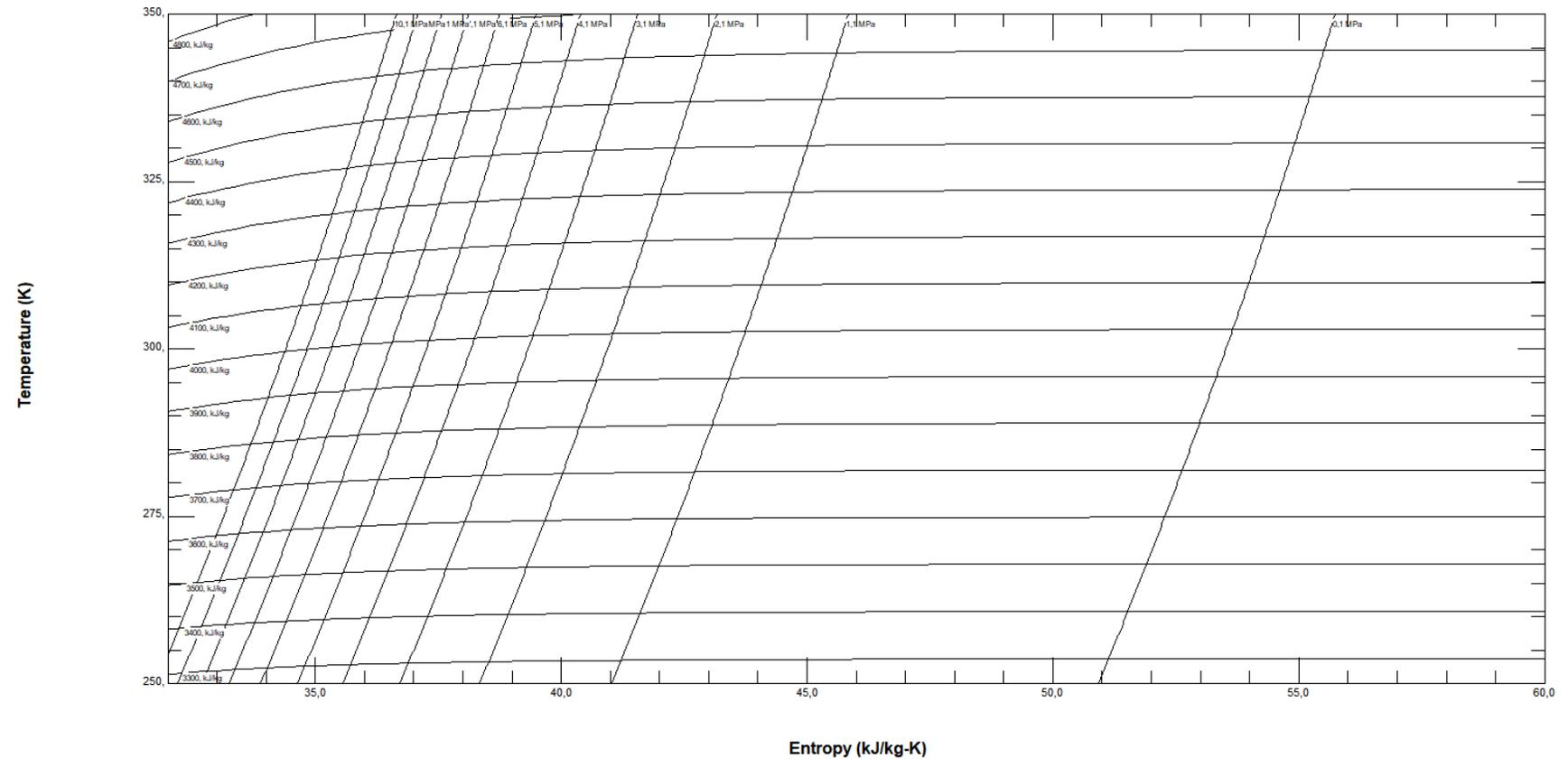
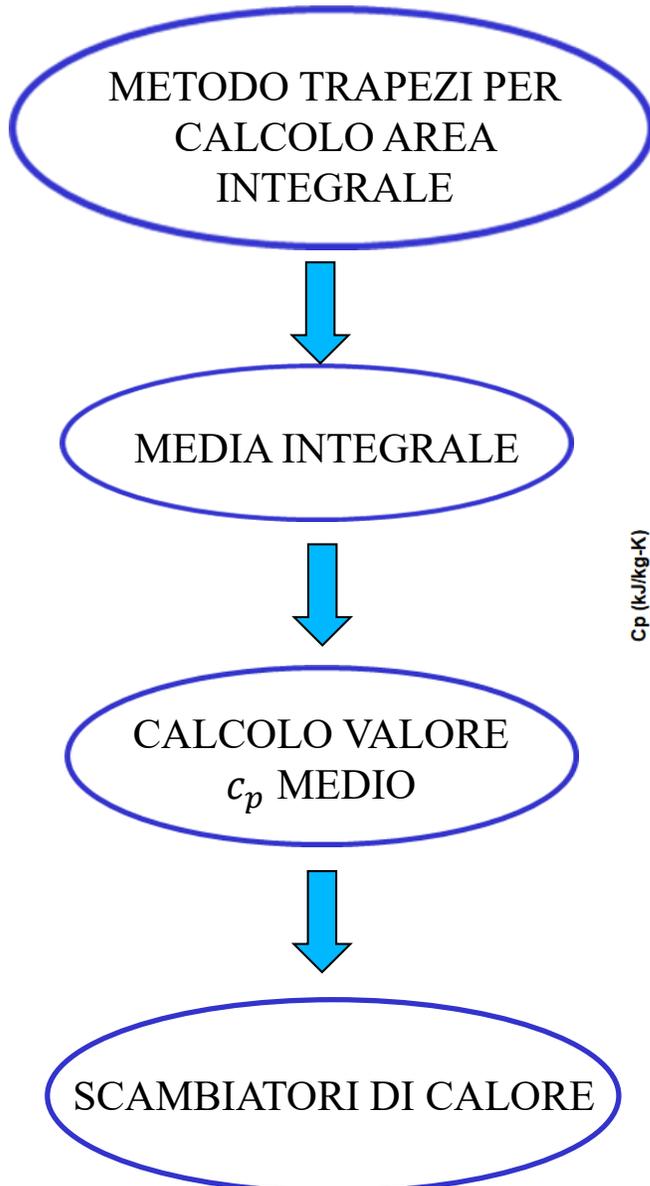


Figura 4.1: diagramma entropico T-s ( $p = 0.1-10$  MPa;  $T = 250-350$  K) [5]



- $c_p$  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=  $14.146 \frac{kJ}{kg K}$

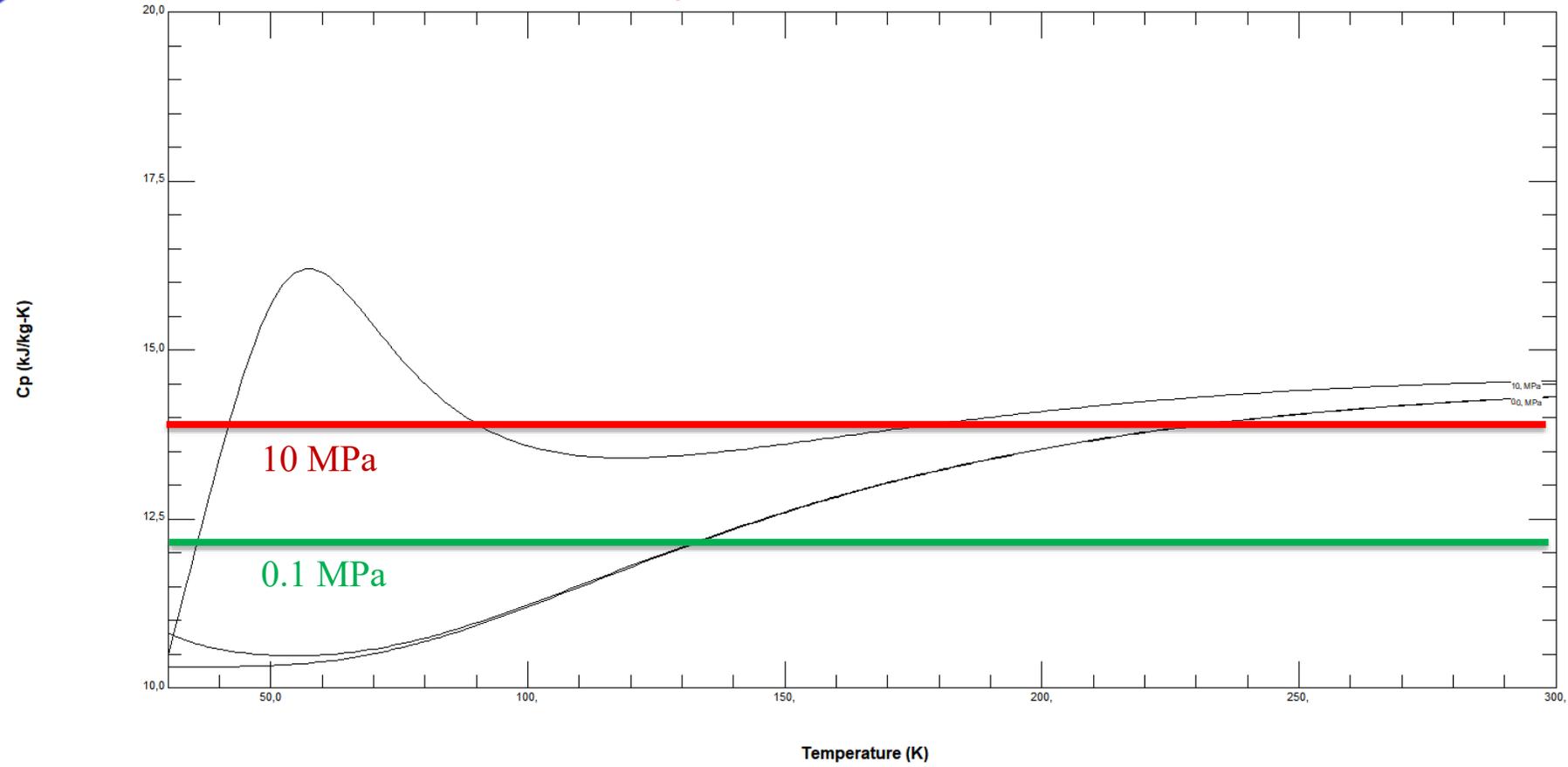


Figura 4.2: diagramma  $c_p$ -T ( $c_p = 10-20 \frac{kJ}{kg K}$ ; T= 30-300 K) [5]

VALVOLA DI J-T

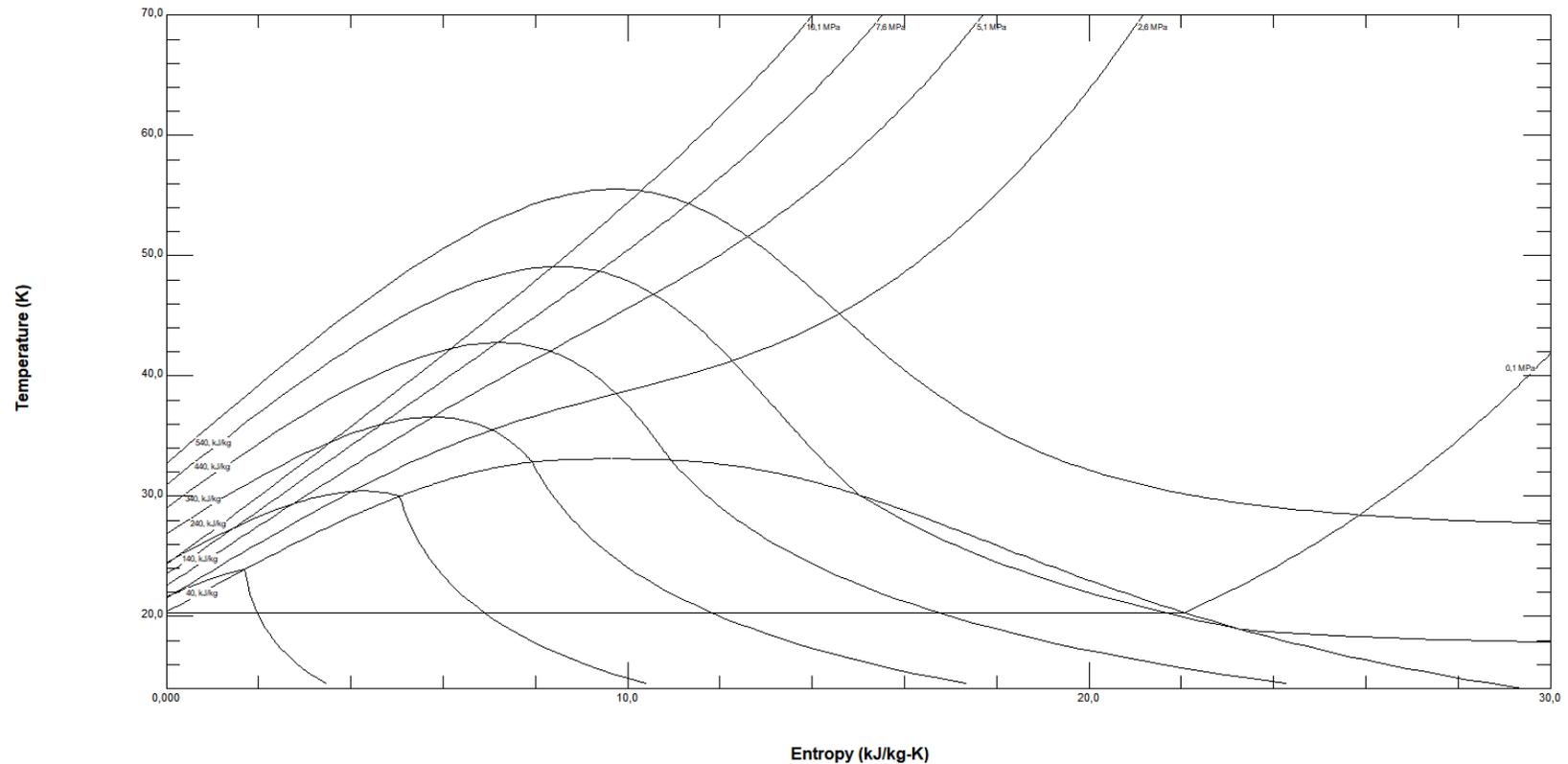


Figura 4.3: diagramma entropico T-s ( $p= 0.1-10$  MPa;  $T= 14-70$  K) [5]

**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  $\longrightarrow K = \frac{1}{\frac{1}{200} + \frac{1}{1000}}$   $[\frac{W}{K m^2}] \longrightarrow A = \frac{K A}{K} = 128.42 m^2$

ESERCITAZIONE 1



3 ITERAZIONI

□ ULTIMA ITERAZIONE:

- $FOM_{\%} = 8.27 \%$
- $COP = 1.046$
- $P_{compressori} = -2.435e+07 \text{ W}$
- $T_{iniziale} = 339.948 \text{ K}$
- $T_{valvola} = 45.475 \text{ K}$

ESERCITAZIONE 2



METODO  
DIVERGE

scarti  $X_v$ :  
0.0590  
0.1287  
0.3081

AUMENTO  
SCARTO

T in entrata valvola:  
45.4748  
41.4359  
50.7287

temperatura iniziale del ciclo in K:  
339.9398  
340.8549  
338.2753

ALTERNATIVA

1. T INIZIALE DEL CICLO FISSATA
2.  $X_v$  iterato



OPPORTUNA  
PROGETTAZIONE FASE DI  
COMPRESSIONE

## 2. CICLO L-H A DUE PRESSIONI

SUDDIVIDERE LA TRASFORMAZIONE  
ISOENTALPICA

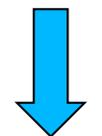


2 VALVOLE J-T



PASSAGGIO PER UNA  
PRESSIONE  
INTERMEDIA

VANTAGGI



AUMENTO DEL  
LIQUID YIELD

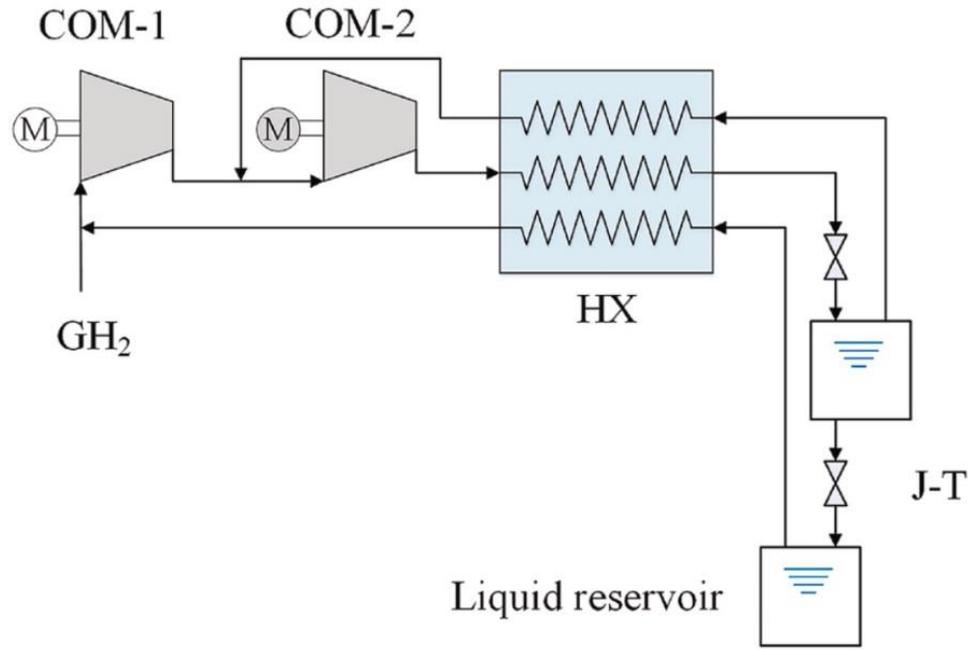


Figura 5.3: schema d'impianto ciclo L-H a doppia pressione [3]

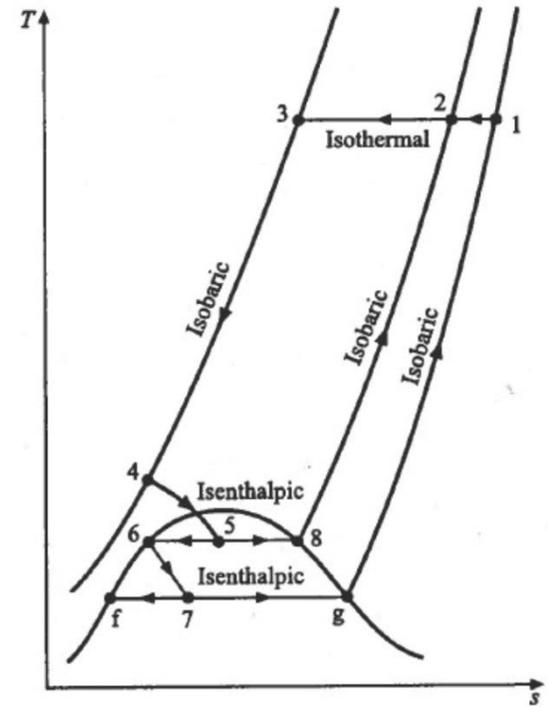


Figura 5.4: ciclo L-H a doppia pressione rappresentato nel diagramma di stato T-s [1]

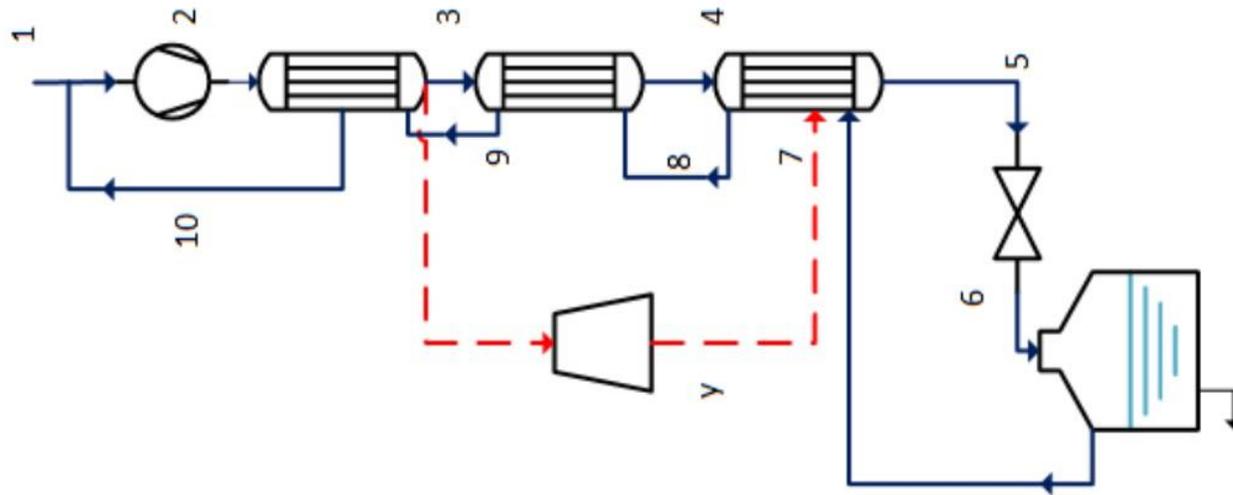


Figura 6.1: schema d'impianto ciclo Claude [4]

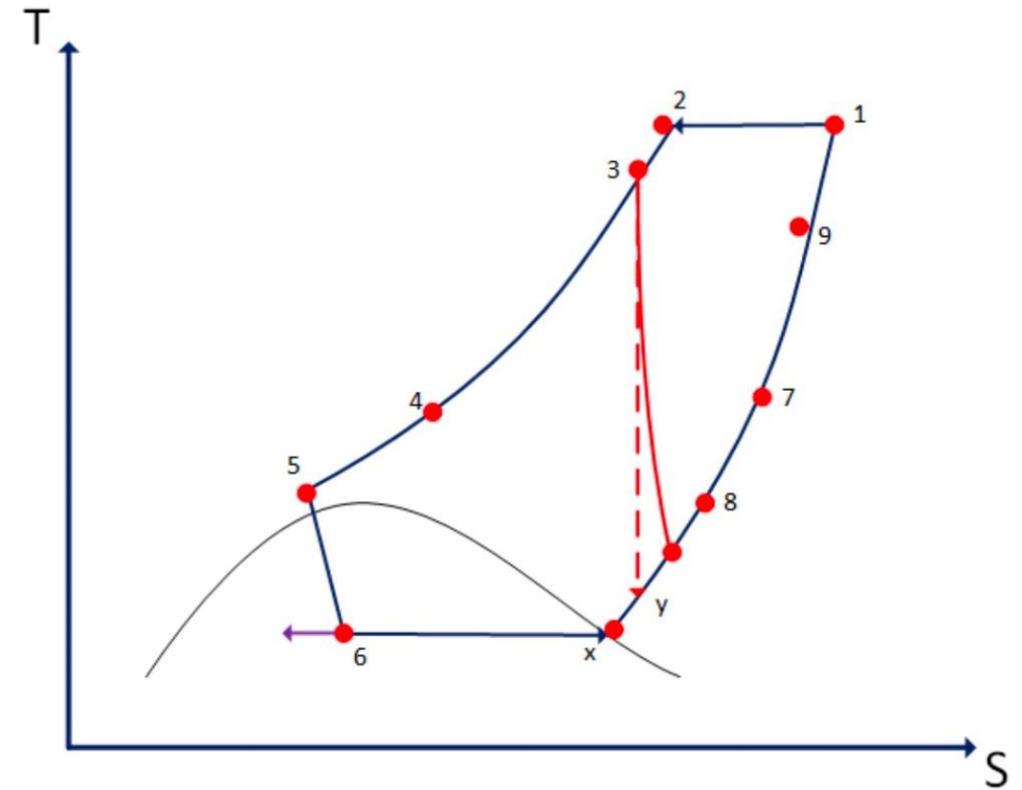


Figura 6.2: ciclo Claude rappresentato nel diagramma di stato T-s [4]

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 $LO_2/LH_2$

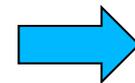
- PROPULSIONE STADI LANCIATORE →
  - MOTORE J-2 DEL SATURN V (NASA)
  - MOTORE 'VINCI' DELL'ARIANE 5 (ESA)

### PROBLEMI

COMBUSTIONE  
 $H_2/AIR$

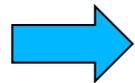


OSSIDI DI AZOTO



IMPATTO AMBIENTALE

$LH_2$  A TEMPERATURE CRIOGENICHE

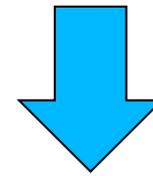


COMPLESSITA' SISTEMA DI STOCCAGGIO



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](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](https://www.ansa.it/veneto/notizie/2022/06/10/eni-a-venezia-primo-distributore-a-idrogeno-per-mobilita_2665f278-81f1-4527-8be5-d99dc8938d44.html)