

**LIBERO ISTITUTO UNIVERSITARIO  
C. CATTANEO  
FACOLTA' DI INGEGNERIA**

**CORSO DI TERMODINAMICA  
ED ENERGETICA**

**E S E R C I Z I**

**ANNO ACCADEMICO 2007-2008**

## SEZIONE 1 - ESERCIZI

### Riferimento della dispensa: Appendice (Sistemi ed unità di misura)

#### Esercizio n. 1.1

- a.  $100^{\circ}\text{C} = \underline{\hspace{2cm}}^{\circ}\text{F}$       b.  $32^{\circ}\text{F} = \underline{\hspace{2cm}}^{\circ}\text{C}$       c.  $100^{\circ}\text{C} = \underline{\hspace{2cm}}\text{K}$   
d.  $100^{\circ}\text{F} = \underline{\hspace{2cm}}\text{K}$       e.  $0\text{K} = \underline{\hspace{2cm}}^{\circ}\text{C}$       f.  $53\text{K} = \underline{\hspace{2cm}}^{\circ}\text{F}$   
g.  $14,3\text{psi} = \underline{\hspace{2cm}}\text{bar}$       h.  $120.000\text{N/m}^2 = \underline{\hspace{2cm}}\text{bar}$       i.  $10\text{atm} = \underline{\hspace{2cm}}\text{bar rel.}$   
l.  $555\text{kcal} = \underline{\hspace{2cm}}\text{kWh}$       m.  $73\text{kWh} = \underline{\hspace{2cm}}\text{J}$       n.  $1.215\text{kcal/h} = \underline{\hspace{2cm}}\text{W}$   
o. densità =  $1\text{kg/m}^3$  peso specifico =  $\underline{\hspace{2cm}}\text{N/m}^3$

#### Esercizio n. 1.2

- a.  $-13^{\circ}\text{C} = \underline{\hspace{2cm}}^{\circ}\text{F}$       b.  $-13^{\circ}\text{F} = \underline{\hspace{2cm}}^{\circ}\text{C}$       c.  $44^{\circ}\text{C} = \underline{\hspace{2cm}}\text{K}$   
d.  $-150^{\circ}\text{F} = \underline{\hspace{2cm}}\text{K}$       e.  $273,15\text{K} = \underline{\hspace{2cm}}^{\circ}\text{C}$       f.  $43\text{K} = \underline{\hspace{2cm}}^{\circ}\text{F}$   
g.  $44\text{N/m}^2 = \underline{\hspace{2cm}}\text{atm}$       h.  $144\text{bar} = \underline{\hspace{2cm}}\text{psi}$       i.  $5\text{atm} = \underline{\hspace{2cm}}\text{N/m}^2$   
l.  $320\text{kcal} = \underline{\hspace{2cm}}\text{J}$       m.  $6\text{MW} = \underline{\hspace{2cm}}\text{kcal/h}$       n.  $3\text{kWh} = \underline{\hspace{2cm}}\text{kcal}$   
o. volume specifico =  $0,45\text{m}^3/\text{kg}$  massa =  $3\text{kg}$  volume =  $\underline{\hspace{2cm}}\text{m}^3$

#### Esercizio n. 1.3

- a.  $90^{\circ}\text{C} = \underline{\hspace{2cm}}^{\circ}\text{F}$       b.  $60^{\circ}\text{F} = \underline{\hspace{2cm}}^{\circ}\text{C}$       c.  $122^{\circ}\text{C} = \underline{\hspace{2cm}}\text{K}$   
d.  $0^{\circ}\text{F} = \underline{\hspace{2cm}}\text{K}$       e.  $5\text{K} = \underline{\hspace{2cm}}^{\circ}\text{C}$       f.  $533\text{K} = \underline{\hspace{2cm}}^{\circ}\text{F}$   
g.  $15\text{psi} = \underline{\hspace{2cm}}\text{bar}$       h.  $233\text{N/m}^2 = \underline{\hspace{2cm}}\text{bar}$       i.  $53\text{atm} = \underline{\hspace{2cm}}\text{bar rel.}$   
l.  $122\text{kcal} = \underline{\hspace{2cm}}\text{kWh}$       m.  $27\text{kWh} = \underline{\hspace{2cm}}\text{J}$       n.  $231\text{kcal/h} = \underline{\hspace{2cm}}\text{W}$   
o. densità =  $25\text{kg/m}^3$  peso specifico =  $\underline{\hspace{2cm}}\text{N/m}^3$

#### Esercizio n. 1.4

- a.  $-3^{\circ}\text{C} = \underline{\hspace{2cm}}^{\circ}\text{F}$       b.  $-3^{\circ}\text{F} = \underline{\hspace{2cm}}^{\circ}\text{C}$       c.  $444^{\circ}\text{C} = \underline{\hspace{2cm}}\text{K}$   
d.  $-50^{\circ}\text{F} = \underline{\hspace{2cm}}\text{K}$       e.  $135\text{K} = \underline{\hspace{2cm}}^{\circ}\text{C}$       f.  $3\text{K} = \underline{\hspace{2cm}}^{\circ}\text{F}$   
g.  $4400\text{N/m}^2 = \underline{\hspace{2cm}}\text{atm}$       h.  $44\text{bar} = \underline{\hspace{2cm}}\text{psi}$       i.  $56\text{atm} = \underline{\hspace{2cm}}\text{N/m}^2$   
l.  $4.320\text{kcal} = \underline{\hspace{2cm}}\text{J}$       m.  $516\text{MW} = \underline{\hspace{2cm}}\text{kcal/h}$       n.  $341\text{kWh} = \underline{\hspace{2cm}}\text{kcal}$   
o. volume specifico =  $1,25\text{m}^3/\text{kg}$  massa =  $33\text{kg}$  volume =  $\underline{\hspace{2cm}}\text{m}^3$

#### Esercizio n. 1.5

- a.  $1,5\text{bar} = \underline{\hspace{2cm}}\text{N/m}^2$       b.  $12\text{psi} = \underline{\hspace{2cm}}\text{bar}$       c.  $133.000\text{N/m}^2 = \underline{\hspace{2cm}}\text{atm}$   
d.  $3,2\text{kcal} = \underline{\hspace{2cm}}\text{J}$       e.  $11.327\text{kWh} = \underline{\hspace{2cm}}\text{J}$       f.  $11\text{W} = \underline{\hspace{2cm}}\text{kcal/h}$   
g. densità =  $12\text{kg/m}^3$  volume specifico =  $\underline{\hspace{2cm}}\text{m}^3/\text{kg}$

#### Esercizio n. 1.6

- a.  $150.000\text{N/m}^2 = \underline{\hspace{2cm}}\text{bar}$       b.  $1,3\text{bar} = \underline{\hspace{2cm}}\text{psi}$       c.  $13\text{atm} = \underline{\hspace{2cm}}\text{N/m}^2$   
d.  $3.200\text{J} = \underline{\hspace{2cm}}\text{kcal}$       e.  $11\text{kW} = \underline{\hspace{2cm}}\text{kcal/h}$       f.  $41\text{kcal} = \underline{\hspace{2cm}}\text{kWh}$

## SEZIONE 1- SOLUZIONI

### Riferimento della dispensa: Appendice (Sistemi ed unità di misura)

#### Esercizio n. 1.1

- |   |   |  |
|---|---|--|
| a. $100^{\circ}\text{C} = 212^{\circ}\text{F}$                      | b. $32^{\circ}\text{F} = 0^{\circ}\text{C}$ | c. $100^{\circ}\text{C} = 373,15\text{ K}$ |
| d. $100^{\circ}\text{F} = 310,9\text{ K}$                           | e. $0\text{ K} = -273,15^{\circ}\text{C}$   | f. $53\text{ K} = -364,3^{\circ}\text{F}$  |
| g. $14,3\text{ psi} = 1\text{ bar}$                                 | h. $120.000\text{ N/m}^2 = 1,2\text{ bar}$  | i. $10\text{ at} = 10,13\text{ bar rel.}$  |
| l. $555\text{ kcal} = 0,645\text{ kWh}$                             | m. $73\text{ kWh} = 262.800.000\text{ J}$   | n. $1.215\text{ kcal/h} = 1.413\text{ W}$  |
| o. densità = $1\text{ kg/m}^3$ peso specifico = $9,81\text{ N/m}^3$ |   |  |

#### Esercizio n. 1.2

- |  |  |   |
|--|--|---|
| a. $-13^{\circ}\text{C} = 8,6^{\circ}\text{F}$   | b. $-13^{\circ}\text{F} = -25^{\circ}\text{C}$ | c. $44^{\circ}\text{C} = 317,15\text{ K}$ |
| d. $-150^{\circ}\text{F} = 172,04\text{ K}$  | e. $273,15\text{ K} = 0^{\circ}\text{C}$       | f. $43\text{ K} = -382,3^{\circ}\text{F}$ |
| g. $44\text{ N/m}^2 = 0,0004\text{ atm}$   | h. $144\text{ bar} = 2.059\text{ psi}$         | i. $5\text{ atm} = 506.500\text{ N/m}^2$  |
| l. $320\text{ kcal} = 1.339.840\text{ J}$  | m. $6\text{ MW} = 5.160.000\text{ kcal/h}$     | n. $3\text{ kWh} = 2.580\text{ kcal}$     |
| o. volume specifico = $0,45\text{ m}^3/\text{kg}$ massa = $3\text{ kg}$ volume = $1,35\text{ m}^3$ |  |   |

#### Esercizio n. 1.3

- |   |  |  |
|---|--|--|
| a. $90^{\circ}\text{C} = 194^{\circ}\text{F}$                         | b. $60^{\circ}\text{F} = 15,5^{\circ}\text{C}$ | c. $122^{\circ}\text{C} = 395,15\text{ K}$ |
| d. $0^{\circ}\text{F} = 255,4\text{ K}$                               | e. $5\text{ K} = -268,15^{\circ}\text{C}$      | f. $533\text{ K} = 499,7^{\circ}\text{F}$  |
| g. $15\text{ psi} = 1,05\text{ bar}$                                  | h. $233\text{ N/m}^2 = 0,00233\text{ bar}$     | i. $53\text{ atm} = 53\text{ bar rel.}$    |
| l. $122\text{ kcal} = 0,142\text{ kWh}$                               | m. $27\text{ kWh} = 97.200.000\text{ J}$       | n. $231\text{ kcal/h} = 268,6\text{ W}$    |
| o. densità = $25\text{ kg/m}^3$ peso specifico = $245,3\text{ N/m}^3$ |  |  |

#### Esercizio n. 1.4

- |   |   |   |
|---|---|---|
| a. $-3^{\circ}\text{C} = 26,6^{\circ}\text{F}$  | b. $-3^{\circ}\text{F} = -19,4^{\circ}\text{C}$ | c. $444^{\circ}\text{C} = 717,15\text{ K}$  |
| d. $-50^{\circ}\text{F} = 227,6\text{ K}$   | e. $135\text{ K} = -138,16^{\circ}\text{C}$     | f. $3\text{ K} = -454,28^{\circ}\text{F}$   |
| g. $4400\text{ N/m}^2 = 0,043\text{ atm}$   | h. $44\text{ bar} = 629,2\text{ psi}$           | i. $56\text{ atm} = 5.672.800\text{ N/m}^2$ |
| l. $4.320\text{ kcal} = 18.087.840\text{ J}$  | m. $516\text{ MW} = 443.760.000\text{ kcal/h}$  | n. $341\text{ kWh} = 293.260\text{ kcal}$   |
| o. volume specifico = $1,25\text{ m}^3/\text{kg}$ massa = $33\text{ kg}$ volume = $39,6\text{ m}^3$ |   |   |

#### Esercizio n. 1.5

- |   |   |   |
|---|---|---|
| a. $1,5\text{ bar} = 150.000\text{ N/m}^2$                                      | b. $12\text{ psi} = 0,839\text{ bar}$                 | c. $133.000\text{ N/m}^2 = 1,31\text{ atm}$ |
| d. $3,2\text{ kcal} = 13.398\text{ J}$  | e. $11.327\text{ kWh} = 4,08 \times 10^{10}\text{ J}$ | f. $11\text{ W} = 9,46\text{ kcal/h}$       |
| g. densità = $12\text{ kg/m}^3$ volume specifico = $0,083\text{ m}^3/\text{kg}$ |   |   |

#### Esercizio n. 1.6

- |  |   |  |
|--|---|--|
| a. $150.000\text{ N/m}^2 = 1,5\text{ bar}$ | b. $1,3\text{ bar} = 18,6\text{ psi}$   | c. $13\text{ atm} = 1,32 \times 10^6\text{ N/m}^2$ |
| d. $3.200\text{ J} = 0,76\text{ kcal}$     | e. $11\text{ kW} = 9.460\text{ kcal/h}$ | f. $41\text{ kcal} = 0,05\text{ kWh}$              |

## SEZIONE 2 - ESERCIZI

### Riferimento della dispensa: cap. A (Idraulica)

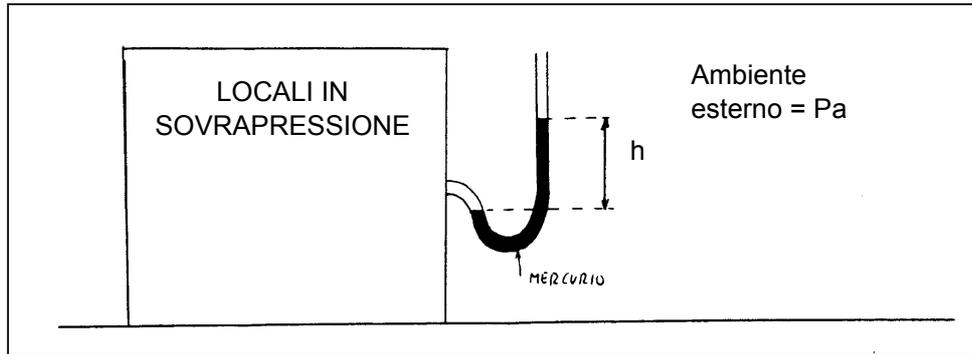
#### Esercizio n. 2.1

Un manometro a liquido viene utilizzato per misurare la sovrappressione in un locale stagno, rispetto all'ambiente esterno. Il liquido manometrico è mercurio (massa specifica =  $d$ ) e l'indicazione del manometro è quella riportata nella figura allegata (dislivello =  $h$ ).

Calcolare la pressione assoluta dell'aria nel locale stagno, espressa in bar, assumendo il valore sottoindicato  $P_a$  per la pressione atmosferica all'esterno del locale, dove è posto il manometro.

#### DATI

|                                      |       |   |                          |
|--------------------------------------|-------|---|--------------------------|
| Massa specifica del mercurio :       | $d$   | = | 13.590 kg/m <sup>3</sup> |
| Dislivello manometro (vedi figura) : | $h$   | = | 10 cm                    |
| Pressione atmosferica :              | $P_a$ | = | 1 ata                    |



#### Esercizio n. 2.2

Un serbatoio atmosferico a forma cubica, lato  $L$ , è pieno d'acqua (massa specifica =  $d$ ) fino al livello  $H$

Calcolare:

- la spinta dell'acqua su una qualunque delle pareti verticali;
- la distanza, dal fondo, del centro di spinta su una qualunque delle pareti verticali.

#### DATI

|                               |     |   |                         |
|-------------------------------|-----|---|-------------------------|
| Lato serbatoio cubico :       | $L$ | = | 3 m                     |
| Massa specifica dell'acqua :  | $d$ | = | 1.000 kg/m <sup>3</sup> |
| Livello acqua nel serbatoio : | $H$ | = | 1 m                     |

#### Esercizio n. 2.3

Un serbatoio atmosferico a base piana con una parete verticale (perpendicolare alla base) a forma di trapezio isoscele (base maggiore =  $a$ , base minore =  $b$ , altezza =  $h$ ) che appoggia sulla base maggiore, è pieno d'acqua (massa specifica =  $d$ ) fino all'orlo.

Calcolare:

- la spinta dell'acqua sulla parete verticale a forma di trapezio;
- la distanza, dal fondo, del centro di spinta sulla parete verticale a forma trapezoidale.

#### DATI

|   |     |   |                         |
|---|-----|---|-------------------------|
| Base maggiore parete verticale trapezoidale : | $a$ | = | 4 m                     |
| Base minore parete verticale trapezoidale :   | $b$ | = | 2 m                     |
| Altezza parete verticale trapezoidale :       | $h$ | = | 3 m                     |
| Massa specifica dell'acqua :                  | $d$ | = | 1.000 kg/m <sup>3</sup> |
| Livello acqua nel serbatoio :                 | $L$ | = | 3 m                     |

## SEZIONE 2 - ESERCIZI

### Esercizio n. 2.4

Un serbatoio atmosferico contiene acqua, il cui pelo libero si trova a quota (H) dal fondo del serbatoio stesso. Nel fondo del serbatoio viene praticato un foro circolare, diametro (D), dal quale fuoriesce l'acqua nell'atmosfera esterna. Il serbatoio ha base quadrata a lato b.

Calcolare:

- la portata d'acqua che esce inizialmente dal foro, considerando un coefficiente di contrazione = Cc

- Il tempo necessario per la fuoriuscita di un volume di liquido DV, in due modi:

1 - Supponendo costante il livello d'acqua, a quota H dal fondo, considerando un coefficiente di contrazione = Cc

2 - Considerando la diminuzione del livello d'acqua, man mano che avviene lo svuotamento

#### DATI

|                                     |    |   |                   |
|-------------------------------------|----|---|-------------------|
| Quota pelo libero :                 | H  | = | 5 m               |
| Diametro foro circolare :           | D  | = | 20 cm             |
| Coefficiente di contrazione :       | Cc | = | 0,60              |
| Lato di base del serbatoio :        | b  | = | 10 m              |
| Volume di liquido che deve uscire : | DV | = | 40 m <sup>3</sup> |

### Esercizio n. 2.5.

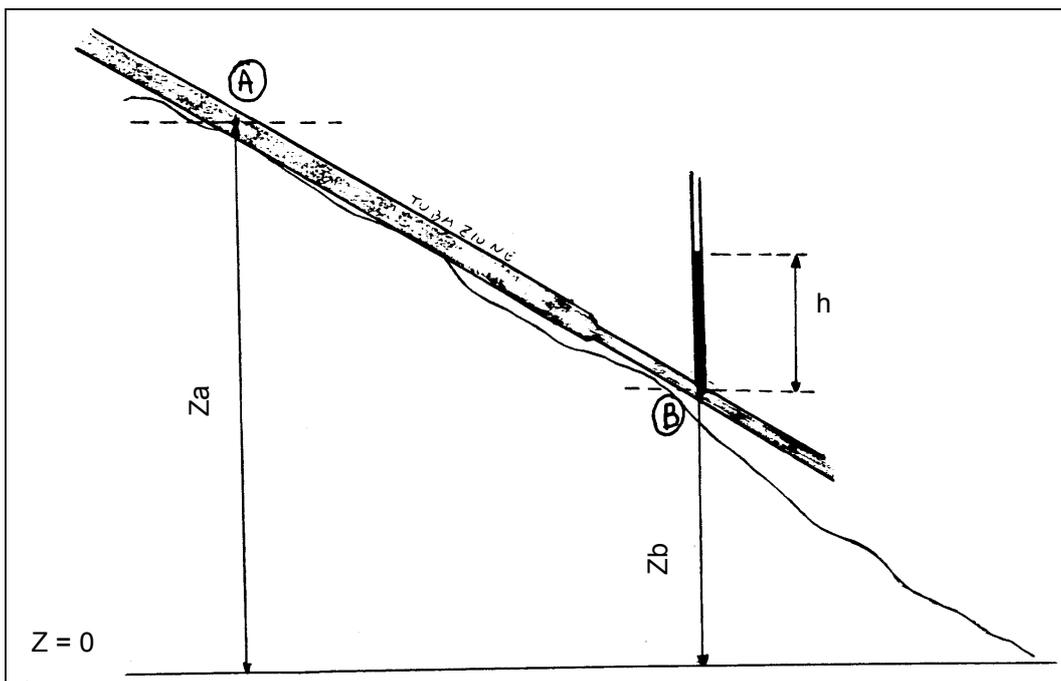
Una tubazione che trasporta acqua è posata sul declivio di una collina. Si considerino due punti, denominati A e B, di tale tubazione. Nel punto A, la quota del terreno è  $Z_a$  e la tubazione ha un diametro interno  $D_a$ , mentre nel punto B la quota è  $Z_b$  ed il diametro interno è  $D_b$ .

Un manometro misura la pressione dell'acqua entro il tubo nel punto A ed indica il valore  $P_a$ . La portata d'acqua è Q. Il moto è permanente. Si consideri l'acqua come un fluido ideale.

Calcolare l'innalzamento H dell'acqua nel tubicino (liberamente comunicante con l'atmosfera) collegato alla tubazione nel punto B, rispetto alla quota del terreno nello stesso punto (vedere figura allegata).

#### DATI

|  |       |   |                         |
|--|-------|---|-------------------------|
| Quota terreno nel punto A :              | $Z_a$ | = | 105 m s.l.m.            |
| Quota terreno nel punto B :              | $Z_b$ | = | 100 m s.l.m.            |
| Diametro interno tubazione nel punto A : | $D_a$ | = | 100 mm                  |
| Diametro interno tubazione nel punto B : | $D_b$ | = | 80 mm                   |
| Pressione nel punto A :                  | $P_a$ | = | 1,2 bar rel.            |
| Portata d'acqua nella tubazione :        | Q     | = | 80 m <sup>3</sup> /h    |
| Massa specifica dell'acqua :             | d     | = | 1.000 kg/m <sup>3</sup> |



## SEZIONE 2 - ESERCIZI

### Esercizio n. 2.6.

Si considerino due punti, denominati A e B, di una tubazione che trasporta acqua.

#### DATI

Z = quota terreno nei due punti :

A 500 m s.l.m.

B 525 m s.l.m.

D = diametro interno tubazione nei due punti :

A 100 mm

B 150 mm

Un manometro misura la pressione nel punto A:

Pa = 3,0 bar rel.

E' nota la portata d'acqua nella tubazione:

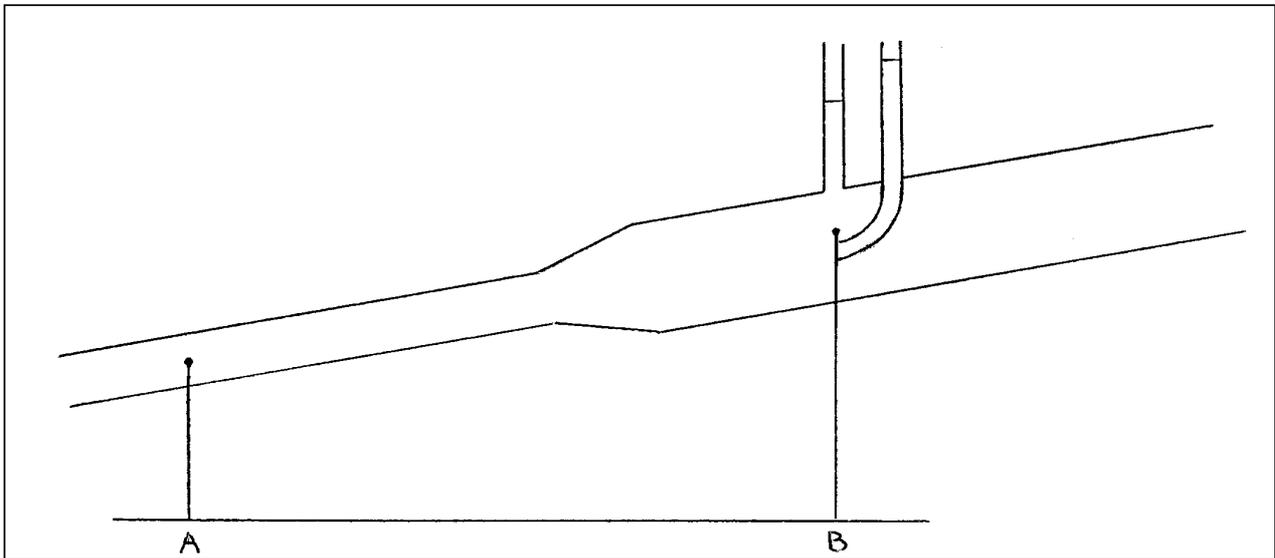
Q = 100 m<sup>3</sup>/h

Massa specifica dell'acqua :

d = 1.000 kg/m<sup>3</sup>

Il moto è permanente. Si consideri l'acqua come un fluido ideale.

Calcolare l'innalzamento h1 e h2 dell'acqua nei due tubicini (liberamente comunicante con l'atmosfera) collegati alla tubazione nel punto B, rispetto alla quota della tubazione nello stesso punto (vedere figura).



---

### Esercizio n. 2.7.

Una tubazione che trasporta acqua è posata su un percorso orizzontale. Si considerino due punti, denominati A e B, di tale tubazione.

Nel punto A, la tubazione ha un diametro interno Da, mentre nel punto B il diametro interno è Db.

Due manometri misurano la pressione dell'acqua entro il tubo nei due punti e sono rispettivamente Pa nel punto A e Pb punto B.

La portata d'acqua è Q. Il moto è permanente.

Calcolare le perdite di carico totale nella tubazione fra A e B.

#### DATI

Diametro interno tubazione nel punto A :

Da = 80 mm

Diametro interno tubazione nel punto B :

Db = 100 mm

Pressione nel punto A :

Pa = 3,0 bar rel.

Pressione nel punto B :

Pb = 2,0 bar rel.

Portata d'acqua nella tubazione :

Q = 100 m<sup>3</sup>/h

Massa specifica dell'acqua :

d = 1.000 kg/m<sup>3</sup>

---

## SEZIONE 2 - ESERCIZI

### Esercizio n. 2.8.

In una tubazione che trasporta olio (massa specifica =  $d_1$ ), è inserito un venturimetro.

La tubazione è orizzontale e i fra due punti A e B viene inserito un manometro differenziale con mercurio liquido (massa specifica =  $d_2$ ) e l'indicazione del manometro è quella riportata nella figura sottostante (dislivello =  $h$ ). Nel punto A la tubazione ha un diametro interno  $D_a$ , mentre nel punto B il diametro interno  $D_b$ . Il moto è permanente. Si consideri l'olio come un fluido ideale.

Calcolare la portata dell'olio:

- applicando il teorema di Bernoulli passaggio per passaggio senza usare la formula del venturimetro
- usando direttamente la formula di calcolo del venturimetro.

#### DATI

Diametro interno tubazione nel punto A :

$$D_a = 50 \text{ mm}$$

Diametro interno tubazione nel punto B :

$$D_b = 20 \text{ mm}$$

Massa specifica del fluido nella tubazione:

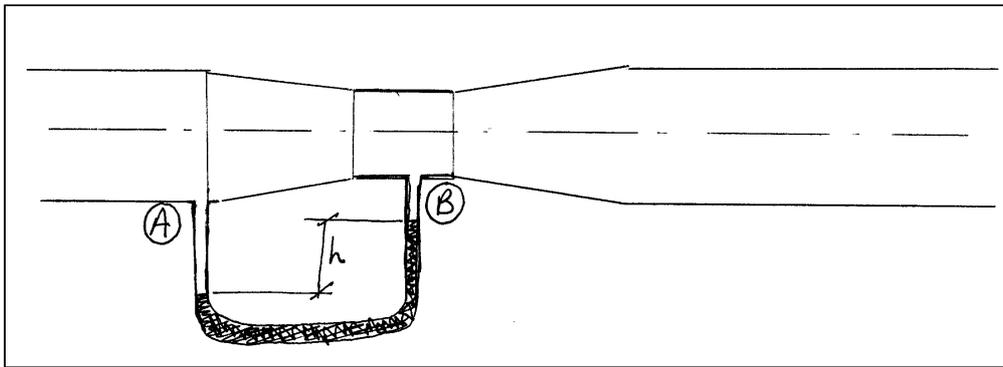
$$d_1 = 920 \text{ kg/m}^3$$

Massa specifica del liquido manometrico:

$$d_2 = 13.590 \text{ kg/m}^3$$

Dislivello manometro (vedi figura) :

$$h = 40 \text{ cm}$$



## SEZIONE 2 - ESERCIZI

### Esercizio n. 2.9.

Si considerino due punti, denominati A e B, di una tubazione che trasporta acqua.

#### DATI

Z = quota terreno nei due punti :

A = 105 m s.l.m.

B = 100 m s.l.m.

D = diametro interno tubazione nei due punti :

A = 50 mm

B = 50 mm

La lunghezza della tubazione è:

L = 200 m

Un manometro misura la pressione nel punto A:

Pa = 3,0 bar rel.

E' nota la portata d'acqua nella tubazione:

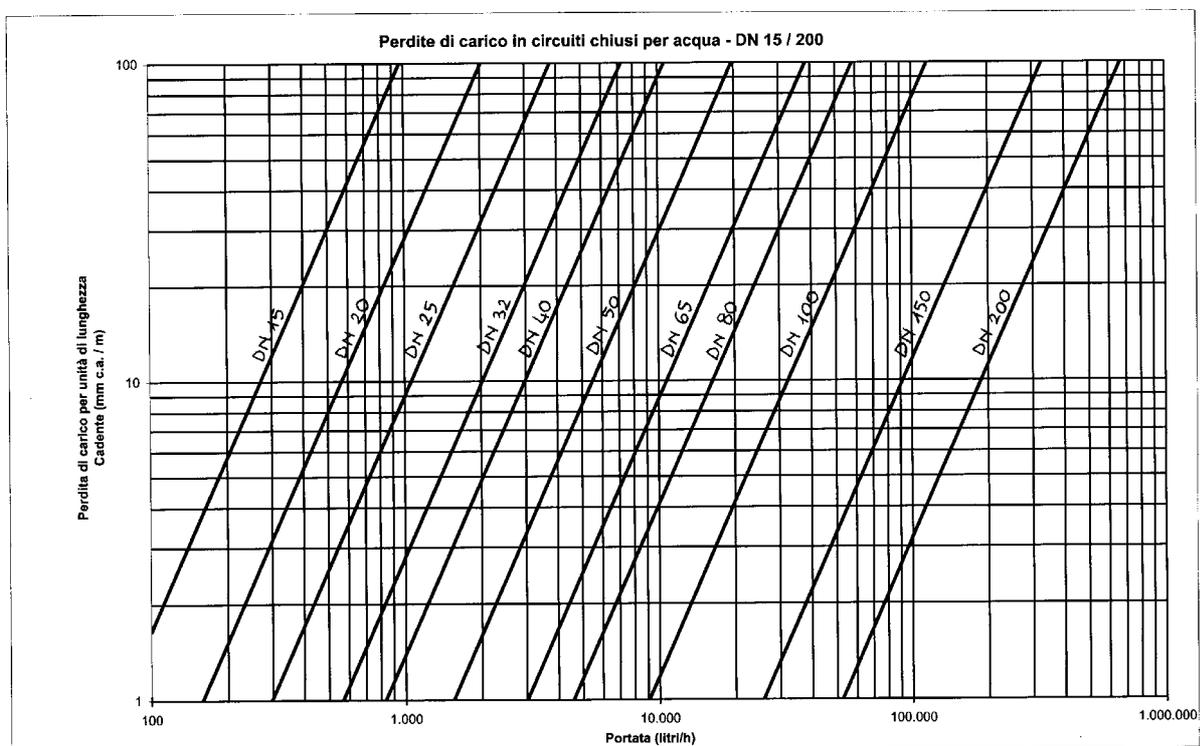
Q = 6,0 m<sup>3</sup>/h

Massa specifica dell'acqua :

d = 1.000 kg/m<sup>3</sup>

Il moto è permanente. Si consideri l'acqua come un fluido reale con perdite di carico.

Utilizzando il diagramma allegato, calcolare la pressione nel punto B.



## SEZIONE 2 - SOLUZIONI

### Riferimento della dispensa: cap. A (Idraulica)

---

#### Esercizio n. 2.1

##### DATI

|                                      |    |   |                          |
|--------------------------------------|----|---|--------------------------|
| Massa specifica del mercurio :       | d  | = | 13.590 kg/m <sup>3</sup> |
| Dislivello manometro (vedi figura) : | h  | = | 10 cm                    |
| Pressione atmosferica :              | Pa | = | 1 ata                    |

##### CALCOLI

La pressione dell'ambiente esterno al locale è pari a  $P_a = 1 \text{ ata} = 1,013 \text{ bar ass.}$

La sovrappressione all'interno del locale stagno rispetto all'ambiente esterno è pari a:

$$DP = d \times g \times h = 13.590 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 0,1 \text{ m} = 13.332 \text{ N/m}^2 = 0,13332 \text{ bar rel.}$$

La pressione assoluta del locale è pari a:  $P = P_a + DP = 1,14632 \text{ bar ass.}$

---

#### Esercizio n. 2.2

##### DATI

|                               |   |   |                         |
|-------------------------------|---|---|-------------------------|
| Lato serbatoio cubico :       | L | = | 3 m                     |
| Massa specifica dell'acqua :  | d | = | 1.000 kg/m <sup>3</sup> |
| Livello acqua nel serbatoio : | H | = | 1 m                     |

##### CALCOLI

L'area bagnata di una qualsiasi delle superfici verticali è pari ad :  $A = L \times H = 3 \text{ mq}$

L'affondamento del baricentro della parte bagnata della parete a partire dal pelo libero, è pari a :

$$b = 1/2 H = 0,5 \text{ m}$$

La pressione relativa esercitata dal fluido nel baricentro della parete bagnata è pari a:

$$P = P_{atm} + d \times g \times b = 0 + 1.000 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 0,5 \text{ m} = 4.905 \text{ N/m}^2$$

dove  $P_{atm}$  è uguale a 0 in termini relativi

La spinta esercitata dal fluido su una qualsiasi delle pareti è pari a:

$$S = A \times P = 3 \text{ m}^2 \times 4.905 \text{ N/m}^2 = 14.715 \text{ N}$$

Il centro di spinta si trova ad una quota pari a  $2/3 H$  a partire dal pelo libero dell'acqua oppure ad  $1/3 H$  a partire dal fondo del recipiente

---

## SEZIONE 2 - SOLUZIONI

### Esercizio n. 2.3

#### DATI

|   |   |   |                         |
|---|---|---|-------------------------|
| Base maggiore parete verticale trapezoidale : | a | = | 4 m                     |
| Base minore parete verticale trapezoidale :   | b | = | 2 m                     |
| Altezza parete verticale trapezoidale :       | h | = | 3 m                     |
| Massa specifica dell'acqua :                  | d | = | 1.000 kg/m <sup>3</sup> |
| Livello acqua nel serbatoio :                 | L | = | 3 m                     |

#### CALCOLI

La superficie trapezoidale deve essere suddivisa in una superficie rettangolare di dimensioni 2 m x 3 m ed in due superfici triangolari, ciascuna con base di 1 m ed altezza di 3 m.

#### Superficie rettangolare

Area bagnata della superficie rettangolare:  $A1 = b \times L = 6 \text{ m}^2$

Affondamento del baricentro della parete bagnata a partire dal pelo libero:  
 $h1 = 1/2 L = 1,50 \text{ m}$

Pressione relativa esercitata dal fluido nel baricentro della parete rettangolare bagnata:  
 $P1 = Patm + d \times g \times b1 = 0 + 1.000 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 1,5 \text{ m} = 14.715 \text{ N/m}^2$   
dove  $Patm$  è uguale a 0 in termini relativi

Spinta esercitata dal fluido sulla parete:  
 $S1 = A1 \times P1 = 6 \text{ m}^2 \times 14.715 \text{ N/m}^2 = 88.290 \text{ N}$

Il centro di spinta  $H1$  sulla parete rettangolare si trova nel baricentro del diagramma delle spinte elementari, che è triangolare e si trova ad una profondità dal pelo libero maggiore rispetto a quella del baricentro della parete bagnata.

Affondamento del centro di spinta  $H1$  a partire dal pelo libero dell'acqua:  
 $H1 = 2/3 L = 2,00 \text{ m}$

#### Superfici triangolari

Area bagnata di una superficie triangolare:  $A2 = ((a-b)/2 \times L) / 2 = 1,50 \text{ m}^2$

Affondamento del baricentro della parte bagnata della parete a partire dal pelo libero:  
 $h2 = 2/3 L = 2,00 \text{ m}$

Pressione relativa esercitata dal fluido nel baricentro di una delle pareti triangolari bagnata:  
 $P2 = Patm + d \times g \times b1 = 0 + 1.000 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 2 \text{ m} = 19.620 \text{ N/m}^2$   
dove  $Patm$  è uguale a 0 in termini relativi

Spinta complessiva esercitata dal fluido sulle due pareti triangolari:  
 $S2 = 2 \times A2 \times P2 = 2 \times 1,5 \text{ m}^2 \times 19.620 \text{ N/m}^2 = 58.860 \text{ N}$

Il centro di spinta  $H2$  sulla parete triangolare si trova nel baricentro del diagramma delle spinte elementari, che è a forma parabolica e si trova ad una profondità dal pelo libero maggiore rispetto a quella del baricentro della parete bagnata.

Affondamento del centro di spinta  $H2$  a partire dal pelo libero dell'acqua:  
 $H2 = 3/4 L = 2,25 \text{ m}$

Spinta complessiva sulla parete trapezoidale:  $S = S1 + S2 = 147.150 \text{ N}$

Il centro di spinta dell'intera parete trapezoidale si trova sull'asse di simmetria ad una quota a partire dal pelo libero dell'acqua pari a:  
 $H = ((H1 \times S1) + (H2 \times S2)) / (S1 + S2) = 2,10 \text{ m}$

## SEZIONE 2 - SOLUZIONI

### Esercizio n. 2.4

#### DATI

|                                     |    |   |                   |
|-------------------------------------|----|---|-------------------|
| Quota pelo libero :                 | H  | = | 5 m               |
| Diametro foro circolare :           | D  | = | 20 cm             |
| Coefficiente di contrazione :       | Cc | = | 0,60              |
| Lato di base del serbatoio :        | b  | = | 10 m              |
| Volume di liquido che deve uscire : | DV | = | 40 m <sup>3</sup> |

#### CALCOLI METODO 1

|   |   |   |
|---|---|---|
| Sezione del foro: $A = 3,14 \times D^2/4 =$                                     | = | 0,03140 m <sup>2</sup>                              |
| Velocità del fluido all'uscita del foro: $v = \sqrt{2 \times g \times H} =$     | = | 9,905 m/s   |
| Portata di acqua che esce inizialmente dal foro: $Q_i = V \times A \times Cc =$ | = | 0,1866 m <sup>3</sup> /s<br>671,8 m <sup>3</sup> /h |

Calcolo del tempo di fuoriuscita del volume DV - metodo 1

In via semplificata, si considera  $Q = \text{costante} = Q_i$  per tutto il tempo

|  |   |          |
|--|---|----------|
| Tempo di uscita del volume di liquido DV: $T = DV / Q_i =$ | = | 214,36 s |
|--|---|----------|

Calcolo del tempo di fuoriuscita del volume DV - metodo 2

Col metodo 2, il grado di precisione è tanto maggiore, quanto maggiore è il numero di intervalli di calcolo

Qui sotto vengono mostrati due calcoli, uno con un intervallo di calcolo solo e l'utilizzo della media fra inizio e fine intervallo, l'altro con 4 intervalli di calcolo

2.1 - Un intervallo solo e calcolo della portata media fra l'inizio e la fine dell'uscita del liquido

|   |   |                          |
|---|---|--------------------------|
| Area di base del serbatoio: $Ab = b \times b =$                                       | = | 100 m <sup>2</sup>       |
| Differenza di livello quando esce il volume DV: $DH = DV / Ab =$                      | = | 0,400 m                  |
| Livello medio fra inizio e fine uscita liquido: $H_m = H - DH/2 =$                    | = | 4,80 m                   |
| Velocità media del fluido all'uscita del foro: $v_m = \sqrt{2 \times g \times H_m} =$ | = | 9,704 m/s                |
| Portata media di acqua che esce dal foro: $Q_m = v_m \times A \times Cc =$            | = | 0,1828 m <sup>3</sup> /s |
| Tempo di uscita del volume di liquido DV: $T = DV / Q_m =$                            | = | 218,78 s                 |

Non c'è sostanziale differenza col caso 1

2.2 - Per aumentare la precisione si divide il processo di scarica in 4 intervalli

Le formule di calcolo sono le stesse che in 2.1, ma ripetute 4 volte

| Fase  | 1      | 2      | 3      | 4      | totale |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| Volume che esce ogni intervallo: $DV / 4 = m^3$   | 10,00  | 10,00  | 10,00  | 10,00  | 40,00  |
| Differenza di livello quando esce il volume DV/4: | 0,100  | 0,100  | 0,100  | 0,100  | 0,40   |
| Livello medio fra inizio e fine uscita liquido:   | 4,95   | 4,85   | 4,75   | 4,65   |        |
| Velocità media del fluido all'uscita del foro:    | 9,855  | 9,755  | 9,654  | 9,552  |        |
| Portata media di acqua che esce dal foro:         | 0,1857 | 0,1838 | 0,1819 | 0,1800 |        |
| Tempo di uscita del volume di liquido DV/4:       | 53,86  | 54,41  | 54,98  | 55,57  | 218,83 |

Si può vedere che il tempo di scarica nei 4 intervalli è diverso e aumenta man mano che diminuisce il livello dell'acqua. Il risultato è più preciso di quello del calcolo 2.1 (anche se la differenza è impercettibile).

## SEZIONE 2 - SOLUZIONI

### Esercizio n. 2.5.

#### DATI

|  |    |   |                         |
|--|----|---|-------------------------|
| Quota terreno nel punto A :              | Za | = | 105 m s.l.m.            |
| Quota terreno nel punto B :              | Zb | = | 100 m s.l.m.            |
| Diametro interno tubazione nel punto A : | Da | = | 100 mm                  |
| Diametro interno tubazione nel punto B : | Db | = | 80 mm                   |
| Pressione nel punto A :                  | Pa | = | 1,2 bar rel.            |
| Portata d'acqua nella tubazione :        | Q  | = | 80 m <sup>3</sup> /h    |
| Massa specifica dell'acqua :             | d  | = | 1.000 kg/m <sup>3</sup> |

#### CALCOLI

Portata d'acqua nella tubazione (trasformo in m<sup>3</sup>/s):  $Q = 80 \text{ m}^3/\text{h} = 0,0222 \text{ m}^3/\text{s}$

Calcolo velocità dell'acqua e quindi altezza cinetica nel punto A e nel punto B:

|   |   |                        |
|---|---|------------------------|
| - sezione della tubazione nel punto A : $A_a = 3,14 \times D_a^2 / 4$ | = | 0,00785 m <sup>2</sup> |
| - sezione della tubazione nel punto B : $A_b = 3,14 \times D_b^2 / 4$ | = | 0,00502 m <sup>2</sup> |
| - velocità del fluido nel punto A : $V_a = Q / A_a$                   | = | 2,83 m/s               |
| - velocità del fluido nel punto B : $V_b = Q / A_b$                   | = | 4,42 m/s               |
| - altezza cinetica del fluido nel punto A : $V_a^2 / 2g$              | = | 0,41 m                 |
| - altezza cinetica del fluido nel punto B : $V_b^2 / 2g$              | = | 1,00 m                 |

Altezza piezometrica nel punto A:  $P_a / g d = 12,23 \text{ m}$

Teorema di Bernoulli:  $Z_a + P_a / (d \times g) + V_a^2 / 2g = Z_b + P_b / (d \times g) + V_b^2 / 2g$

Carico totale in A:  $H_a = Z_a + P_a / (d \times g) + V_a^2 / 2g = 117,64 \text{ m}$

Altezza piezometrica nel punto B:  $P_b / g d = H_a - (Z_b + V_b^2 / 2g) = 16,64 \text{ m}$

Il tubicino nel punto B è collegato alla parete laterale della tubazione e quindi in modo che l'acqua lambisca l'ingresso senza creare una pressione dinamica (cioè l'altezza cinetica viene persa).

Pertanto l'acqua nel tubicino arriva ad una quota geodetica  $Z_x$  pari alla quota piezometrica in B:

$Z_x = Z_b + P_b / (d \times g) = 116,64 \text{ m}$

L'innalzamento H sopra alla tubazione è pertanto pari a  $P_b / (d \times g)$

$H = P_b / (d \times g) = Z_x - Z_b = 16,64 \text{ m}$

---

## SEZIONE 2 - SOLUZIONI

### Esercizio n. 2.6.

#### DATI

Si considerino due punti, denominati A e B, di una tubazione che trasporta acqua.

|  |      |                         |
|--|------|-------------------------|
| Z = quota terreno nei due punti :              | A    | 500 m s.l.m.            |
|  | B    | 525 m s.l.m.            |
| D = diametro interno tubazione nei due punti : | A    | 100 mm                  |
|  | B    | 150 mm                  |
| Un manometro misura la pressione nel punto A:  | Pa = | 3,0 bar rel.            |
| E' nota la portata d'acqua nella tubazione:    | Q =  | 100 m <sup>3</sup> / h  |
| Massa specifica dell'acqua :                   | d =  | 1.000 kg/m <sup>3</sup> |

#### CALCOLI

Portata d'acqua nella tubazione (trasformo in m<sup>3</sup>/s): Q            100 m<sup>3</sup>/h =            0,02778 m<sup>3</sup>/s

Velocità dell'acqua all'interno della tubazione nel punto A e nel punto B:

|   |                        |
|---|------------------------|
| - sezione della tubazione nel punto A : Sa = 3,14 x Da <sup>2</sup> / 4 = | 0,00785 m <sup>2</sup> |
| - sezione della tubazione nel punto B : Sb = 3,14 x Db <sup>2</sup> / 4 = | 0,01766 m <sup>2</sup> |
| - velocità del fluido nel punto A : Va = Q / Sa =                         | 3,54 m/s               |
| - velocità del fluido nel punto B : Vb = Q / Sb =                         | 1,57 m/s               |

Teorema di Bernoulli :  $Z_a + Pa/(d \times g) + Va^2/2g = Z_b + Pb/(d \times g) + Vb^2/2g$

Poiché il primo tubo (innalzamento h1) non è inserito nella tubazione e l'acqua che entra non esercita l'effetto di pressione dinamica, l'altezza cinetica nel punto B non contribuisce all'innalzamento h1, che quindi è pari a Pb/dxg

$$h1 = Pb / (d \times g) = Z_a + Pa/(d \times g) + Va^2/2g - Z_b - Vb^2/2g = 6,09 \text{ m}$$

Poiché il secondo tubo (innalzamento h2) è inserito nella tubazione e l'acqua che entra esercita l'effetto di pressione dinamica, l'altezza cinetica nel punto B contribuisce all'innalzamento h2, che quindi è pari a:

$$h2 = Pb / (d \times g) + Vb^2/2g = Z_a + Pa/(d \times g) + Va^2/2g - Z_b = 6,22 \text{ m}$$

---

---

## SEZIONE 2 - SOLUZIONI

### Esercizio n. 2.7.

#### DATI

|  |    |   |                         |
|--|----|---|-------------------------|
| Diametro interno tubazione nel punto A : | Da | = | 80 mm                   |
| Diametro interno tubazione nel punto B : | Db | = | 100 mm                  |
| Pressione nel punto A :                  | Pa | = | 3,0 bar rel.            |
| Pressione nel punto B :                  | Pb | = | 2,0 bar rel.            |
| Portata d'acqua nella tubazione :        | Q  | = | 100 m <sup>3</sup> /h   |
| Massa specifica dell'acqua :             | d  | = | 1.000 kg/m <sup>3</sup> |

#### CALCOLI

Portata d'acqua nella tubazione (trasformo in m<sup>3</sup>/s):  $Q = 100 \text{ m}^3/\text{h} = 0,0278 \text{ m}^3/\text{s}$

Calcolo della velocità dell'acqua all'interno della tubazione nel punto A e nel punto B:

|   |                        |
|---|------------------------|
| - sezione della tubazione nel punto A : $S_a = 3,14 \times D_a^2 / 4 =$ | 0,00502 m <sup>2</sup> |
| - velocità del fluido nel punto A : $V_a = Q / S_a =$                   | 5,53 m/s               |
| - sezione della tubazione nel punto B : $S_b = 3,14 \times D_b^2 / 4 =$ | 0,00785 m <sup>2</sup> |
| - velocità del fluido nel punto B : $V_b = Q / S_b =$                   | 3,54 m/s               |

Teorema di Bernoulli:

$$H_a = H_b + DH \quad (DH = \text{perdita di carico fra A e B})$$

$$H_a = Z_a + P_a / (d \times g) + V_a^2 / 2g$$

$$H_b = Z_b + P_b / (d \times g) + V_b^2 / 2g$$

$$DH = H_a - H_b = Z_a + P_a / (d \times g) + V_a^2 / 2g - Z_b + P_b / (d \times g) + V_b^2 / 2g$$

$Z_a = Z_b$  per cui si elimina da entrambi i lati

$$\begin{aligned} DH &= (2 \times 100.000 / (1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2) + (3,54)^2 \text{ m}^2/\text{s}^2 / 2 \times 9,81 \text{ m/s}^2) + \\ &\quad - (3 \times 100000 \text{ N/m}^2 / (1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2) + (5,53)^2 \text{ m}^2/\text{s}^2 / 2 \times 9,81 \text{ m/s}^2) = \\ &= 11,1 \text{ m c.a.} \end{aligned}$$

---

## SEZIONE 2 - SOLUZIONI

### Esercizio n. 2.8.

#### DATI

|   |    |   |                          |
|---|----|---|--------------------------|
| Diametro interno tubazione nel punto A :    | Da | = | 50 mm                    |
| Diametro interno tubazione nel punto B :    | Db | = | 20 mm                    |
| Massa specifica del fluido nella tubazione: | d1 | = | 920 kg/m <sup>3</sup>    |
| Massa specifica del liquido manometrico:    | d2 | = | 13.590 kg/m <sup>3</sup> |
| Dislivello manometro (vedi figura) :        | h  | = | 40 cm =                  |
|   |    | = | 0,40 m                   |

#### a) CALCOLI CON IL TEOREMA DI BERNOULLI

Teorema di Bernoulli:  $Z_a + Pa/(d1 \times g) + Va^2/2g = Z_b + Pb/(d1 \times g) + Vb^2/2g$   
 $(Vb^2 - Va^2)/2g = (Z_a + Pa/(d1 \times g)) - (Z_b + Pb/(d1 \times g))$

la differenza fra i piani dei carichi idrostatici in A e B è

$$DH = (Z_a + Pa/(d1 \times g)) - (Z_b + Pb/(d1 \times g)) = h \times (d2 - d1) / d1 = \quad 5,51 \quad m$$

$$(Vb^2 - Va^2)/2g = DH = \quad 5,51 \quad m$$

$$(Vb^2 - Va^2) = 2g \times DH = \quad 108 \quad m^2/s^2$$

Velocità del fluido nei punti A e B :  $V_a = Q / S_a$   $V_b = Q / S_b$

Sezione tubazione nel punto A :  $S_a = 3,14 \times Da^2 / 4 = \quad 0,001963 \quad m^2$

Sezione tubazione nel punto B :  $S_b = 3,14 \times Db^2 / 4 = \quad 0,000314 \quad m^2$

$$(1/S_b^2 - 1/S_a^2) = (S_a^2 - S_b^2) / (S_a^2 \times S_b^2) = \quad 9.882.754 \quad m^{-4}$$

$$Q^2 = 2g \times DH / ((S_a^2 - S_b^2) / (S_a^2 \times S_b^2)) = \quad 0,00001094 \quad m^6/s^2$$

$Q = ##### \quad m^3/s = \quad 11,9052 \quad m^3/h$

Velocità nei punti A e B:  $V = Q / S = V_a \quad (m/s) \quad V_b \quad (m/s)$   
1,685 10,532

#### b) CALCOLI CON LE FORMULE DEL VENTURIMETRO

$$Q = \frac{S_a \times S_b}{\sqrt{S_a^2 - S_b^2}} \times \sqrt{\frac{\gamma_m - \gamma}{2g \times h}} \times \frac{\gamma}{\gamma} \quad 0,00331 \quad m^3/s = \quad 11,9052 \quad m^3/h$$

## SEZIONE 2 - SOLUZIONI

### Esercizio n. 2.9.

#### DATI

|  |      |       |                   |
|--|------|-------|-------------------|
| Z = quota terreno nei due punti :            | A    | 105   | m s.l.m.          |
|  | B    | 100   | m s.l.m.          |
| D = diametro interno tubazione nei due punti | A    | 50    | mm                |
|  | B    | 50    | mm                |
| La lunghezza della tubazione è:              | L =  | 200   | m                 |
| Un manometro misura la pressione nel punto   | Pa = | 3,0   | bar rel.          |
| E' nota la portata d'acqua nella tubazione:  | Q =  | 6,0   | m <sup>3</sup> /h |
| Massa specifica dell'acqua :                 | d =  | 1.000 | kg/m <sup>3</sup> |

Il moto è permanente. Si consideri l'acqua come un fluido reale con perdite di carico.

#### CALCOLI

Teorema di Bernoulli :  $Z_a + Pa/(d \times g) + Va^2/2g = Z_b + Pb/(d \times g) + Vb^2/2g + DH$

Da = Db per cui Va = Vb

DH = J x L dove la cadente J si legge dal diagramma, per DN 50 e per il valore di portata assegnato

Una volta calcolata la perdita di carico DH, dal teorema di Bernoulli si può ricavare:

$$Pb/(d \times g) = Za + Pa/(d \times g) - Zb - DH$$

|   |         |                       |
|---|---------|-----------------------|
| Pa va espressa in Pascal: Pa =                          | 300.000 | Pascal                |
| Q per entrare nel diagramma va espressa in litri/h: Q = | 6.000   | litri/h               |
| dal diagramma si legge J =                              | 12,0    | mm c.a. / m di tubaz. |
| DH = J x L =  | 2,40    | m c.a.                |
| Pb/(d x g) = Za + Pa/(d x g) - Zb - DH =                | 33,2    | m c.a.                |
| Pb =  | 325.506 | Pascal                |

## SEZIONE 3 - ESERCIZI

### Riferimento della dispensa: cap. B (Termologia)

#### Esercizio n. 3.1

Una barra di rame (coefficiente di dilatazione lineare  $a_1$ ) ed una barra di acciaio (coefficiente di dilatazione lineare  $a_2$ ) hanno la stessa lunghezza  $L$ , alla temperatura  $T_0$ .

Calcolare la temperatura alla quale è necessario portare entrambe le barre, perchè la loro differenza di lunghezza sia pari a  $DDL$ . Dire quale delle due barre ha lunghezza maggiore.

#### DATI

|  |       |   |               |
|--|-------|---|---------------|
| Coefficiente di dilatazione lineare del rame :     | $a_1$ | = | 0,017 mm/m °C |
| Coefficiente di dilatazione lineare dell'acciaio : | $a_2$ | = | 0,011 mm/m °C |
| Lunghezza delle barre :                            | $L$   | = | 2 m           |
| Temperatura iniziale :                             | $T_0$ | = | 20 °C         |
| Differenza di lunghezza finale delle barre         | $DDL$ | = | 3 mm          |

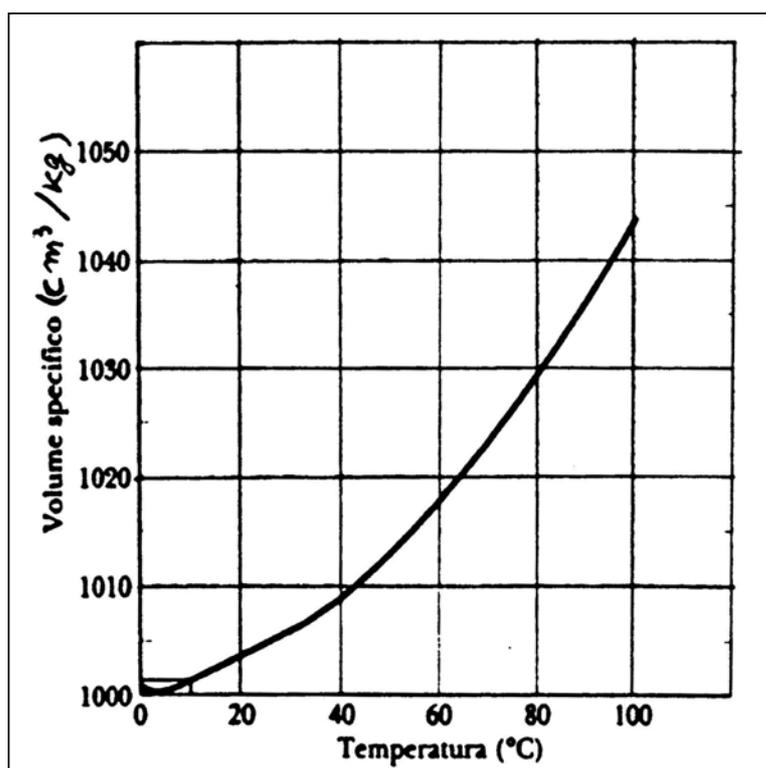
#### Esercizio n. 3.2

Una tubazione in acciaio (coefficiente di dilatazione lineare  $a$ ) è installata in uno stabilimento industriale, ha una lunghezza  $L_0$  ed un diametro  $D_0$ , quando la temperatura all'interno del capannone, a impianti fermi, è  $T_0$ . La tubazione normalmente trasporta acqua calda alla temperatura  $T$ .

Utilizzando il diagramma allegato, che fornisce il volume specifico dell'acqua al variare della temperatura, calcolare il volume minimo del vaso di espansione, necessario per assorbire la dilatazione dell'acqua.

#### DATI

|  |          |   |               |
|--|----------|---|---------------|
| Coefficiente di dilatazione lineare dell'acciaio : | $a$      | = | 0,011 mm/m °C |
|  | $\alpha$ | = | 0,000011 /°C  |
| Lunghezza tubazione in acciaio :                   | $L_0$    | = | 100 m         |
| Diametro della tubazione in acciaio :              | $D_0$    | = | 0,200 m       |
| Temperatura capannone :                            | $T_0$    | = | 5 °C          |
| Temperatura fluido trasportato :                   | $T$      | = | 70 °C         |



## SEZIONE 3 - ESERCIZI

### Esercizio n. 3.3

In uno stabilimento industriale, una tubazione per il trasporto di vapore è installata in un capannone per un tratto rettilineo  $L_0$ . La tubazione è in acciaio. La temperatura di normale funzionamento per il vapore è  $T$ ; la minima temperatura all'interno del capannone, a impianti fermi, è  $T_0$ . Calcolare quanti compensatori di dilatazione devono essere installati lungo la tubazione, se la dilatazione assorbita da un compensatore è  $DL_c$ .

#### DATI

|  |        |   |               |
|--|--------|---|---------------|
| Coefficiente di dilatazione lineare dell'acciaio : | a      | = | 0,011 mm/m °C |
| Lunghezza tubazione in acciaio :                   | $L_0$  | = | 100 m         |
| Temperatura esterna :                              | $T_0$  | = | 5 °C          |
| Temperatura fluido trasportato :                   | T      | = | 180 °C        |
| Dilatazione assorbita da un compensatore :         | $DL_c$ | = | 40 mm         |

## SEZIONE 3 - SOLUZIONI

### Riferimento della dispensa: cap. B (Termologia)

#### Esercizio n. 3.1

##### DATI

|  |     |   |               |
|--|-----|---|---------------|
| Coefficiente di dilatazione lineare del rame :     | a1  | = | 0,017 mm/m °C |
| Coefficiente di dilatazione lineare dell'acciaio : | a2  | = | 0,011 mm/m °C |
| Lunghezza delle barre :                            | L   | = | 2 m           |
| Temperatura iniziale :                             | To  | = | 20 °C         |
| Differenza di lunghezza finale delle barre         | DDL | = | 3 mm          |

Sono possibili due soluzioni:

A - con aumento di temperatura e lunghezza finale maggiore per la barra di rame

B - con diminuzione di temperatura e lunghezza finale maggiore per la barra di acciaio

Nota: la soluzione B è possibile solo se la temperatura finale è maggiore di 0 K

##### CALCOLI per il caso A

- allungamento barra di rame :  $DLR = L \times a1 \times (T - To) = 2 \text{ m} \times 0,017 \text{ mm/m } ^\circ\text{C} \times (T - 20) ^\circ\text{C}$

- allungamento barra di acciaio :  $DLA = L \times a2 \times (T - To) = 2 \text{ m} \times 0,011 \text{ mm/m } ^\circ\text{C} \times (T - 20) ^\circ\text{C}$

La temperatura T incognita da calcolare viene calcolata ponendo:

$$DLR = DLA + DDL$$

$$2 \text{ m} \times 0,017 \text{ mm/m } ^\circ\text{C} \times (T - 20) ^\circ\text{C} = 2 \text{ m} \times 0,011 \text{ mm/m } ^\circ\text{C} \times (T - 20) ^\circ\text{C} + 3 \text{ mm}$$

$$0,034 \text{ mm/}^\circ\text{C} \times (T - 20) ^\circ\text{C} = 0,022 \text{ mm/}^\circ\text{C} \times (T - 20) ^\circ\text{C} + 3 \text{ mm}$$

Risolvendo l'equazione si ricava il valore di T

Se si pone  $DLA = DLR + DDL$  si trova il risultato per il caso B

##### CALCOLI

- caso A            T = 270 °C

- caso B            T = - 230 °C = 43,15 K

#### Esercizio n. 3.2

##### DATI

|  |    |   |                               |
|--|----|---|-------------------------------|
| Coefficiente di dilatazione lineare dell'acciaio : | a  | = | 0,011 mm/m °C<br>0,000011 /°C |
| Lunghezza tubazione in acciaio :                   | Lo | = | 100 m                         |
| Diametro della tubazione in acciaio :              | Do | = | 0,200 m                       |
| Temperatura esterna :                              | To | = | 5 °C                          |
| Temperatura fluido trasportato :                   | T  | = | 70 °C                         |

##### CALCOLI

Alla temperatura esterna  $To = 5^\circ\text{C}$  la tubazione di acciaio ha una lunghezza

$Lo = 100 \text{ m}$  ed un diametro  $Do = 200 \text{ mm}$ , quindi il volume risulta pari a:

$$Vo = (3,14 \times Do^2 / 4) \times Lo = 3.140 \text{ litri}$$

Calcoliamo le dilatazioni della tubazione e la variazione di volume quando nella tubazione viene trasportata acqua calda alla temperatura  $T = 70^\circ\text{C}$ :

- dilatazione trasversale:

$$DD = D \times a \times (T - To) = 0,2 \text{ m} \times 0,011 \text{ mm/m } ^\circ\text{C} \times (70 - 5) ^\circ\text{C} = 0,1430 \text{ mm}$$

- dilatazione lineare:

$$DL = L \times a \times (T - To) = 100 \text{ m} \times 0,011 \text{ mm/m } ^\circ\text{C} \times (70 - 5) ^\circ\text{C} = 71,50 \text{ mm}$$

- volume alla temperatura T:

## SEZIONE 3 - SOLUZIONI

$$\begin{aligned} D &= D_o + DD = && 200,1430 \text{ mm} \\ L &= L_o + DL = && 100,0715 \text{ m} \\ V &= (3,14 \times D^2 / 4) \times L = && 3.146,74 \text{ litri} \\ - \text{ variazione volume tubazione: } DV_{acc} &= V - V_o = 3.146,74 - 3.140 = && 6,74 \text{ litri} \\ Dv_{acc} &\text{ si può calcolare anche da:} \\ Dv_{acc} &= 3a \times V_o \times (T - T_o) = 3 \times 0,00011 \times 3.140 \times (70 - 5) = && 6,74 \text{ litri} \end{aligned}$$

La variazione di volume dell'acqua si calcola ricavando dal diagramma allegato il volume specifico a 5°C ed a 70°C:

$$\begin{aligned} - \text{ volume specifico dell'acqua a } 5^\circ\text{C} : &&& vs_5 = && 1.000 \text{ cm}^3/\text{kg} \\ - \text{ volume specifico dell'acqua a } 70^\circ\text{C} : &&& vs_{70} = && 1.025 \text{ cm}^3/\text{kg} \\ - \text{ il volume dell'acqua varia in proporzione alla variazione del volume specifico e quindi si ottiene:} \\ V_{acqua} &= (V_o \times vs_{70}/vs_5) = (3.140 \times 1.025/1.000) = && 3.218,50 \text{ litri} \\ DV_{acqua} &= V - V_o = 3.218,50 - 3.140 = && 78,50 \text{ litri} \end{aligned}$$

Il volume minimo del vaso di espansione è pari a :

$$\begin{aligned} V_{vaso} &= Dv_{acqua} - DV_{acc} = && 71,76 \text{ litri} \\ \text{arrotondato a} &&& 80 \text{ litri} \end{aligned}$$

---

### Esercizio n. 3.3

#### DATI

$$\begin{aligned} \text{Coefficiente di dilatazione lineare dell'acciaio :} &&& a = && 0,011 \text{ mm/m } ^\circ\text{C} \\ \text{Lunghezza tubazione in acciaio :} &&& L_o = && 100 \text{ m} \\ \text{Temperatura esterna :} &&& T_o = && 5 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \text{Temperatura fluido trasportato :} &&& T = && 180 \text{ } ^\circ\text{C} \\ \text{Dilatazione assorbita da un compensatore :} &&& DL_c = && 40 \text{ mm} \end{aligned}$$

#### CALCOLI

Dilatazione della tubazione quando nella tubazione viene trasportato vapore alla temperatura  $T = 180^\circ\text{C}$ :

$$DL = a \times L_o \times (T - T_o) = (0,011/1000) \text{ m/m } ^\circ\text{C} \times 100 \text{ m} \times (180 - 5)^\circ\text{C} = 0,193 \text{ m}$$

$$\text{Num compensatori} = DL / DL_c = (0,193 \times 1000) \text{ mm} / 40 \text{ mm} = 4,81 \text{ compensatori}$$

Sono necessari quindi n. 5 compensatori

## SEZIONE 4 - ESERCIZI

**Riferimenti dispensa: cap. C (Calore e lavoro / Primo principio)  
cap. D (Leggi dei gas / Calori specifici) - cap. E (Applicaz. primo principio)  
cap. F (Secondo principio) - cap. G (Ciclo di Carnot)**

---

### Esercizio n. 4.1

Una macchina motrice è basata su un ciclo termodinamico sviluppato su un sistema termodinamico chiuso (massa  $M$  di aria, gas biatomico, con massa molare  $MM$ ), basato sulle seguenti trasformazioni:

- raffreddamento isobaro, a partire dal punto 1 ( $p_1$ ;  $T_1$ ), sino al punto 2 (a temp.  $T_2$ );
- riscaldamento isocoro, sino al punto 3 (a temp.  $T_3$ );
- espansione isoterma, sino al punto 4, definito in base a quanto sotto riportato;
- espansione adiabatica sino al punto 1 iniziale.

Si consideri l'aria come un gas ideale.

Calcolare:

- a) pressione, volume e temperatura del gas in tutti i punti (tabella e disegnare ciclo nel piano P-V);
- b) lavoro, calore, variazione di energia interna e di entropia in tutte le trasformazioni del ciclo (tabella);
- c) il lavoro sviluppato dal gas nel ciclo;
- d) il calore assorbito dal gas ad alta temperatura;
- e) il rendimento del ciclo motore;
- f) il rendimento del ciclo di Carnot che lavori fra le stesse temperature estreme.

#### DATI

|              |         |            |
|--------------|---------|------------|
| massa        | $m =$   | 0,100 kg   |
| massa molare | $MM =$  | 29 kg/kmol |
| temperatura  | $T_1 =$ | 400 °C     |
| pressione    | $p_1 =$ | 2,0 bar    |
| temperatura  | $T_2 =$ | 20 °C      |
| temperatura  | $T_3 =$ | 600 °C     |
| temperatura  | $T_4 =$ | $T_3$      |

---

### Esercizio n. 4.2

Una macchina motrice è basata su un ciclo termodinamico sviluppato su un sistema termodinamico chiuso, costituito da una massa  $M$  di aria (gas biatomico, con massa molare  $MM$ ) e caratterizzato dalle seguenti trasformazioni:

- raffreddamento isocoro, a partire dal punto 1 ( $V_1$ ;  $T_1$ ), sino al punto 2 (a temp.  $T_2$ );
- raffreddamento isobaro, sino al punto 3 (a temp.  $T_3$ );
- compressione adiabatica, sino al punto 4, tale per cui  $T_4=T_1$ ;
- espansione isoterma sino al punto 1 iniziale.

Si consideri l'aria come un gas ideale.

Calcolare:

- a) pressione, volume e temperatura del gas in tutti i punti (tabella e disegnare ciclo nel piano P-V);
- b) lavoro, calore, variazione di energia interna e di entropia in tutte le trasformazioni del ciclo (tabella);
- c) il lavoro sviluppato dal gas nel ciclo;
- d) il calore assorbito dal gas ad alta temperatura;
- e) il rendimento del ciclo motore;
- f) il rendimento del ciclo di Carnot che lavori fra le stesse temperature estreme.

#### DATI

|              |         |                      |
|--------------|---------|----------------------|
| massa        | $M =$   | 0,300 kg             |
| massa molare | $MM =$  | 29 kg/kmol           |
| temperatura  | $T_1 =$ | 400 °C               |
| volume       | $V_1 =$ | 0,100 m <sup>3</sup> |
| temperatura  | $T_2 =$ | 80 °C                |
| temperatura  | $T_3 =$ | 10 °C                |
| temperatura  | $T_4 =$ | 400 °C               |

## SEZIONE 4 - ESERCIZI

### Esercizio n. 4.3

Una macchina motrice è basata su un ciclo termodinamico sviluppato su un sistema termodinamico chiuso, costituito da una massa di  $M$  di aria (gas biatomico, con massa molare  $MM$ ) e caratterizzato dalle seguenti trasformazioni:

- raffreddamento isobaro, a partire dal punto 1 ( $p_1$ ;  $T_1$ ), sino al punto 2 (a temp.  $T_2$ );
- riscaldamento isocoro, sino al punto 3, definito in base a quanto sotto riportato;
- espansione adiabatica, sino al punto 1 iniziale.

Si consideri l'aria come un gas ideale.

Calcolare:

- a) pressione, volume e temperatura del gas in tutti i punti (tabella e disegnare ciclo nel piano P-V);
- b) lavoro, calore, variazione di energia interna e di entropia in tutte le trasformazioni del ciclo (tabella);
- c) il lavoro sviluppato dal gas nel ciclo;
- d) il calore assorbito dal gas ad alta temperatura;
- e) il rendimento del ciclo motore;
- f) il rendimento del ciclo di Carnot che lavori fra le stesse temperature estreme.

#### DATI

|              |      |            |
|--------------|------|------------|
| massa        | M =  | 1,000 kg   |
| massa molare | MM = | 29 kg/kmol |
| temperatura  | T1 = | 327 °C     |
| pressione    | p1 = | 1 bar      |
| temperatura  | T2 = | 27 °C      |

---

### Esercizio n. 4.4

Una macchina motrice è basata su un ciclo termodinamico sviluppato su un sistema termodinamico chiuso, costituito da una massa  $M$  di aria (gas biatomico, con massa molare  $MM$ ) e caratterizzato dalle seguenti trasformazioni:

- espansione isoterma, a partire dal punto 1 ( $p_1$ ;  $T_1$ ), sino al punto 2 (a press.  $p_2$ );
- espansione adiabatica, sino al punto 3 (a temp.  $T_3$ );
- raffreddamento isocoro, sino al punto 4, definito in base a quanto sotto riportato;
- compressione adiabatica, sino al punto 1 iniziale.

Si consideri l'aria come un gas ideale.

Calcolare:

- a) pressione, volume e temperatura del gas in tutti i punti (tabella e disegnare ciclo nel piano P-V);
- b) lavoro, calore, variazione di energia interna e di entropia in tutte le trasformazioni del ciclo (tabella);
- c) il lavoro sviluppato dal gas nel ciclo;
- d) il calore assorbito dal gas ad alta temperatura;
- e) il rendimento del ciclo motore;
- f) il rendimento del ciclo di Carnot che lavori fra le stesse temperature estreme.

#### DATI

|              |      |            |
|--------------|------|------------|
| massa        | M =  | 2,000 kg   |
| massa molare | MM = | 29 kg/kmol |
| temperatura  | T1 = | 527 °C     |
| pressione    | p1 = | 15,0 bar   |
| pressione    | p2 = | 5,0 bar    |
| temperatura  | T3 = | 327 °C     |

---

## SEZIONE 4 - ESERCIZI

### Esercizio n. 4.5

Una macchina motrice è basata su un ciclo termodinamico sviluppato su una massa  $M$  di aria (gas biatomico, con massa molare  $MM$ ) e caratterizzato dalle seguenti trasformazioni:

- compressione isoterma, a partire dal punto 1 ( $p_1$ ;  $T_1$ ), sino al punto 2 ( $p_2$ );
- riscaldamento isobaro, a partire dal punto 2 (a press.  $p_2$ ) sino al punto 3, tale per cui  $V_3=V_1$ ;
- raffreddamento isocoro, sino al punto 1 iniziale.

Si consideri l'aria come un gas ideale.

Calcolare:

- a) pressione, volume e temperatura del gas in tutti i punti (tabella e disegnare ciclo nel piano P-V);
- b) lavoro, calore, variazione di energia interna e di entropia in tutte le trasformazioni del ciclo (tabella);
- c) il lavoro sviluppato dal gas nel ciclo;
- d) il calore assorbito dal gas ad alta temperatura;
- e) il rendimento del ciclo motore;
- f) il rendimento del ciclo di Carnot che lavori fra le stesse temperature estreme.

#### DATI

|              |      |            |
|--------------|------|------------|
| massa        | M =  | 10,000 kg  |
| massa molare | MM = | 29 kg/kmol |
| temperatura  | T1 = | 27 °C      |
| pressione    | p1 = | 1 bar      |
| pressione    | p2 = | 4 bar      |
| volume       | V3 = | V1         |

---

### Esercizio n. 4.6

Una macchina motrice è basata su un ciclo di Carnot, che viene sviluppato su una massa  $M$  di aria (gas biatomico, con massa molare  $MM$ ), ed è caratterizzato da:

- pressione massima:  $p_1$
- pressione minima:  $p_3$
- temperatura massima:  $T_1$
- temperatura minima:  $T_3$

Il motore compie  $F$  cicli/secondo e funziona per un tempo  $t$ .

L'energia meccanica prodotta viene tutta convertita in energia elettrica, senza perdite. Il prezzo dell'energia elettrica prodotta è  $C$ . Si consideri l'aria come un gas ideale.

Calcolare:

- a) pressione, volume e temperatura del gas in tutti i punti (tabella e disegnare ciclo nel piano P-V);
- b) il rendimento del ciclo motore;
- c) il lavoro sviluppato dal gas nel ciclo;
- d) il calore assorbito dal gas ad alta temperatura;
- e) la potenza elettrica generata;
- f) il prezzo complessivo dell'energia elettrica prodotta dal motore che ha funzionato per il tempo  $t$ .

#### DATI

|                          |      |               |
|--------------------------|------|---------------|
| Massa di aria            | M =  | 0,200 kg      |
| Massa molare dell'aria   | MM = | 29,0 kg/kmol  |
| $C_v = 5 / 2 \times R$   | =    | 20,79 kJ/kmol |
| Pressione massima        | p1 = | 80 bar        |
| Pressione minima         | p3 = | 1 bar         |
| Temperatura massima      | T1 = | 300 °C        |
| Temperatura minima       | T3 = | 10 °C         |
| Frequenza cicli          | F =  | 200 Hertz     |
| Periodo di funzionamento | t =  | 10 h          |
| Costo unitario en. el.   | C =  | 0,10 Euro/kWh |

---

## SEZIONE 4 - ESERCIZI

### Esercizio n. 4.7

Una macchina frigorifera è basata su un ciclo di Carnot, percorso in senso inverso, che viene sviluppato su una massa  $M1$  di aria (gas biatomico), ed è caratterizzato da:

- pressione massima:  $p1$
- pressione minima:  $p3$
- temperatura massima:  $T1$
- temperatura minima:  $T3$

Il frigorifero viene azionato da energia elettrica, che ha un prezzo  $C$ . Viene utilizzato per raffreddare una massa  $M2$  di acqua, fino alla temperatura finale  $Tf$ , partendo dalla temperatura iniziale  $Ti$ . Si consideri l'aria come un gas ideale.

Calcolare:

- a) pressione, volume e temperatura del gas in tutti i punti (tabella e disegnare ciclo nel piano P-V);
- b) il COP del ciclo frigorifero;
- c) il lavoro assorbito dal gas nel ciclo;
- d) il calore assorbito dal gas a bassa temperatura;
- e) il costo complessivo energia elettrica assorbita dal frigorifero per raffreddare l'acqua, come sopra descritto;
- f) la variazione di entropia del gas nell'espansione adiabatica.

#### DATI

|                            |        |                |
|----------------------------|--------|----------------|
| Massa di aria              | $M1 =$ | 1,0 kg         |
| Massa molare dell'aria     | $MM =$ | 29,0 kg/kmol   |
| $Cv = 5 / 2 \times R$      | $=$    | 20,79 kJ/kmol  |
| Pressione massima          | $p1 =$ | 3,00 bar       |
| Pressione minima           | $p3 =$ | 1,00 bar       |
| Temperatura massima        | $T1 =$ | 50 °C          |
| Temperatura minima         | $T3 =$ | 1 °C           |
| Massa di acqua             | $M2 =$ | 1.000 kg       |
| Temperatura iniziale acqua | $Ti =$ | 50 °C          |
| Temperatura finale acqua   | $Tf =$ | 15 °C          |
| Calore specifica acqua     | $c =$  | 4,186 kJ/kg °C |
| Costo unitario en. el.     | $C =$  | 0,10 Euro/kWh  |

---

### Esercizio n. 4.8

Una macchina frigorifera è basata su un ciclo termodinamico, ripetuto alla frequenza  $F$ . La macchina è azionata da energia elettrica (che ha un costo  $Ce$ ), ha un COP ed assorbe un'energia elettrica  $L$  per ogni ciclo. La macchina funziona il tempo necessario per produrre energia frigorifera  $QL_{tot}$ .

Calcolare:

- a. la potenza frigorifera della macchina;
- b. il costo complessivo dell'energia elettrica assorbita dal frigorifero.

#### DATI

|                                 |              |                     |
|---------------------------------|--------------|---------------------|
| frequenza ciclo                 | $F =$        | 100 cicli/s (Hertz) |
| COP                             | $COP =$      | 3                   |
| lavoro per ciclo                | $L =$        | 100 Joule/ciclo     |
| energia frigorifera da produrre | $QL_{tot} =$ | 5.000.000 kJ        |
| costo energia elettrica         | $Ce =$       | 0,10 Euro/kWh       |

---

## SEZIONE 4 - ESERCIZI

### Esercizio n. 4.9

Una macchina motrice è basata su un ciclo di Carnot, caratterizzato da:

- temperatura massima:  $T_{max}$
- temperatura minima:  $T_{min}$

Il ciclo viene ripetuto alla frequenza  $F$  e l'energia meccanica prodotta viene tutta convertita in energia elettrica, senza perdite. Il prezzo dell'energia elettrica prodotta è  $C_e$ .

Il calore assorbito ad alta temperatura è  $Q_h$ .

Il motore funziona per il tempo  $t$ .

Calcolare:

- a. la potenza elettrica prodotta;
- b. il valore complessivo dell'energia elettrica prodotta.

#### DATI

|                                      |             |                    |
|--------------------------------------|-------------|--------------------|
| frequenza ciclo                      | $F =$       | 30 cicli/s (Hertz) |
| temperatura massima                  | $T_{max} =$ | 900 °C             |
| temperatura minima                   | $T_{min} =$ | 20 °C              |
| calore assorbito ad alta temperatura | $Q_h =$     | 150 J / ciclo      |
| costo energia elettrica              | $C_e =$     | 0,10 Euro/kWh      |
| tempo                                | $t =$       | 5 ore              |

---

### Esercizio n. 4.10

Una macchina frigorifera è basata su un ciclo termodinamico, che ha un COP ed assorbe un lavoro  $L_{ciclo}$ . La macchina funziona per un tempo  $T$  e produce un'energia frigorifera  $E_f$ .

Calcolare :

- a. la potenza frigorifera della macchina;
- b. il numero di cicli al secondo effettuati dalla macchina.

#### DATI

|                            |  |              |
|----------------------------|--|--------------|
| COP                        |  | 4,5          |
| L ciclo                    |  | 120 kJ/ciclo |
| E frigorifera totale $E_f$ |  | 6.000.000 kJ |
| T (tempo funzionamento)    |  | 4 h          |

---

### Esercizio n. 4.11

Una macchina frigorifera è basata su un ciclo termodinamico, che preleva a bassa temperatura l'energia termica  $Q_L$  e riversa ad alta temperatura l'energia termica  $Q_H$ . La macchina ha una frequenza  $F$ .

Calcolare :

- a. la potenza frigorifera della macchina;
- b. il COP del ciclo.

#### DATI

|  |  |                       |
|--|--|-----------------------|
| calore prelevato a bassa temperatura $Q_L =$ |  | 100 kJ/ciclo          |
| calore fornito ad alta temperatura $Q_H =$   |  | 130 kJ/ciclo          |
| frequenza $F =$                              |  | 10 Hz (cicli/secondo) |

---

### Esercizio n. 4.12

Una massa  $m_1$  di acqua alla temperatura  $T_1$  viene miscelata con una massa  $m_2$  di acqua che ha una temperatura  $T_2$ .

Calcolare:

- a. la temperatura della miscela
- b. la variazione totale di entropia dell'universo.

#### DATI

|                                     |         |                |         |       |
|-------------------------------------|---------|----------------|---------|-------|
| Massa / temperatura acqua 1         | $m_1 =$ | 10 kg          | $T_1 =$ | 20 °C |
| Massa / temperatura acqua 2         | $m_2 =$ | 40 kg          | $T_2 =$ | 70 °C |
| Calore specifico dell'acqua liquida | $c =$   | 4,186 kJ/kg °C |         |       |

## SEZIONE 4 - ESERCIZI

### Esercizio n. 4.13

Una macchina motrice è basata su un ciclo Otto, che viene sviluppato su una massa  $m$  di aria (gas biatomico, con massa molare  $MM$ , sistema chiuso) ed è caratterizzato dalle seguenti trasformazioni:

- compressione adiabatica, a partire dal punto 1 ( $p_1$ ;  $T_1$ ), sino al punto 2 (a volume  $V_2$ );
- riscaldamento isocoro, sino al punto 3 (a temperatura  $T_3$ );
- espansione adiabatica, sino al punto 4, definito in base a quanto sotto riportato;
- raffreddamento isocoro sino al punto 1 iniziale.

Disegnare il ciclo nel piano  $p$ - $V$  e calcolare:

- a. pressione, volume e temperatura del gas in tutti i punti (tabella e disegnare ciclo nel piano  $P$ - $V$ );
- b. calore, lavoro, variazione di energia interna e di entropia del gas in tutte le trasformazioni (tabella);
- c. il lavoro sviluppato dal gas nel ciclo
- d. il calore assorbito dal gas ad alta temperatura
- e. il rendimento del ciclo motore

#### DATI

|                   |         |                      |
|-------------------|---------|----------------------|
| massa             | $m =$   | 0,055 kg             |
| massa molare      | $MM =$  | 29,5 kg/kmol         |
| pressione $p_1$   | $p_1 =$ | 1,0 bar              |
| temperatura $T_1$ | $T_1 =$ | 10 °C                |
| volume $V_2$      | $V_2 =$ | 0,007 m <sup>3</sup> |
| temperatura $T_3$ | $T_3 =$ | 1.050 °C             |

---

### Esercizio n. 4.14

Una macchina motrice è basata su un ciclo di Carnot, che viene sviluppato su una massa  $M$  di aria (gas biatomico, con massa molare  $MM$ ), ed è caratterizzato da:

- pressione massima:  $p_1$
- pressione minima:  $p_3$
- temperatura massima:  $T_1$
- temperatura minima:  $T_3$

Disegnare il ciclo nel piano  $p$ - $V$  e calcolare:

- a) pressione, volume e temperatura del gas in tutti i punti del ciclo (compilare tabella)
- b) il rendimento del ciclo motore;
- c) il lavoro sviluppato dal gas nel ciclo;
- d) il calore assorbito dal gas ad alta temperatura;
- e) calore, lavoro e variazione di energia interna del gas in tutte le trasformazioni del ciclo (compilare tabella).

#### DATI

|                                 |         |                      |
|---------------------------------|---------|----------------------|
| Massa di aria                   | $m =$   | 1,40 kg              |
| Massa molare dell'aria          | $MM =$  | 29,0 kg/kmol         |
| Volume minimo del ciclo $V_1 =$ | $V_1 =$ | 0,050 m <sup>3</sup> |
| Temperatura massima del ciclo   | $T_1 =$ | 500 °C               |
| Volume massimo del ciclo        | $V_3 =$ | 3,000 m <sup>3</sup> |
| Temperatura minima del ciclo    | $T_3 =$ | 10 °C                |

---

## SEZIONE 4 - ESERCIZI

### Esercizio n. 4.15

Una macchina motrice è basata su un ciclo di Carnot, che viene sviluppato su una massa  $M$  di aria (gas biatomico, con massa molare  $MM$ ), ed è caratterizzato da:

- pressione massima:  $p_1$
- pressione minima:  $p_3$
- volume massimo:  $V_3$
- volume minimo:  $V_1$

Il motore compie  $F$  cicli/secondo e funziona per un tempo  $t$ .

L'energia meccanica prodotta viene tutta convertita in energia elettrica, senza perdite. Il prezzo dell'energia elettrica prodotta è  $C$ . Si consideri l'aria come un gas ideale.

Calcolare:

- a) pressione, volume e temperatura del gas in tutti i punti (tabella e disegnare ciclo nel piano P-V);
- b) il rendimento del ciclo motore;
- c) il lavoro sviluppato dal gas nel ciclo;
- d) il calore assorbito dal gas ad alta temperatura;
- e) la potenza elettrica generata;
- f) il prezzo complessivo dell'energia elettrica prodotta dal motore che ha funzionato per il tempo  $t$ .

#### DATI

|                          |         |                      |
|--------------------------|---------|----------------------|
| Massa di aria            | $m =$   | 0,200 kg             |
| Massa molare dell'aria   | $MM =$  | 29,0 kg/kmol         |
| $C_v = 5 / 2 \times R$   | $=$     | 20,79 kJ/kmol        |
| Pressione massima        | $p_1 =$ | 150,0 bar            |
| Pressione minima         | $p_3 =$ | 1,2 bar              |
| Volume massimo           | $V_3 =$ | 0,180 m <sup>3</sup> |
| Volume minimo            | $V_1 =$ | 0,004 m <sup>3</sup> |
| Frequenza cicli          | $F =$   | 200 Hertz            |
| Periodo di funzionamento | $t =$   | 15 h                 |
| Costo unitario en. el.   | $C =$   | 0,10 Euro/kWh        |

---

## SEZIONE 4 - SOLUZIONI

### Esercizio n. 4.1

#### DATI

|              |      |            |            |
|--------------|------|------------|------------|
| massa        | m =  | 0,100 kg   |            |
| massa molare | MM = | 29 kg/kmol |            |
| temperatura  | T1 = | 400 °C =   | 673 K      |
| pressione    | p1 = | 2,0 bar =  | 200.000 Pa |
| temperatura  | T2 = | 20 °C =    | 293 K      |
| temperatura  | T3 = | 600 °C =   | 873 K      |
| temperatura  | T4 = | T3         |            |

#### CALCOLI

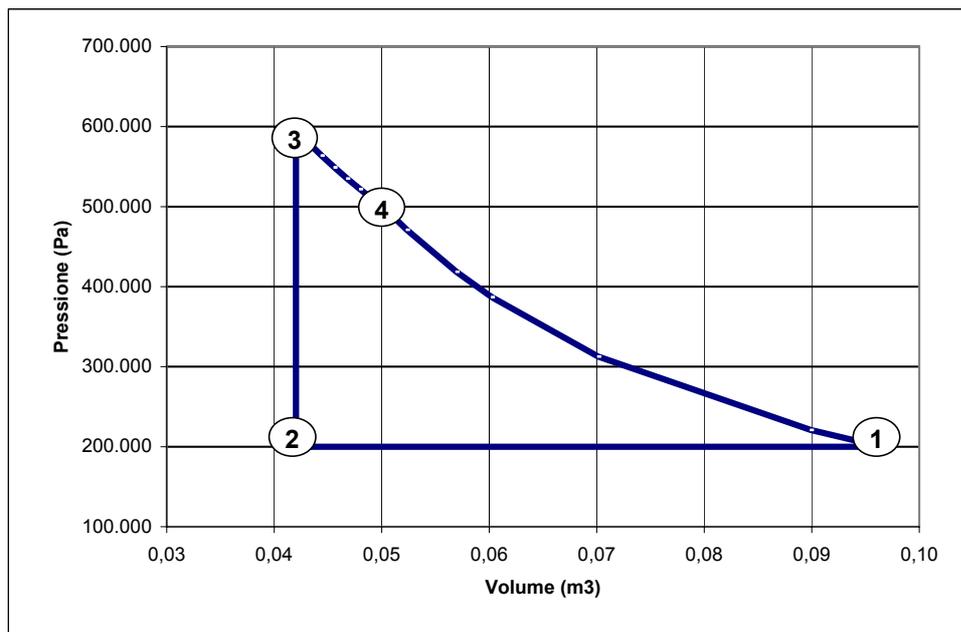
|                             |                |          |
|-----------------------------|----------------|----------|
| numero di moli n = m / MM = | 0,00345 kmol = | 3,45 mol |
| esponente dell'adiabatica   | k =            | 1,40     |

#### calcolo punti del ciclo

|  |                           |
|--|---------------------------|
| volume V1 = n R T1 / p1 =                      | 0,0965 m3                 |
| volume V2 = V1 x T2 / T1 =                     | 0,0420 m3                 |
| p2 = p1  | 2,0 bar = 200.000 Pa      |
| pressione p3 = p2 x T3/T2 =                    | 595.702 Pascal = 5,96 bar |
| V3 = V2 =                                      | 0,0420 m3                 |
| T4=T3 =  | 600 °C = 873 K            |
| 4-1 adiabatica $T V^{(k-1)} = \text{costante}$ |                           |
| volume V4 = V1x (T1/T4)^(1/(k-1)) =            | 0,0504 m3                 |
| pressione p4 = n R T4 / V4 =                   | 497.107 Pascal = 4,97 bar |

#### Riepilogo punti del ciclo

|         | p (Pascal) | V (m3) | T (°C) | T (K) |
|---------|------------|--------|--------|-------|
| punto 1 | 200.000    | 0,0965 | 400    | 673   |
| punto 2 | 200.000    | 0,0420 | 20     | 293   |
| punto 3 | 595.702    | 0,0420 | 600    | 873   |
| punto 4 | 497.107    | 0,0504 | 600    | 873   |



## SEZIONE 4 - SOLUZIONI

### calcolo lavoro - calore - DE - DS

|  |                |                            |
|--|----------------|----------------------------|
| $C_v = 5/2 R =$                            | 20,8 J/mol K   |                            |
| $C_p = 7/2 R =$                            | 29,1 J/mol K   |                            |
| $L_{12} = -p_1 \times (V_2 - V_1) =$       | 10.895 Joule   |                            |
| $Q_{12} = n C_p (T_2 - T_1) =$             | -38.132 Joule  |                            |
| $DE_{12} = L_{12} + Q_{12} =$              | -27.237 Joule  | $n C_v \Delta T =$ -27.251 |
| $DS_{12} = n C_p \ln(T_2/T_1) =$           | -83,42 Joule/K |                            |
| $L_{23} = 0$ perché $V =$ costante         | 0 Joule        |                            |
| $Q_{23} = n C_v (T_3 - T_2) =$             | 41.573 Joule   |                            |
| $DE_{23} = L_{23} + Q_{23} =$              | 41.573 Joule   |                            |
| $DS_{23} = n C_v \ln(T_3/T_2) =$           | 78,23 Joule/K  |                            |
| $L_{34} = -n R T_3 \ln(V_4/V_3) =$         | -4.530 Joule   |                            |
| $Q_{34} = -L_{34}$ (perché $DE_{34}=0$ )   | 4.530 Joule    |                            |
| $DE_{34}=0$ perché $T =$ costante          | 0 Joule        |                            |
| $DS_{34} = Q_{34} / T$ ( $T =$ costante) = | 5,19 Joule/K   |                            |
| $L_{41} = DE_{41} = n C_v (T_1 - T_4) =$   | -14.335 Joule  |                            |
| $Q_{41} = 0$ (adiabatica)                  | 0 Joule        |                            |
| $DE_{41} =$                                | -14.335 Joule  |                            |
| $DS_{41} = 0$ (adiabatica)                 | 0 Joule/K      |                            |

### Riepilogo Q / L / DE / DS

| valori in J  | Q            | L             | DE       | DS       |
|--------------|--------------|---------------|----------|----------|
| trasf. 1-2   | -38.132      | 10.895        | -27.237  | -83,42   |
| trasf. 2-3   | 41.573       | 0             | 41.573   | 78,23    |
| trasf. 3-4   | 4.530        | -4.530        | 0        | 5,19     |
| trasf. 4-1   | 0            | -14.335       | -14.335  | 0,00     |
| <b>ciclo</b> | <b>7.970</b> | <b>-7.970</b> | <b>0</b> | <b>0</b> |

|  |              |
|--|--------------|
| calore assorbito ad alta temp. $Q_h = Q_{23} + Q_{34} =$ | 46.102 Joule |
| rendimento del ciclo $\eta = L/Q_h =$                    | 0,173        |
| rendimento ciclo di Carnot:                              |              |
| $\eta_C = 1 - T_{min}/T_{max} = 1 - T_2/T_3 =$           | 0,664        |

### Esercizio n. 4.2

#### DATI

|              |         |                      |       |
|--------------|---------|----------------------|-------|
| massa        | $M =$   | 0,300 kg             |       |
| massa molare | $MM =$  | 29 kg/kmol           |       |
| temperatura  | $T_1 =$ | 400 °C =             | 673 K |
| volume       | $V_1 =$ | 0,100 m <sup>3</sup> |       |
| temperatura  | $T_2 =$ | 80 °C =              | 353 K |
| temperatura  | $T_3 =$ | 10 °C =              | 283 K |
| temperatura  | $T_4 =$ | 400 °C =             | 673 K |

#### CALCOLI

|                               |                |           |
|-------------------------------|----------------|-----------|
| numero di moli $n = M / MM =$ | 0,01034 kmol = | 10,34 mol |
| esponente adiabatica $k =$    | 1,40           |           |

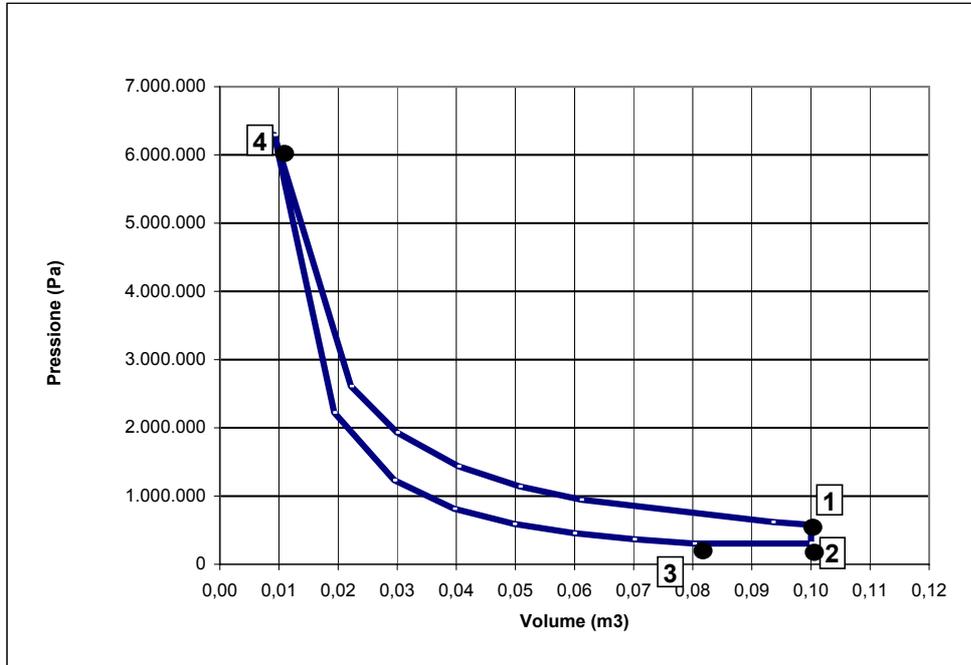
#### calcolo punti del ciclo

|  |                        |           |
|--|------------------------|-----------|
| pressione $p_1 = n R T_1 / V_1 =$                  | 578.990 Pascal =       | 5,79 bar  |
| pressione $p_2 = p_1 * T_2 / T_1 =$                | 303.752 Pascal =       | 3,04 bar  |
| $V_2 = V_1$  |                        |           |
| volume $V_3 = V_2 \times T_3 / T_2 =$              | 0,0802 m <sup>3</sup>  |           |
| $p_3 = p_2$  |                        |           |
| pressione $p_4 = p_3 \times (T_4/T_3)^{k/(k-1)} =$ | 6.292.918 Pascal =     | 62,93 bar |
| dove $k = C_p/C_v = 7/5$ perché biatomico          |                        |           |
| volume $V_4 = n R T_4 / p_4 =$                     | 0,00920 m <sup>3</sup> |           |

## SEZIONE 4 - SOLUZIONI

### Riepilogo punti del ciclo

|         | p (Pascal) | V (m3)  | T (°C) | T (K) |
|---------|------------|---------|--------|-------|
| punto 1 | 578.990    | 0,10000 | 400    | 673   |
| punto 2 | 303.752    | 0,10000 | 80     | 353   |
| punto 3 | 303.752    | 0,08018 | 10     | 283   |
| punto 4 | 6.292.918  | 0,00920 | 400    | 673   |



### calcolo lavoro - calore - DE - DS

|  |                 |
|--|-----------------|
| $C_v = 5/2 R =$                            | 20,8 J/mol K    |
| $C_p = 7/2 R =$                            | 29,1 J/mol K    |
| $L_{12} = 0$ perché $V = \text{costante}$  | 0 Joule         |
| $Q_{12} = n C_v (T_2 - T_1) =$             | -68.810 Joule   |
| $DE_{12} = L_{12} + Q_{12} =$              | -68.810 Joule   |
| $DS_{12} = n C_v \ln(T_2/T_1) =$           | -138,71 Joule/K |
| $L_{23} = -p_2 \times (V_3 - V_2) =$       | 6.021 Joule     |
| $Q_{23} = n C_p (T_3 - T_2) =$             | -21.073 Joule   |
| $DE_{23} = L_{23} + Q_{23} =$              | -15.052 Joule   |
| $DS_{23} = n C_p \ln(T_3/T_2) =$           | -66,51 Joule/K  |
| $L_{34} = DE_{34} = n C_v (T_4 - T_3) =$   | 83.862 Joule    |
| $Q_{34} = 0$ (adiabatica)                  | 0 Joule         |
| $DE_{34} = L_{34} + Q_{34} =$              | 83.862 Joule    |
| $DS_{34} = 0$ (adiabatica)                 | 0 Joule/K       |
| $L_{41} = -n R T_4 \ln(V_1/V_4) =$         | -138.141 Joule  |
| $Q_{41} = -L_{41}$ (perché $DE_{41} = 0$ ) | 138.141 Joule   |
| $DE_{41} = 0$ perché $T = \text{costante}$ | 0 Joule         |
| $DS_{41} = Q_{41}/T =$                     | 205,22 Joule/K  |

### Riepilogo Q / L / DE / DS

| valori in J  | Q             | L              | DE       | DS       |
|--------------|---------------|----------------|----------|----------|
| trasf. 1-2   | -68.810       | 0              | -68.810  | -138,71  |
| trasf. 2-3   | -21.073       | 6.021          | -15.052  | -66,51   |
| trasf. 3-4   | 0             | 83.862         | 83.862   | 0        |
| trasf. 4-1   | 138.141       | -138.141       | 0        | 205,22   |
| <b>ciclo</b> | <b>48.258</b> | <b>-48.258</b> | <b>0</b> | <b>0</b> |

|  |               |
|--|---------------|
| $Q_h = \text{calore assorbito ad alta temperatura} = Q_{41} =$ | 138.141 Joule |
| $\text{rendimento del ciclo } \eta = L/Q_h =$                  | 0,349         |
| $\text{rendimento ciclo di Carnot:}$                           |               |
| $\eta_{cC} = 1 - T_{\min}/T_{\max} = 1 - T_3/T_1 =$            | 0,579         |

## SEZIONE 4 - SOLUZIONI

### Esercizio n. 4.3

#### DATI

|              |      |            |            |
|--------------|------|------------|------------|
| massa        | m =  | 1,000 kg   |            |
| massa molare | MM = | 29 kg/kmol |            |
| temperatura  | T1 = | 327 °C =   | 600 K      |
| pressione    | p1 = | 1 bar =    | 100.000 Pa |
| temperatura  | T2 = | 27 °C =    | 300 K      |

#### CALCOLI

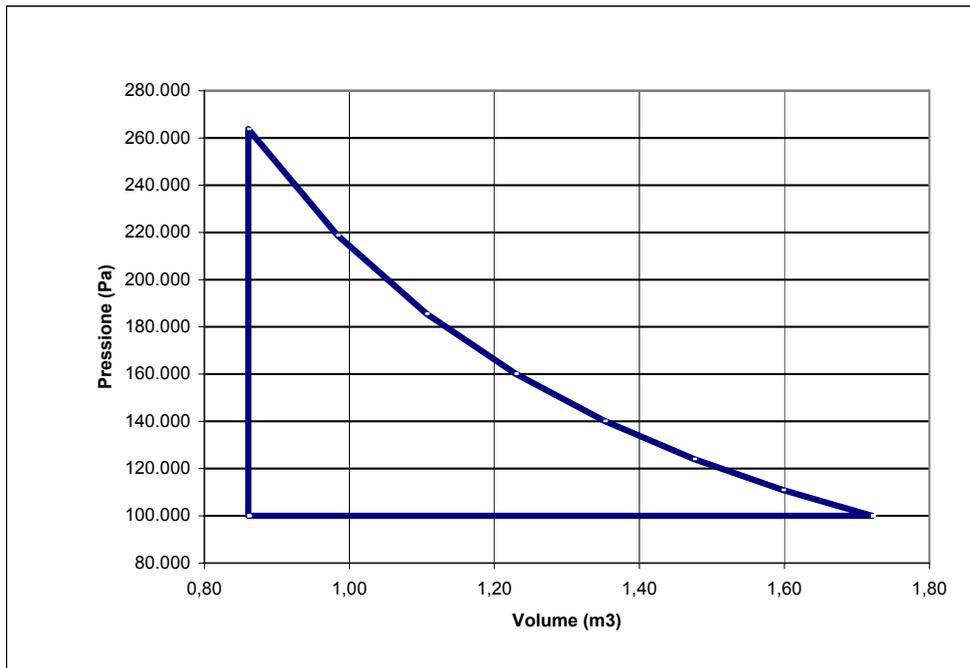
|                               |                |           |
|-------------------------------|----------------|-----------|
| numero di moli $n = m / MM =$ | 0,03448 kmol = | 34,48 mol |
| esponente dell'adiabatica     | $k =$          | 1,40      |

#### calcolo punti del ciclo

|  |                  |          |
|--|------------------|----------|
| volume $V1 = n R T1 / p1 =$            | 1,721 m3         |          |
| volume $V2 = V1 \times T2 / T1 =$      | 0,861 m3         |          |
| $p2 = p1$                              | 100.000 Pascal = | 1,00 bar |
| $V3 = V2 =$                            | 0,861 m3         |          |
| pressione $p3 = p1 \times (V1/V3)^k =$ | 263.809 Pascal = | 2,64 bar |
| $T3 = p3 V3 / nR =$                    | 792 K =          | 519 °C   |

#### Riepilogo punti del ciclo

|         | p (Pascal) | V (m3)  | T (°C) | T (K) |
|---------|------------|---------|--------|-------|
| punto 1 | 100.000    | 1,72067 | 327    | 600   |
| punto 2 | 100.000    | 0,86055 | 27     | 300   |
| punto 3 | 263.809    | 0,86055 | 519    | 792   |



## SEZIONE 4 - SOLUZIONI

### calcolo lavoro - calore - DE - DS

|  |                        |
|--|------------------------|
| $C_v = 5/2 R =$                          | 20,8 J/mol             |
| $C_p = 7/2 R =$                          | 29,1 J/mol             |
| $L_{12} = -p_1 \times (V_2 - V_1) =$     | 86.010 Joule           |
| $Q_{12} = n C_p (T_2 - T_1) =$           | -301.040 Joule         |
| $DE_{12} = L_{12} + Q_{12} =$            | -215.030 Joule         |
| $DS_{12} = n C_p \ln(T_2/T_1) =$         | <b>-695,30</b> Joule/K |
| $L_{23} = 0$ perché $V =$ costante       | 0 Joule                |
| $Q_{23} = n C_v (T_3 - T_2) =$           | 352.420 Joule          |
| $DE_{23} = L_{23} + Q_{23} =$            | 352.420 Joule          |
| $DS_{23} = n C_v \ln(T_3/T_2) =$         | 695,30 Joule/K         |
| $L_{31} = DE_{31} = n C_v (T_1 - T_3) =$ | -137.390 Joule         |
| $Q_{31} = 0$ (adiabatica)                | 0 Joule                |
| $DE_{31} =$                              | -137.390 Joule         |
| $DS_{31} = 0$ (adiabatica)               | 0 Joule/K              |

### Riepilogo Q / L / DE / DS

| valori in J  | Q             | L              | DE       | DS             |
|--------------|---------------|----------------|----------|----------------|
| trasf. 1-2   | -301.040      | 86.010         | -215.030 | <b>-695,30</b> |
| trasf. 2-3   | 352.420       | 0              | 352.420  | 695,30         |
| trasf. 3-1   | 0             | -137.390       | -137.390 | 0              |
| <b>ciclo</b> | <b>51.380</b> | <b>-51.380</b> | <b>0</b> | <b>0</b>       |

|   |               |
|---|---------------|
| $Q_h =$ calore assorbito ad alta temperatura = $Q_{23} =$ | 352.420 Joule |
| rendimento del ciclo $\eta = L/Q_h =$                     | 0,146         |
| rendimento ciclo di Carnot:                               |               |
| $\eta_C = 1 - T_{min}/T_{max} = 1 - T_2/T_3 =$            | 0,621         |

---

## SEZIONE 4 - SOLUZIONI

### Esercizio n. 4.4

#### DATI

|              |      |            |              |
|--------------|------|------------|--------------|
| massa        | m =  | 2,000 kg   |              |
| massa molare | MM = | 29 kg/kmol |              |
| temperatura  | T1 = | 527 °C =   | 800 K        |
| pressione    | p1 = | 15,0 bar = | 1.500.000 Pa |
| pressione    | p2 = | 5,0 bar =  | 500.000 Pa   |
| temperatura  | T3 = | 327 °C =   | 600 K        |

#### CALCOLI

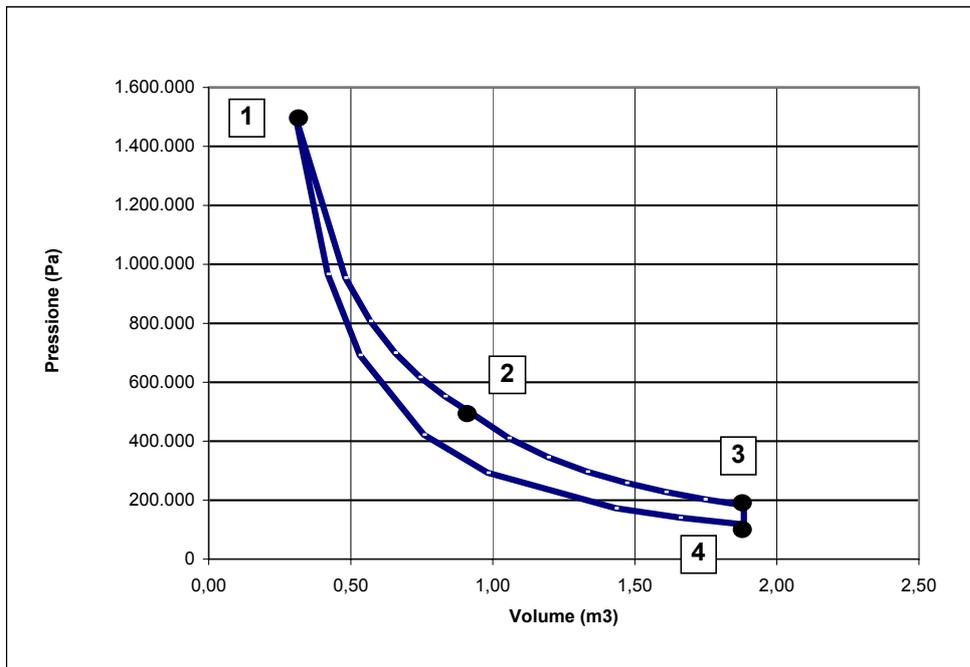
|                               |                |           |
|-------------------------------|----------------|-----------|
| numero di moli $n = m / MM =$ | 0,06897 kmol = | 68,97 mol |
| coefficiente adiabatica       | k =            | 1,4       |

#### calcolo punti del ciclo

|  |                  |            |
|--|------------------|------------|
| $V1 = n R T1 / p1 =$                   | 0,306 m3         |            |
| $V2 = V1 \times p1 / p2 =$             | 0,918 m3         |            |
| $T2 = T1$                              | 527 °C =         | 800 K      |
| $p3 = p2 \times (T3/T2)^{k/(k-1)} =$   | 1,8272 bar =     | 182.717 Pa |
| $V3 = V2 \times (p2/p3)^{1/k} =$       | 1,88 m3          |            |
| $V4 = V3 =$                            | 1,88 m3          |            |
| pressione $p4 = p1 \times (V1/V4)^k =$ | 117.742 Pascal = | 1,18 bar   |
| $T4 = p4 V4 / nR =$                    | 387 K =          | 114 °C     |

#### Riepilogo punti del ciclo

|         | p (Pascal) | V (m3)  | T (°C) | T (K) |
|---------|------------|---------|--------|-------|
| punto 1 | 1.500.000  | 0,30588 | 527    | 800   |
| punto 2 | 500.000    | 0,91763 | 527    | 800   |
| punto 3 | 182.717    | 1,88343 | 327    | 600   |
| punto 4 | 117.742    | 1,88343 | 114    | 387   |



## SEZIONE 4 - SOLUZIONI

### calcolo lavoro - calore - DE - DS

|  |                 |
|--|-----------------|
| $C_v = 5/2 R =$                          | 20,8 J/mol K    |
| $C_p = 7/2 R =$                          | 29,1 J/mol K    |
| $L_{12} = -n R T_1 \ln(V_2/V_1) =$       | -504.062 Joule  |
| $Q_{12} = -L_{12} =$                     | 504.062 Joule   |
| $DE_{12} = L_{12} + Q_{12} =$            | 0 Joule         |
| $DS_{12} = Q_{12} / T =$                 | 629,96 Joule/K  |
| $L_{23} = DE_{23} = n C_v (T_3 - T_2) =$ | -286.707 Joule  |
| $Q_{23} = 0$ (adiabatica)                | 0 Joule         |
| $DE_{23} =$                              | -286.707 Joule  |
| $DS_{23} = 0$ (adiabatica)               | 0 Joule/K       |
| $L_{34} = 0$ perché $V =$ costante       | 0 Joule         |
| $Q_{34} = n C_v (T_4 - T_3) =$           | -305.941 Joule  |
| $DE_{34} = L_{34} + Q_{34} =$            | -305.941 Joule  |
| $DS_{34} = n C_v \ln(T_4/T_3) =$         | -629,96 Joule/K |
| $L_{41} = DE_{41} = n C_v (T_1 - T_4) =$ | 592.647 Joule   |
| $Q_{41} = 0$ (adiabatica)                | 0 Joule         |
| $DE_{41} =$                              | 592.647 Joule   |
| $DS_{41} = 0$ (adiabatica)               | 0 Joule/K       |

### Riepilogo Q / L / DE / DS

| valori in J  | Q              | L               | DE       | DS       |
|--------------|----------------|-----------------|----------|----------|
| trasf. 1-2   | 504.062        | -504.062        | 0        | 629,96   |
| trasf. 2-3   | 0              | -286.707        | -286.707 | 0        |
| trasf. 3-4   | -305.941       | 0               | -305.941 | -629,96  |
| trasf. 4-1   | 0              | 592.647         | 592.647  | 0        |
| <b>ciclo</b> | <b>198.122</b> | <b>-198.122</b> | <b>0</b> | <b>0</b> |

|   |               |
|---|---------------|
| $Q_h =$ calore assorbito ad alta temperatura = $Q_{12} =$                     | 504.062 Joule |
| rendimento del ciclo $\eta = L/Q_h =$   | 0,393         |
| rendimento ciclo di Carnot:<br>$\eta_C = 1 - T_{min}/T_{max} = 1 - T_4/T_1 =$ | 0,517         |

## SEZIONE 4 - SOLUZIONI

### Esercizio n. 4.5

#### DATI

|              |      |            |            |
|--------------|------|------------|------------|
| massa        | m =  | 10,000 kg  |            |
| massa molare | MM = | 29 kg/kmol |            |
| temperatura  | T1 = | 27 °C =    | 300 K      |
| pressione    | p1 = | 1 bar =    | 100.000 Pa |
| pressione    | p2 = | 4 bar =    | 400.000 Pa |
| volume       | V3 = | V1         |            |

#### CALCOLI

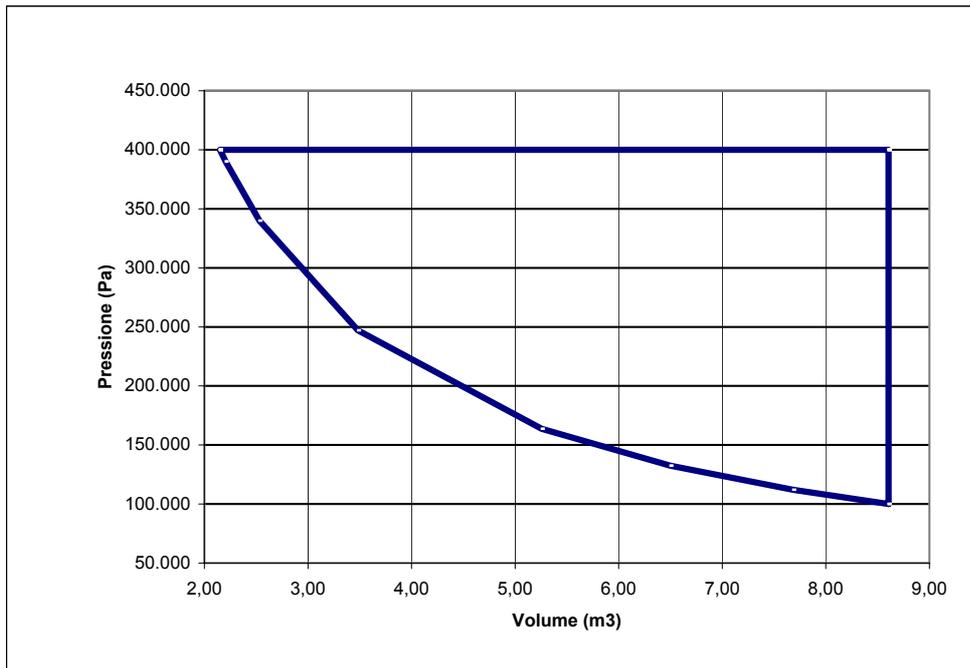
numero di moli  $n = m / MM =$  0,34483 kmol = 344,83 mol

#### calcolo punti del ciclo

|                                      |           |        |
|--------------------------------------|-----------|--------|
| volume V1 = $n R T1 / p1 =$          | 8,606 m3  |        |
| volume V2 = $V1 \times p1 / p2 =$    | 2,151 m3  |        |
| T2=T1                                | 27 °C =   | 300 K  |
| V3 = V1                              | 8,606 m3  |        |
| temperatura T3 = $T2 \times V3/V2 =$ | 1.201 K = | 927 °C |
| p3=p2                                |           |        |

#### Riepilogo punti del ciclo

|         | p (Pascal) | V (m3)  | T (°C) | T (K) |
|---------|------------|---------|--------|-------|
| punto 1 | 100.000    | 8,60551 | 27     | 300   |
| punto 2 | 400.000    | 2,15138 | 27     | 300   |
| punto 3 | 400.000    | 8,60551 | 927    | 1.201 |



## SEZIONE 4 - SOLUZIONI

### calcolo lavoro - calore - DE - DS

|  |                   |
|--|-------------------|
| $C_v = 5/2 R =$                          | 20,8 J/mol K      |
| $C_p = 7/2 R =$                          | 29,1 J/mol K      |
| $L_{12} = -n R T_1 \ln(V_2/V_1) =$       | 1.192.977 Joule   |
| $Q_{12} = -L_{12} =$                     | -1.192.977 Joule  |
| $DE_{12} = L_{12} + Q_{12} =$            | 0 Joule           |
| $DS_{12} = Q_{12}/T =$                   | -3.974,60 Joule/K |
| $L_{23} = -p_2 \times (V_3 - V_2) =$     | -2.581.652 Joule  |
| $Q_{23} = n C_p (T_3 - T_2) =$           | 9.035.783 Joule   |
| $DE_{23} = L_{23} + Q_{23} =$            | 6.454.131 Joule   |
| $DS_{23} = n C_p \ln(T_3/T_2) =$         | 13.911,11 Joule/K |
| $L_{31} = 0$ perché $V =$ costante       | 0 Joule           |
| $Q_{31} = DE_{31} = n C_v (T_1 - T_3) =$ | -6.454.131 Joule  |
| $DE_{31} =$                              | -6.454.131 Joule  |
| $DS_{31} = n C_v \ln(T_1/T_3) =$         | -9.936,50 Joule/K |

### Riepilogo Q / L / DE / DS

| valori in J  | Q                | L                 | DE         | DS       |
|--------------|------------------|-------------------|------------|----------|
| trasf. 1-2   | -1.192.977       | 1.192.977         | 0          | -3.975   |
| trasf. 2-3   | 9.035.783        | -2.581.652        | 6.454.131  | 13.911   |
| trasf. 3-1   | -6.454.131       | 0                 | -6.454.131 | -9.937   |
| <b>ciclo</b> | <b>1.388.676</b> | <b>-1.388.676</b> | <b>0</b>   | <b>0</b> |

|   |                 |
|---|-----------------|
| $Q_h =$ calore assorbito ad alta temperatura = $Q_{23} =$                     | 9.035.783 Joule |
| rendimento del ciclo $\eta = L/Q_h =$   | 0,154           |
| rendimento ciclo di Carnot:<br>$\eta_C = 1 - T_{min}/T_{max} = 1 - T_1/T_3 =$ | 0,750           |

## SEZIONE 4 - SOLUZIONI

### Esercizio n. 4.6

#### DATI

|                          |      |               |          |
|--------------------------|------|---------------|----------|
| Massa di aria            | m =  | 0,200 kg      |          |
| Massa molare dell'aria   | MM = | 29,0 kg/kmol  |          |
| $C_v = 5 / 2 \times R$   | =    | 20,79 kJ/kmol |          |
| Pressione massima        | p1 = | 80 bar        |          |
| Pressione minima         | p3 = | 1 bar         |          |
| Temperatura massima      | T1 = | 300 °C =      | 573,15 K |
| Temperatura minima       | T3 = | 10 °C =       | 283,15 K |
| Frequenza cicli          | F =  | 200 Hertz     |          |
| Periodo di funzionamento | t =  | 10 h          |          |
| Costo unitario en. el.   | C =  | 0,10 Euro/kWh |          |

#### CALCOLI

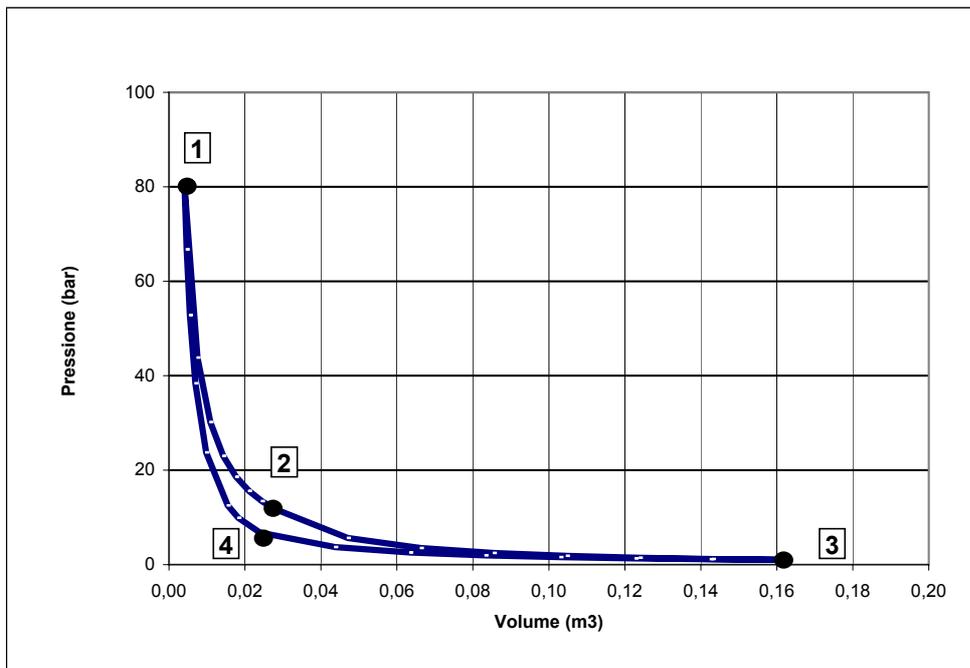
|                          |              |
|--------------------------|--------------|
| num. moli $n = m / MM =$ | 0,00690 kmol |
| $K = C_p / C_v =$        | 1,4          |

#### calcolo punti del ciclo

|  |                        |
|--|------------------------|
| $V1 = n R T1 / p1 =$                   | 0,00411 m <sup>3</sup> |
| $T2 = T1 =$                            | 573,15 K               |
| $T4 = T3 =$                            | 283,15 K               |
| $p2 = p3 \times (T2/T3)^{k / (k-1)} =$ | 11,80 bar              |
| $V2 = p1 V1 / p2 =$                    | 0,02785 m <sup>3</sup> |
| $V3 = n R T3 / p3 =$                   | 0,16236 m <sup>3</sup> |
| $p4 = p1 \times (T4/T1)^{k / (k-1)} =$ | 6,78 bar               |
| $V4 = p3 V3 / p4 =$                    | 0,02395 m <sup>3</sup> |

#### Riepilogo punti del ciclo

|            |       |                        |         |          |        |
|------------|-------|------------------------|---------|----------|--------|
| p1 (bar) = | 80,00 | V1 (m <sup>3</sup> ) = | 0,00411 | T1 (K) = | 573,15 |
| p2 (bar) = | 11,80 | V2 (m <sup>3</sup> ) = | 0,02785 | T2 (K) = | 573,15 |
| p3 (bar) = | 1,00  | V3 (m <sup>3</sup> ) = | 0,16236 | T3 (K) = | 283,15 |
| p4 (bar) = | 6,78  | V4 (m <sup>3</sup> ) = | 0,02395 | T4 (K) = | 283,15 |



## SEZIONE 4 - SOLUZIONI

### Calcolo Q / L / DE / DS

|                            | Lavoro        |            | Q            | DE = Q+L |            | DS       |
|----------------------------|---------------|------------|--------------|----------|------------|----------|
| L1-2 = - p1 V1 ln(V2/V1) = | -62,90        | Q = -L     | 62,90        | 0,00     | DS= Q / T  | 0,11     |
| L2-3 = n Cv (T2-T3) =      | -41,57        | adiabatica | 0            | -41,57   | adiabatica | 0        |
| L3-4 = - p3 V3 ln(V4/V3) = | 31,07         | Q = -L     | -31,07       | 0,00     | DS= Q / T  | -0,11    |
| L4-1 = n Cv (T1-T4) =      | 41,57         | adiabatica | 0            | 41,57    | adiabatica | 0        |
| <b>TOTALE CICLO</b>        | <b>-31,82</b> |            | <b>31,82</b> | <b>0</b> |            | <b>0</b> |

calore ad alta temp. Q1-2 = - L1-2 = 62,90 kJ/ciclo  
 eta = L / Q = 0,506  
 eta = 1 - Tmin / Tmax = 0,506

Potenza P = Ltot x f = 6.365 kW  
 Energia elettrica EE = P x t = 63.650 kWh  
 Valore en. el. VE = EE x C = 6.365 Euro

### Esercizio n. 4.7

#### DATI

|                            |      |                |         |
|----------------------------|------|----------------|---------|
| Massa di aria              | M1 = | 1,00 kg        |         |
| Massa molare dell'aria     | MM = | 29,0 kg/kmol   |         |
| Cv = 5 / 2 x R             | =    | 20,79 kJ/kmol  |         |
| Pressione massima          | p1 = | 3,00 bar       |         |
| Pressione minima           | p3 = | 1,00 bar       |         |
| Temperatura massima        | T1 = | 50 °C =        | 323,2 K |
| Temperatura minima         | T3 = | 1 °C =         | 274,2 K |
| Massa di acqua             | M2 = | 1.000 kg       |         |
| Temperatura iniziale acqua | Ti = | 50 °C          |         |
| Temperatura finale acqua   | Tf = | 15 °C          |         |
| Calore specifica acqua     | c =  | 4,186 kJ/kg °C |         |
| Costo unitario en. el.     | C =  | 0,10 Euro/kWh  |         |

#### CALCOLI

numero di moli n = m / MM = 0,03448 kmol  
 coefficiente adiabatica k = 1,4

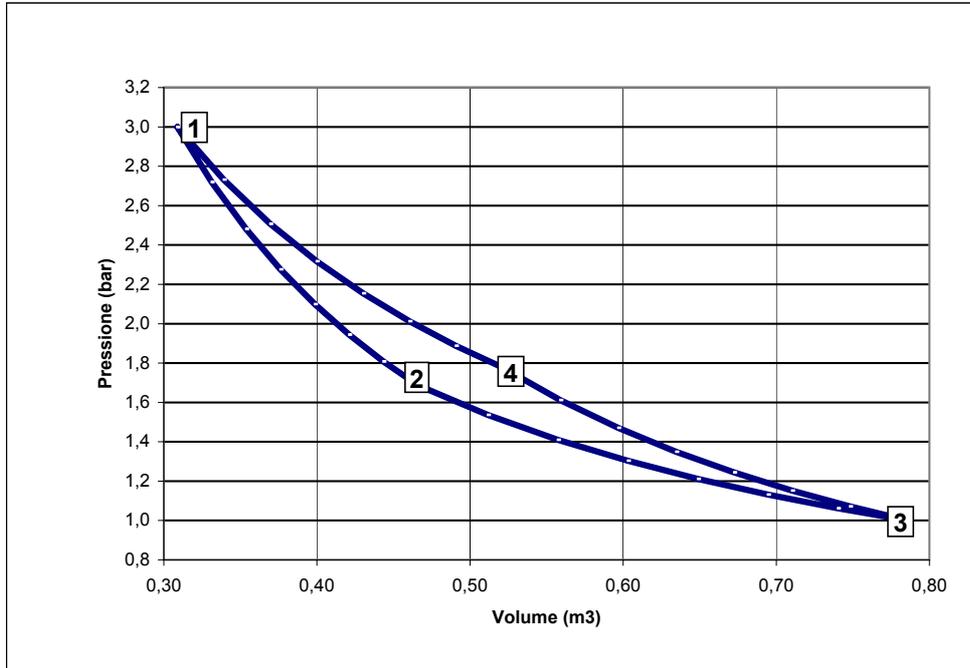
#### calcolo punti del ciclo

V1 = n R T1 / p1 = 0,3088 m3  
 T2 = T3 = 274,2 K  
 T4 = T1 = 323,2 K  
 p2 = p1 x (T2/T1)^k/(k-1) = 1,69 bar  
 V2 = n R T2 / p2 = 0,4658 m3  
 p4 = p3 x (T4/T3)^k/(k-1) = 1,78 bar  
 V3 = n R T3 / p3 = 0,7860 m3  
 V4 = p3 V3 / p4 = 0,5210 m3

## SEZIONE 4 - SOLUZIONI

### Riepilogo punti del ciclo

|            |      |           |        |          |       |
|------------|------|-----------|--------|----------|-------|
| p1 (bar) = | 3,00 | V1 (m3) = | 0,3088 | T1 (K) = | 323,2 |
| p2 (bar) = | 1,69 | V2 (m3) = | 0,4658 | T2 (K) = | 274,2 |
| p3 (bar) = | 1,00 | V3 (m3) = | 0,7860 | T3 (K) = | 274,2 |
| p4 (bar) = | 1,78 | V4 (m3) = | 0,5210 | T4 (K) = | 323,2 |



### Calcolo Q / L / DE / DS

|                            | Lavoro      |            | Q            | DE = Q+L |            | DS       |
|----------------------------|-------------|------------|--------------|----------|------------|----------|
| L1-2 = n Cv (T2-T1) =      | -35,12      | adiabatica | 0            | -35,12   | adiabatica | 0        |
| L2-3 = - p2 V2 ln(V3/V2) = | -0,41       | Q = -L     | 0,41         | 0,00     | DS= Q / T  | 0,0015   |
| L3-4 = n Cv (T4-T3) =      | 35,12       | adiabatica | 0            | 35,12    | adiabatica | 0        |
| L4-1 = - p4 V4 ln(V1/V4) = | 0,48        | Q = -L     | -0,48        | 0,00     | DS= Q / T  | -0,0015  |
| <b>TOTALE CICLO</b>        | <b>0,07</b> |            | <b>-0,07</b> | <b>0</b> |            | <b>0</b> |

calore a bassa temp. Q2-3 = - L2-3                      0,41 kJ/ciclo

COP= Tmin / ( Tmax - Tmin) =                      5,59                      COP= Q2-3 / Ltot =                      5,59

Calore per raffreddare l'acqua

Q H2O = m x c x (Tf-Ti) =                      -146.510 kJ = kWh                      -40,7  
 in valore assoluto:                      146.510 kJ = kWh                      40,7

Energia elettrica EE = Q H2O / COP =                      7,27 kWh  
 Costo en. el. VE = EE x C =                      0,73 Euro

## SEZIONE 4 - SOLUZIONI

### Esercizio n. 4.8

#### DATI

|                                 |          |                     |
|---------------------------------|----------|---------------------|
| frequenza ciclo                 | F =      | 100 cicli/s (Hertz) |
| COP                             | COP =    | 3                   |
| lavoro per ciclo                | L =      | 100 Joule/ciclo     |
| energia frigorifera da produrre | QL tot = | 5.000.000 kJ        |
| costo energia elettrica         | Ce =     | 0,10 Euro/kWh       |

#### ALTERNATIVA

|                   |         |
|-------------------|---------|
| T = QLtot / Pf =  | 166.667 |
| Pe = L x F =      | 10.000  |
| EE tot = Pe x T = | 462,96  |

#### CALCOLI

|  |                           |
|--|---------------------------|
| energia frigorifera per ciclo QL = L x COP =           | 300 Joule/ciclo           |
| potenza frigorifera Pf = QL x F =                      | 30.000 J/s (Watt)         |
| en. elettrica totale consumata EEtot = QL tot / COP =  | 1.666.667 kJ = kWh 462,96 |
| costo energia elettrica C = Ce x EE tot = 0,10 X 463 = | 46,296 Euro               |

---

### Esercizio n. 4.9

#### DATI

|                                      |        |                    |         |
|--------------------------------------|--------|--------------------|---------|
| frequenza ciclo                      | F =    | 30 cicli/s (Hertz) |         |
| temperatura massima                  | Tmax = | 900 °C =           | 1.173 K |
| temperatura minima                   | Tmin = | 20 °C =            | 293 K   |
| calore assorbito ad alta temperatura | Qh =   | 150 J / ciclo      |         |
| costo energia elettrica              | Ce =   | 0,10 Euro/kWh      |         |
| tempo                                | t =    | 5 ore              |         |

#### CALCOLI

|  |                |
|--|----------------|
| rendimento del ciclo eta = 1 - Tmin/Tmax = | 0,750          |
| lavoro del ciclo Lc = Qh x eta =           | 113 kJ / ciclo |
| potenza elettrica P = Lc x F =             | 3.376 J/s (W)  |
| energia elettrica EE = P x t =             | 16.878 Wh      |
| costo energia elettrica C = Ce * EE tot =  | 1,69 Euro      |

---

### Esercizio n. 4.10

#### DATI

|                         |              |
|-------------------------|--------------|
| COP                     | 4,5          |
| L ciclo                 | 120 kJ/ciclo |
| E frigorifera totale Ef | 6.000.000 kJ |
| T (tempo funzionamento) | 4 h          |

#### CALCOLI

|   |                          |        |
|---|--------------------------|--------|
| Potenza frigorifera Pf = Ef / T                   | 1.500.000 kJ/h =         | 417 kW |
| Ef ciclo = L ciclo x COP =                        | 540 kJ/ciclo             |        |
| freequenza F = cicli al secondo = Pf / Ef ciclo = | 0,772 Hz (cicli/secondo) |        |

---

### Esercizio n. 4.11

#### DATI

|   |                       |
|---|-----------------------|
| calore prelevato a bassa temperatura QL = | 100 kJ/ciclo          |
| calore fornito ad alta temperatura QH =   | 130 kJ/ciclo          |
| frequenza F =                             | 10 Hz (cicli/secondo) |

#### CALCOLI

|                                   |              |          |
|-----------------------------------|--------------|----------|
| COP = QL / (QH - QL) =            | 3,333        |          |
| Potenza frigorifera Pf = QL x f = | 1.000 kJ/s = | 1.000 kW |

## SEZIONE 4 - SOLUZIONI

### Esercizio n. 4.12

#### DATI

|                                     |              |       |                                |    |
|-------------------------------------|--------------|-------|--------------------------------|----|
| Massa / temperatura acqua 1         | $m_1$ (kg) = | 10    | $T_1$ (°C) =                   | 20 |
| Massa / temperatura acqua 2         | $m_2$ (kg) = | 40    | $T_2$ (°C) =                   | 70 |
| Calore specifico dell'acqua liquida | $c$ =        | 4,186 | $\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$ |    |

#### CALCOLI

|   |                                   |                |
|---|-----------------------------------|----------------|
| Entalpia acqua 1:   | $H_1 = m_1 \times c \times T_1 =$ | 837 kJ         |
| Entalpia acqua 2:   | $H_2 = m_2 \times c \times T_2 =$ | 11.721 kJ      |
| Entalpia totale:  | $H = H_1 + H_2 =$                 | 12.558 kJ      |
| Entalpia specifica della miscela:   | $h = H / (m_1+m_2) =$             | 251 kJ/kg      |
| Temperatura miscela $T_m = h / c =$                                       |                                   | 60,0 °C        |
| Temperature assolute:   | $T_1 =$                           | 293,15 K       |
| (da usare per il calcolo delle variazioni di entropia)                    | $T_2 =$                           | 343,15 K       |
|   | $T_m =$                           | 333,15 K       |
| Variazione di entropia massa 1: $DS_1 = m \times c \times \ln(T_m/T_1) =$ |                                   | 5,354 kJ/kg K  |
| Variazione di entropia massa 2: $DS_2 = m \times c \times \ln(T_m/T_2) =$ |                                   | -4,952 kJ/kg K |
| Variazione di entropia totale $DS = DS_1 + DS_2 =$                        |                                   | 0,402 kJ/kg K  |
| è > 0 perché la trasformazione è irreversibile                            |                                   |                |

---

## SEZIONE 4 - SOLUZIONI

### Esercizio n. 4.13

#### DATI

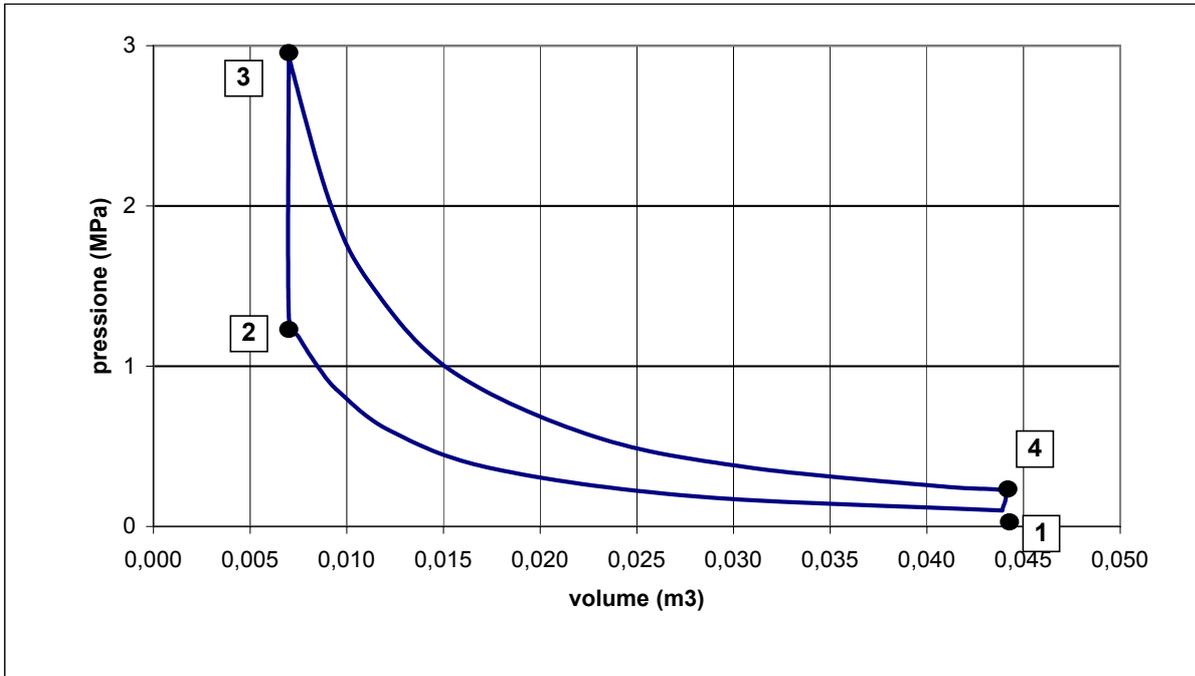
|                |      |              |            |
|----------------|------|--------------|------------|
| massa          | m =  | 0,055 kg     |            |
| massa molare   | MM = | 29,5 kg/kmol |            |
| pressione p1   | p1 = | 1,0 bar =    | 100.000 Pa |
| temperatura T1 | T1 = | 10,0 °C =    | 283,15 K   |
| volume V2      | V2 = | 0,007 m3     |            |
| temperatura T3 | T3 = | 1.050 °C =   | 1.323,15 K |

#### CALCOLI

|                          |               |                       |
|--------------------------|---------------|-----------------------|
| $C_v = 5 / 2 \times R =$ | 20,79 kJ/kmol | $K = C_p / C_v = 1,4$ |
| num. moli $n = m / MM =$ | 0,00186 kmol  |                       |

#### Calcolo punti del ciclo

| pressione              | Pascal    | volume               | m3     | temperatura          | K        | °C       |
|------------------------|-----------|----------------------|--------|----------------------|----------|----------|
| p 1 =                  | 100.000   | $V1 = n R T1 / p1 =$ | 0,0439 | T1 =                 | 283,15   | 10,00    |
| $p 2 = p1 (V1/V2)^k =$ | 1.306.813 | V2 =                 | 0,0070 | $T2 = p2 V2 / n R =$ | 590,11   | 316,96   |
| $p 3 = n R T3 / V3 =$  | 2.930.136 | $V3 = V2 =$          | 0,0070 | T3 =                 | 1.323,15 | 1.050,00 |
| $p 4 = p3 (V3/V4)^k =$ | 224.220   | V4 = V1 =            | 0,0439 | $T4 = p4 V4 / n R =$ | 634,88   | 361,73   |



#### Calcolo Q / L / DE / DS

| Lavoro                     | Joule         | Calore               | Joule  | DE = Q+L | DS                      | Joule / K |
|----------------------------|---------------|----------------------|--------|----------|-------------------------|-----------|
| L1-2 = $n C_v (T2-T1) =$   | 11,90         | adiabatica           | 0,00   | 11,90    | adiabatica              | 0         |
| L2-3 =                     | 0,00          | $Q = n C_v \Delta T$ | 28,41  | 28,41    | $DS = n C_v \ln(T3/T2)$ | 0,0313    |
| L3-4 = $n C_v (T4 - T3) =$ | -26,67        | adiabatica           | 0,00   | -26,67   | adiabatica              | 0         |
| L4-1 =                     | 0,00          | $Q = n C_v \Delta T$ | -13,63 | -13,63   | $DS = n C_v \ln(T1/T4)$ | -0,0313   |
| <b>TOTALE CICLO</b>        | <b>-14,78</b> |                      | 14,78  | 0        |                         | 0         |

|  |       |
|--|-------|
| calore assorbito dal gas ad alta temperatura: $Q_h = Q_{2-3} =$          | 28,41 |
| $\eta = L / Q_h =$   | 0,520 |
| rendimento ciclo di Carnot: $\eta_C = 1 - T_{min}/T_{max} = 1 - T1/T3 =$ | 0,786 |

## SEZIONE 4 - SOLUZIONI

### Esercizio n. 4.14

#### DATI

|                                    |              |         |
|------------------------------------|--------------|---------|
| Massa di aria m =                  | 1,40 kg      |         |
| Massa molare dell'aria MM =        | 29,0 kg/kmol |         |
| Volume minimo del ciclo V1 =       | 0,050 m3     |         |
| Temperatura massima del ciclo T1 = | 500 °C =     | 773,2 K |
| Volume massimo del ciclo V3 =      | 3,000 m3     |         |
| Temperatura minima del ciclo T3 =  | 10 °C =      | 283,2 K |

#### CALCOLI

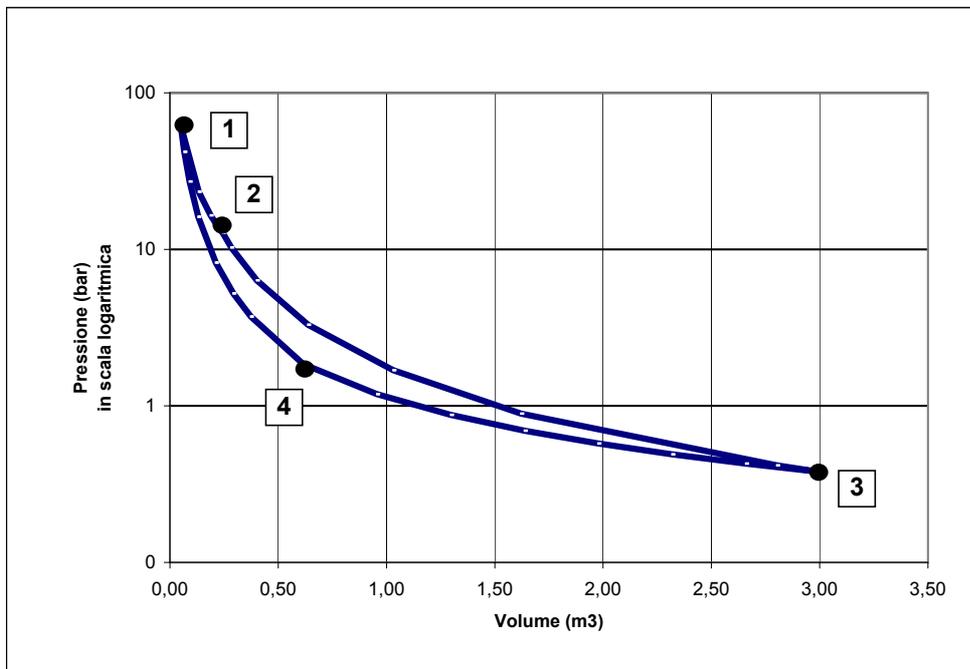
|                          |               |
|--------------------------|---------------|
| $C_v = 5 / 2 \times R =$ | 20,79 kJ/kmol |
| $K = C_p / C_v =$        | 1,4           |
| num. moli n = m / MM =   | 0,04828 kmol  |

#### Calcolo punti del ciclo

|  |                    |           |
|--|--------------------|-----------|
| $p_1 = n R T_1 / V_1 =$                    | 6.206.688 Pascal = | 62,07 bar |
| $T_2 = T_1 =$                              | 773 K              |           |
| $T_4 = T_3 =$                              | 283 K              |           |
| $V_2 = V_3 \times (T_3 / T_2)^{1/(k-1)} =$ | 0,24350 m3         |           |
| $p_2 = p_1 V_1 / V_2 =$                    | 1.274.461 Pascal = | 12,74 bar |
| $p_3 = n R T_3 / V_3 =$                    | 37.884 Pascal =    | 0,379 bar |
| $V_4 = V_1 \times (T_1 / T_4)^{1/(k-1)} =$ | 0,61601 m3         |           |
| $p_4 = p_3 V_3 / V_4 =$                    | 184.499 Pascal =   | 1,845 bar |

#### Riepilogo punti del ciclo

|               |        |              |         |             |       |
|---------------|--------|--------------|---------|-------------|-------|
| $p_1$ (bar) = | 62,067 | $V_1$ (m3) = | 0,05000 | $T_1$ (K) = | 773,2 |
| $p_2$ (bar) = | 12,745 | $V_2$ (m3) = | 0,24350 | $T_2$ (K) = | 773,2 |
| $p_3$ (bar) = | 0,379  | $V_3$ (m3) = | 3,00000 | $T_3$ (K) = | 283,2 |
| $p_4$ (bar) = | 1,845  | $V_4$ (m3) = | 0,61601 | $T_4$ (K) = | 283,2 |



## SEZIONE 4 - SOLUZIONI

### Calcolo Q / L / DE / DS

|                            | Lavoro         |            | Q             | DE = Q+L | DS                 |
|----------------------------|----------------|------------|---------------|----------|--------------------|
| L1-2 = - p1 V1 ln(V2/V1) = | -491,26        | Q = -L     | 491,26        | 0,00     | DS= Q / T<br>0,64  |
| L2-3 = n Cv (T2-T3) =      | -491,70        | adiabatica | 0,00          | -491,70  | adiabatica<br>0    |
| L3-4 = - p3 V3 ln(V4/V3) = | 179,91         | Q = -L     | -179,91       | 0,00     | DS= Q / T<br>-0,64 |
| L4-1 = n Cv (T1-T4) =      | 491,70         | adiabatica | 0,00          | 491,70   | adiabatica<br>0    |
| <b>TOTALE CICLO</b>        | <b>-311,35</b> |            | <b>311,35</b> | <b>0</b> | <b>0</b>           |

calore assorbito dal gas ad alta temperatura:  $Q_h = Q_{1-2} = 491,26$   
 $\eta = L / Q_h = 0,634$   
 $\eta = 1 - T_{min} / T_{max} = 0,634$

### Esercizio n. 4.15

#### DATI

|                          |      |                      |
|--------------------------|------|----------------------|
| Massa di aria            | m =  | 0,200 kg             |
| Massa molare dell'aria   | MM = | 29,00 kg/kmol        |
| $C_v = 5 / 2 \times R$   | =    | 20,79 kJ/kmol        |
| Pressione massima        | p1 = | 150,0 bar            |
| Pressione minima         | p3 = | 1,2 bar              |
| Volume massimo           | V3 = | 0,180 m <sup>3</sup> |
| Volume minimo            | V1 = | 0,004 m <sup>3</sup> |
| Frequenza cicli          | F =  | 200 Hertz            |
| Periodo di funzionamento | t =  | 15 h                 |
| Costo unitario en. el.   | C =  | 0,10 Euro/kWh        |

#### CALCOLI

num. moli  $n = m / MM = 0,00690$  kmol  
 $K = C_p / C_v = 1,4$

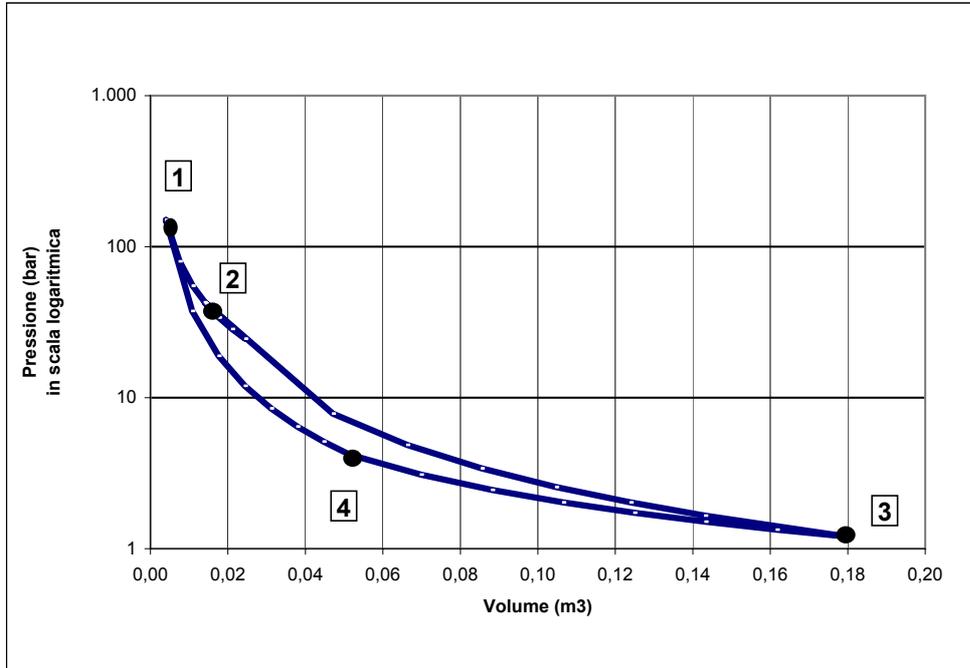
#### calcolo punti del ciclo

|  |                       |        |
|--|-----------------------|--------|
| $T_1 = V_1 p_1 / (n R) =$                | 1.046,4 K =           | 773 °C |
| $T_2 = T_1 =$                            | 1.046,4 K =           | 773 °C |
| $T_3 = V_3 p_3 / (n R) =$                | 376,7 K =             | 104 °C |
| $T_4 = T_3 =$                            | 376,7 K =             | 104 °C |
| $p_2 = p_3 \times (T_2/T_3)^{k/(k-1)} =$ | 42,9 bar              |        |
| $V_2 = p_1 V_1 / p_2 =$                  | 0,0140 m <sup>3</sup> |        |
| $p_4 = p_1 \times (T_4/T_1)^{k/(k-1)} =$ | 4,2 bar               |        |
| $V_4 = p_3 V_3 / p_4 =$                  | 0,051 m <sup>3</sup>  |        |

## SEZIONE 4 - SOLUZIONI

### Riepilogo punti del ciclo

|               |        |                           |        |             |         |
|---------------|--------|---------------------------|--------|-------------|---------|
| $p_1$ (bar) = | 150,00 | $V_1$ (m <sup>3</sup> ) = | 0,0040 | $T_1$ (K) = | 1.046,4 |
| $p_2$ (bar) = | 42,87  | $V_2$ (m <sup>3</sup> ) = | 0,0140 | $T_2$ (K) = | 1.046,4 |
| $p_3$ (bar) = | 1,20   | $V_3$ (m <sup>3</sup> ) = | 0,1800 | $T_3$ (K) = | 376,7   |
| $p_4$ (bar) = | 4,20   | $V_4$ (m <sup>3</sup> ) = | 0,0514 | $T_4$ (K) = | 376,7   |



### Calcolo Q / L / DE / DS

|                                     | Lavoro        | Q               | DE = Q+L | DS                 |
|-------------------------------------|---------------|-----------------|----------|--------------------|
| $L_{1-2} = -p_1 V_1 \ln(V_2/V_1) =$ | -75,15        | $Q = -L$ 75,15  | 0,00     | $DS = Q / T$ 0,07  |
| $L_{2-3} = n C_v (T_2 - T_3) =$     | -96,00        | adiabatica 0    | -96,00   | adiabatica 0       |
| $L_{3-4} = -p_3 V_3 \ln(V_4/V_3) =$ | 27,05         | $Q = -L$ -27,05 | 0,00     | $DS = Q / T$ -0,07 |
| $L_{4-1} = n C_v (T_1 - T_4) =$     | 96,00         | adiabatica 0    | 96,00    | adiabatica 0       |
| <b>TOTALE CICLO</b>                 | <b>-48,09</b> | <b>48,09</b>    | <b>0</b> | <b>0</b>           |

calore ad alta temp.  $Q_{1-2} = -L_{1-2} =$  75,15 kJ/ciclo  
 $\eta = L / Q =$  0,640  
 $\eta = 1 - T_{min} / T_{max} =$  0,640

Potenza  $P = L_{tot} \times f =$  9.619 kW  
 Energia elettrica  $EE = P \times t =$  144.283 kWh  
 Valore en. el.  $VE = EE \times C =$  14.428 Euro

## SEZIONE 5 - ESERCIZI

### Riferimento della dispensa: cap. H (Stati di aggregazione della materia)

---

---

#### Esercizio n. 5.1

Utilizzando le tabelle del vapore d'acqua, calcolare l'energia termica che deve essere complessivamente tolta ad un quantitativo M d'acqua allo stato di vapore, pressione p1 e temperatura T1, per portarla allo stato di liquido saturo, alla temperatura T2.

#### DATI

|                            |      |         |         |
|----------------------------|------|---------|---------|
| massa                      | M =  | 5 kg    |         |
| pressione vapore           | p1 = | 3 bar = | 0,3 MPa |
| temperatura vapore         | T1 = | 250 °C  |         |
| temperatura liquido saturo | T2 = | 50 °C   |         |

---

---

#### Esercizio n. 5.2

Un quantitativo di ghiaccio di massa M1 alla temperatura T1 deve essere portato allo stato di liquido e poi riscaldato fino alla temperatura T2. Calcolare l'energia termica che deve essere complessivamente fornita al sistema.

#### DATI

|                          |        |                |
|--------------------------|--------|----------------|
| massa                    | M =    | 100 kg         |
| temperatura ghiaccio     | T1 =   | 0 °C           |
| temperatura liquido      | T2 =   | 50 °C          |
| calore latente fusione   | Clat = | 330 kJ/kg      |
| calore specifico liquido | c =    | 4,186 kJ/kg °C |

---

---

#### Esercizio n. 5.3

Un quantitativo di acqua di massa M1, alla temperatura T1, viene miscelato con una massa M2 di acqua, alla temperatura T2. La miscela ottenuta deve essere raffreddata sino alla temperatura Tg e poi portata allo stato solido.

Calcolare l'energia termica che deve essere complessivamente sottratta al sistema.

#### DATI

|                          |        |                |
|--------------------------|--------|----------------|
| massa 1                  | M1 =   | 10 kg          |
| temperatura 1            | T1 =   | 70 °C          |
| massa 2                  | M2 =   | 5 kg           |
| temperatura 2            | T2 =   | 40 °C          |
| temperatura ghiaccio     | Tg =   | 0 °C           |
| calore latente fusione   | Clat = | 330 kJ/kg      |
| calore specifico liquido | c =    | 4,186 kJ/kg °C |

---

---

#### Esercizio n. 5.4

Utilizzando le tabelle del vapore d'acqua oppure il diagramma di Mollier, calcolare il calore necessario per portare una massa d'acqua M, dallo stato di liquido saturo con temperatura T1, sino allo stato di vapore surriscaldato con pressione p2 e temperatura T2.

Determinare anche il volume totale occupato dal vapore nelle condizioni 2.

#### DATI

|               |      |            |
|---------------|------|------------|
| massa         | M =  | 15 kg      |
| temperatura 1 | T1 = | 20 °C      |
| temperatura 2 | T2 = | 160 °C     |
| pressione 2   | p2 = | 2 bar ass. |

## SEZIONE 5 - SOLUZIONI

### Riferimento della dispensa: cap. H (Stati di aggregazione della materia)

---

---

#### Esercizio n. 5.1

##### DATI

|                            |      |         |         |
|----------------------------|------|---------|---------|
| massa                      | M =  | 5 kg    |         |
| pressione vapore           | p1 = | 3 bar = | 0,3 MPa |
| temperatura vapore         | T1 = | 250 °C  |         |
| temperatura liquido saturo | T2 = | 50 °C   |         |

##### CALCOLI

Cornetti - Macchine Termiche - Tabelle del vapore d'acqua surriscaldato - tab. A.3.1. - pag. 735

$$h1 = 2.967,6 \text{ kJ/kg}$$

Cornetti - Macchine Tabelle del vapore d'acqua saturo - tab. A.1. - pag. 732

$$\begin{aligned} p2 &= 12,349 \text{ kPa} \\ h2 = hf &= 209,3 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$\text{calore da sottrarre } Q = m \times (h1 - h2) = 13.791 \text{ kJ}$$

---

---

#### Esercizio n. 5.2

##### DATI

|                          |        |                |
|--------------------------|--------|----------------|
| massa                    | M =    | 100 kg         |
| temperatura ghiaccio     | T1 =   | 0 °C           |
| temperatura liquido      | T2 =   | 50 °C          |
| calore latente fusione   | Clat = | 330 kJ/kg      |
| calore specifico liquido | c =    | 4,186 kJ/kg °C |

##### CALCOLI

$$\begin{aligned} \text{calore fusione ghiaccio } Q1 &= m \times \text{Clat} = 33.000 \text{ kJ} \\ \text{calore riscaldamento acqua } Q2 &= c \times m \times (T2 - T1) = 20.930 \text{ kJ} \\ \text{calore totale } Q &= Q1 + Q2 = 53.930 \text{ kJ} \end{aligned}$$

---

---

## SEZIONE 5 - SOLUZIONI

### Esercizio n. 5.3

#### DATI

|                          |        |                |
|--------------------------|--------|----------------|
| massa 1                  | M1 =   | 10 kg          |
| temperatura 1            | T1 =   | 70 °C          |
| massa 2                  | M2 =   | 5 kg           |
| temperatura 2            | T2 =   | 40 °C          |
| temperatura ghiaccio     | Tg =   | 0 °C           |
| calore latente fusione   | Clat = | 330 kJ/kg      |
| calore specifico liquido | c =    | 4,186 kJ/kg °C |

#### CALCOLI

|  |      |          |
|--|------|----------|
| temperatura miscela<br>= $(m1 \times c \times T1 + m2 \times c \times T2) / (m1xc + m2xc)$ | Tm = | 60 °C    |
| calore da sottrarre all'acqua<br>= $c \times (m1+m2) \times (Tm-Tg) =$                     | Q1 = | 3.767 kJ |
| calore solidificazione ghiaccio<br>= $(m1 + m2) \times Clat$                               | Q2 = | 4.950 kJ |
| calore totale Q = Q1 + Q2 =  |      | 8.717 kJ |

---

### Esercizio n. 5.4

#### DATI

|               |      |            |
|---------------|------|------------|
| massa         | M =  | 15 kg      |
| temperatura 1 | T1 = | 20 °C      |
| temperatura 2 | T2 = | 160 °C     |
| pressione 2   | p2 = | 2 bar ass. |

#### CALCOLI

|  |      |                |
|--|------|----------------|
| entalpia specifica 1   | h1 = | 83,96 kJ/kg    |
| entalpia specifica 2<br>deriva dall'interpolazione lineare fra 150°C (2768,8) e 200°C (2870,5) | h2 = | 2.789,10 kJ/kg |
| calore da fornire<br>Q = m x (h2-h1) =   | Q =  | 40.577 kJ      |
| volume specifico 2<br>deriva dall'interpolazione lineare fra 150°C (0,9596) e 200°C (1,0803)   | v2 = | 1,0803 m3/kg   |
| volume totale 2 V2 = v2 x m =  | V2 = | 16,20 m3       |

## SEZIONE 6 - ESERCIZI

### Riferimento della dispensa: cap. I (Diagramma di Mollier del vapor d'acqua)

#### Esercizio n. 6.1

Usando il diagramma di Mollier del vapore d'acqua oppure le tabelle determinare le seguenti grandezze: entalpia, entropia, volume specifico, temperatura, pressione e titolo, per i 7 punti sotto riportati

| Punto | Pressione (MPa) | Temperatura (°C) | Entalpia (kJ/kg) | Entropia (kJ/kg K) | Vol. specifico (mc/kg) | Titolo (kg vap/kg tot) |
|-------|-----------------|------------------|------------------|--------------------|------------------------|------------------------|
| A     | 0,50            | 525              |                  |                    |                        |                        |
| B     | 0,075           |                  | 2.365,6          |                    |                        |                        |
| C     | 0,15            | 175              |                  | 7,54               |                        |                        |
| D     | 1,0             | 400              |                  |                    |                        |                        |
| E     | 0,5             | 151,86           | 2.748,4          |                    |                        |                        |
| F     | 0,00234         | 20               |                  |                    |                        | 0                      |
| G     | 0,2             | 120,23           |                  |                    |                        | 1                      |

## SEZIONE 6 - SOLUZIONI

### Esercizio n. 6.1

| Punto | Pressione (MPa) | Temperatura (°C) | Entalpia (kJ/kg) | Entropia (kJ/kg K) | Vol. specifico (mc/kg) | Titolo (kg vap/kg tot) |
|-------|-----------------|------------------|------------------|--------------------|------------------------|------------------------|
| A     | 0,50            | 525              | 3.538,4          | 8,1535             | 0,7342                 | 1,00                   |
| B     | 0,075           | 92               | 2.365,6          | 6,6415             | 1,9278                 | 0,87                   |
| C     | 0,15            | 175              | 2.822,8          | 7,5400             | 1,5371                 | 1,00                   |
| D     | 1,0             | 400              | 3.263,9          | 7,4651             | 0,3066                 | 1,00                   |
| E     | 0,5             | 151,86           | 2.748,7          | 6,8213             | 0,3749                 | 1,00                   |
| F     | 0,00234         | 20               | 83,960           | 0,2966             | 0,0010                 | 0,00                   |
| G     | 0,2             | 120,23           | 2.706,7          | 7,1271             | 0,8857                 | 1,00                   |

#### Punto A

Prendendo la Tab. A.2, si legge che per la pressione  $P = 5,00$  bar, la temperatura di saturazione è pari a  $T_s = 151,86^\circ\text{C}$ ; quindi, essendo  $T = 525^\circ\text{C}$ , il vapore è surriscaldato. I valori di entalpia, entropia e volume massico corrispondenti alla temperatura  $T = 525^\circ\text{C}$  si ottengono interpolando i valori di entalpia, entropia e volume massico corrispondenti ai valori di temperature di 500 e  $600^\circ\text{C}$  che si leggono sulla Tab. A.3.1.

Esempio: calcolo dell'entalpia

$$h = h_{500} + (h_{600} - h_{500}) \times (525 - 500) / (600 - 500) = 3483,9 + (3701,7 - 3483,9) \times (525 - 500) / (600 - 500) =$$

$$3.538,4 \text{ kJ / kg}$$

#### Punto B

Entrando nella Tab. A.2, si legge in corrispondenza della pressione  $P = 0,75$  bar (75 kPa) il valore della temperatura di saturazione:  $91,78^\circ\text{C}$ . Inoltre l'entalpia del vapore è compresa fra quella del liquido saturo e del vapore saturo da cui ne consegue che l'acqua è in fase mista e ha una quota liquida ed una di vapore.

|                | T    | h       | s      | v        |
|----------------|------|---------|--------|----------|
| liquido saturo | 91,8 | 384,4   | 1,2130 | 0,001037 |
| vapore saturo  | 91,8 | 2.663,0 | 7,4564 | 2,217    |

L'entropia e il volume specifico si determinano dal calcolo del titolo, come di seguito indicato:

$$X = (h_{fg} - h_f) / (h_g - h_f) = 0,87$$

$$s = s_f + (s_g - s_f) \times X = 6,64 \quad \text{kJ / (kg} \times \text{K)}$$

$$v = v_f + (v_g - v_f) \times X = 1,93 \quad \text{m}^3 / \text{kg}$$

#### Punto C

È un caso analogo al punto A; per il calcolo dell'entalpia e del volume massico ora però si dovrà fare una doppia interpolazione a causa della mancanza nella Tab. A.3.1 della pressione  $P = 0,15$  MPa.

#### Punto D

Prendendo la Tab. A.2, si legge che per la pressione  $P = 1,00$  MPa, la temperatura di saturazione è pari a  $T_s = 179,91^\circ\text{C}$ ; quindi, essendo  $T = 400^\circ\text{C}$ , il vapore è surriscaldato. I valori di entalpia, entropia e volume massico corrispondenti alla temperatura  $T = 400^\circ\text{C}$  si leggono sulla Tab. A.3.1.

#### Punto E

Prendendo la Tab. A.2, si legge che la temperatura data è quella di saturazione del vapore alla pressione  $P = 0,50$  Mpa. I valori di entalpia, entropia e volume massico si leggono direttamente sulla tabella nelle colonne del vapore saturo.

#### Punto F

L'acqua si trova allo stato liquido essendo il titolo pari a 0. Entrando nella Tab. A.1, la pressione data è quella di saturazione del liquido alla temperatura  $T = 20^\circ\text{C}$ . I valori di entalpia, entropia e volume massico si leggono direttamente sulla tabella nelle colonne di liquido saturo.

#### Punto G

L'acqua si trova allo stato vapore essendo il titolo pari a 1. Entrando nella Tab. A.2, la temperatura data nella riga G è uguale a quella di saturazione del vapore alla pressione  $P = 0,2$  MPa. I valori di entalpia, entropia e volume massico si leggono direttamente sulla tabella nelle colonne del vapore saturo.

## SEZIONE 7 - ESERCIZI

### Esercizio n. 7.1

Una portata di vapore  $G$  viene immessa in una turbina a vapore ad una pressione  $P1$  e ad una temperatura  $T1$  e viene scaricata ad una pressione  $P2$ .

Tenendo presente che il rendimento adiabatico della turbina è  $\eta_{aad}$  e trascurando il rendimento meccanico ed elettrico, calcolare la potenza realmente fornita dal fluido.

#### DATI

|                               |                |                      |
|-------------------------------|----------------|----------------------|
| Pressione 1                   | $P1 =$         | 60 bar a             |
| Temperatura 1                 | $T1 =$         | 450 °C               |
| Pressione 2                   | $P2 =$         | 0,1 bar a            |
| Portata di vapore:            | $G =$          | 100 t/h<br>27,8 kg/s |
| Rendimento adiabatico turbina | $\eta_{aad} =$ | 80 %                 |

---

---

### Esercizio n. 7.2

Una portata di vapore viene immessa in una turbina a vapore ad una pressione  $P1$  e ad una temperatura  $T1$  e viene scaricata ad una pressione  $P2$ . Il lavoro massico prodotto è  $L$ .

Calcolare il rendimento adiabatico della turbina.

#### DATI

|                         |        |           |
|-------------------------|--------|-----------|
| Pressione 1             | $P1 =$ | 80 bar a  |
| Temperatura 1           | $T1 =$ | 500 °C    |
| Pressione 2             | $P2 =$ | 0,3 bar a |
| Lavoro massico prodotto | $L =$  | 880 kJ/kg |

---

---

### Esercizio n. 7.3

Una turbina è azionata da idrogeno  $H_2$ , che entra alla pressione  $P1$ , alla temperatura  $T1$  ed esce alla pressione di  $P2$ .

E' noto il rendimento adiabatico di espansione  $\eta_{aad}$ .

La portata di idrogeno è  $G$ . Applicando le leggi dei gas ideali, calcolare:

1. la temperatura di uscita dell'idrogeno dalla turbina;
2. la potenza prodotta dalla turbina.

#### DATI

|                                |                |          |
|--------------------------------|----------------|----------|
| Portata di idrogeno:           | $G =$          | 500 kg/h |
| Pressione di ingresso turbina: | $P1 =$         | 30 bar a |
| Temperatura ingresso turbina:  | $T1 =$         | 100 °C   |
| Pressione di uscita turbina:   | $P2 =$         | 3 bar a  |
| Rendimento adiabatico turbina  | $\eta_{aad} =$ | 80 %     |

#### COSTANTI

|                                    |             |                |
|------------------------------------|-------------|----------------|
| Massa molecolare idrogeno:         | $MM =$      | 2 kg/kmol      |
| Costante universale dei gas ideali | $R =$       | 8.314 J/kmol K |
| Esp. adiabatica per gas biatomici  | $K=Cp/Cv =$ | 1,4            |

---

---

## SEZIONE 7 - ESERCIZI

### Esercizio n. 7.4

Un compressore deve comprimere ossigeno, che entra alla pressione  $P_1$ , alla temperatura  $T_1$  ed esce alla pressione  $P_2$ .

E' noto il rendimento adiabatico di compressione  $\eta_{aad}$ .

La portata di ossigeno è di  $G$ . Applicando le leggi dei gas ideali, calcolare:

1. la temperatura di uscita dell'ossigeno dal compressore;
2. la potenza assorbita dal compressore.

#### DATI

|                                    |                |            |
|------------------------------------|----------------|------------|
| Portata di ossigeno:               | $G =$          | 100 kg/h   |
| Pressione di ingresso compressore: | $P_1 =$        | 0,50 bar a |
| Temperatura ingresso compressore:  | $T_1 =$        | 10 °C      |
| Pressione di uscita compressore:   | $P_2 =$        | 8,0 bar a  |
| Rendimento adiabatico compressore: | $\eta_{aad} =$ | 80 %       |

#### COSTANTI

|                                    |               |                  |
|------------------------------------|---------------|------------------|
| Massa molare ossigeno:             | $MM =$        | 32 kg/kmol       |
| Costante universale dei gas ideali | $R =$         | 8.314,5 J/kmol K |
| Esp. adiabatica per gas biatomici  | $K=C_p/C_v =$ | 1,4              |

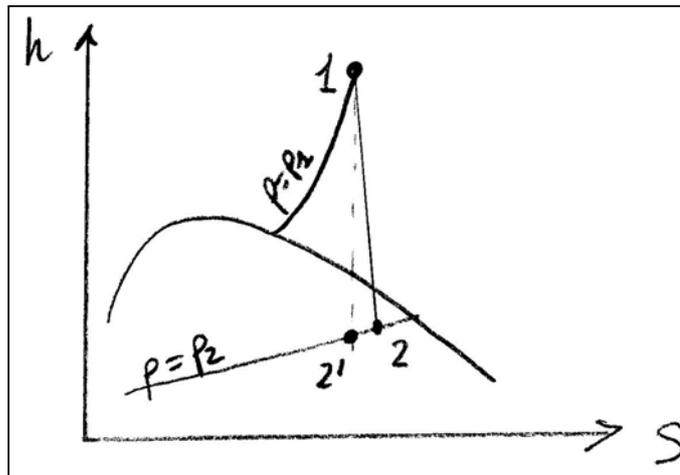
## SEZIONE 7- SOLUZIONI

### Esercizio n. 7.1

#### DATI

|                               |         |     |           |                            |
|-------------------------------|---------|-----|-----------|----------------------------|
| Pressione 1                   | P1 =    | 60  | bar a =   | 6.000.000 N/m <sup>2</sup> |
| Temperatura 1                 | T1 =    | 450 | °C =      | 723,15 K                   |
| Pressione 2                   | P2 =    | 0,1 | bar a =   | 10.000 N/m <sup>2</sup>    |
| Portata di vapore:            | G =     | 100 | t/h =     |                            |
|                               |         |     | 27,8 kg/s |                            |
| Rendimento adiabatico turbina | etaad = | 80  | %         |                            |

#### CALCOLI



| Punto | Pressione<br>(bar) | Temperatura<br>(°C) | Entalpia |           | entropia<br>kJ/kg K | titolo |
|-------|--------------------|---------------------|----------|-----------|---------------------|--------|
|       |                    |                     | (kJ/kg)  | (kcal/kg) |                     |        |
| 1     | 60                 | 450                 | 3.301,8  | 788,8     | 6,7193              | 1,000  |
| 2'    | 0,1                | 46                  | 2.128,2  | 508,4     | 6,7193              | 0,809  |
| 2     | 0,1                | 46                  | 2.362,9  | 564,5     | 7,4551              | 0,907  |

Prendendo la Tab. A.2, si legge che per la pressione P1 = 60,0 bar, la temperatura di saturazione è pari a Ts = 275,64°C; quindi, essendo T1 = 450°C, il vapore è surriscaldato. I valori di entalpia e entropia corrispondenti alla temperatura T1 = 450°C si leggono sulla Tab. A.3.1. (vedere riga 1 della tabella)

Considerando il punto di espansione ideale, questo si trova al di sotto della curva limite di saturazione con il valore di entropia pari a quello nel punto iniziale 1. Dall'entropia si calcola il titolo e l'entalpia di fine espansione ideale, come di seguito riportato:

$$\begin{aligned}
 X2' &= (s2' - sf) / (sg - sf) = && 0,809 \\
 h2' &= hf + (hg - hf) \times X2' = && 2.128 \text{ kJ / kg} \\
 \text{Avendo il rendimento adiabatico della turbina, si calcola il punto di fine espansione reale:} \\
 h2 &= h1 - (h1 - h2') \times \text{etaad} = && 2.363 \text{ kJ / kg} \\
 X2 &= (h2 - hf) / (hg - hf) = && 0,907 \\
 s2 &= sf + (sg - sf) \times X2 = && 7,455 \text{ kJ / kg K}
 \end{aligned}$$

La potenza resa realmente disponibile dal fluido è pari a:

$$P = G \times (h1 - h2) = 27,8 \text{ kg/s} \times (3301,8 - 2363) \text{ kJ/kg} = 26.079 \text{ kW}$$

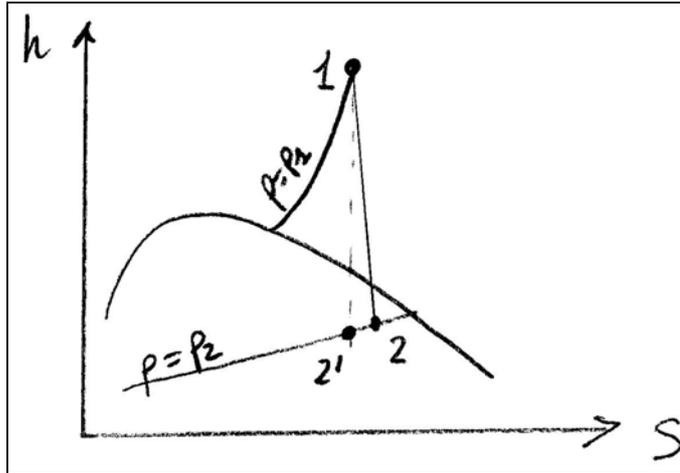
## SEZIONE 7- SOLUZIONI

### Esercizio n. 7.2

#### DATI

|                         |      |     |         |                            |
|-------------------------|------|-----|---------|----------------------------|
| Pressione 1             | P1 = | 80  | bar a = | 8.000.000 N/m <sup>2</sup> |
| Temperatura 1           | T1 = | 500 | °C =    | 773,15 K                   |
| Pressione 2             | P2 = | 0,3 | bar a = | 30.000 N/m <sup>2</sup>    |
| Lavoro massico prodotto | L =  | 880 | kJ/kg = |                            |

#### CALCOLI



| Punto | Pressione<br>(bar) | Temperatura<br>(°C) | Entalpia |           |
|-------|--------------------|---------------------|----------|-----------|
|       |                    |                     | (kJ/kg)  | (kcal/kg) |
| 1     | 80                 | 500                 | 3.398,2  | 811,8     |
| 2'    | 0,3                | 69                  | 2.267,1  | 541,6     |
| 2     | 0,3                | 69                  | 2.518,2  | 601,6     |

Prendendo la Tab. A.2, si legge che per la pressione P1 = 80,0 bar, la temperatura di saturazione è pari a Ts = 295,06°C; quindi, essendo T1 = 500°C, il vapore è surriscaldato. Il valore di entalpia corrispondente alla temperatura T1 = 500°C si legge sulla Tab. A.3.1.

Considerando il punto di espansione ideale, questo si trova al di sotto della curva limite di saturazione con il valore di entropia pari a quello nel punto iniziale 1. Dall'entropia si calcola il titolo e dal titolo l'entalpia di fine espansione ideale, in modo del tutto analogo al precedente esercizio. I valori sono riportati in tabella alla riga 2'.

Volendo, col dato relativo al lavoro massico prodotto, si può calcolare anche il punto di espansione reale

Il rendimento adiabatico della turbina è pari a:

$$\eta_{ad} = (h_1 - h_2) / (h_1 - h_{2'}) = 77,8 \%$$

## SEZIONE 7- SOLUZIONI

### Esercizio n. 7.3

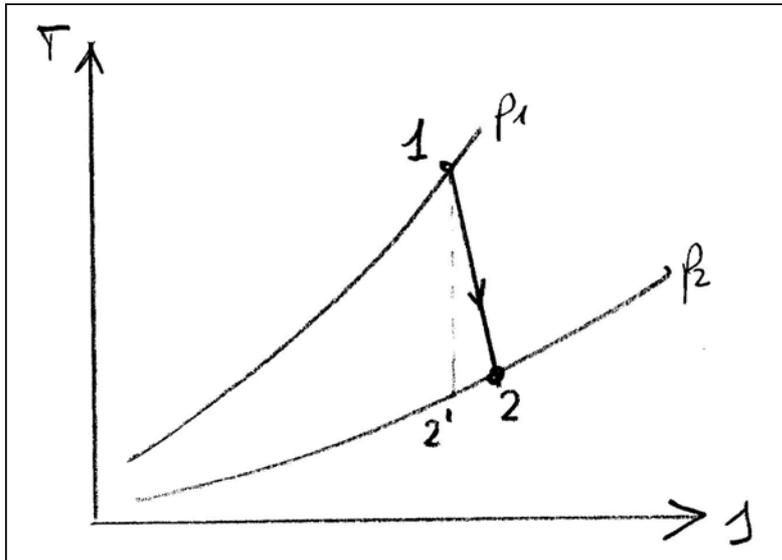
#### DATI

|                                |         |            |                            |
|--------------------------------|---------|------------|----------------------------|
| Portata di idrogeno:           | G =     | 500 kg/h = | 0,1389 kg/s                |
| Pressione di ingresso turbina: | P1 =    | 30 bar a = | 3.000.000 N/m <sup>2</sup> |
| Temperatura ingresso turbina:  | T1 =    | 100 °C =   | 373,15 K                   |
| Pressione di uscita turbina:   | P2 =    | 3 bar a =  | 300.000 N/m <sup>2</sup>   |
| Rendimento adiabatico turbina  | etaad = | 80 %       |                            |

#### COSTANTI

|                                    |           |                |
|------------------------------------|-----------|----------------|
| Massa molecolare idrogeno:         | MM =      | 2 kg/kmol      |
| Costante universale dei gas ideali | R =       | 8.314 J/kmol K |
| Esp. adiabatica per gas biatomici  | K=Cp/Cv = | 1,4            |

#### CALCOLI



Volume specifico idrogeno ingresso turbina:

$$v1 = R \times T1 / MM \times P1 = 0,517 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Volume specifico uscita turbina per espansione ideale:

$$v2' = v1 \times (P1/P2)^{(1/k)} = 2,678 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Temperatura ideale uscita turbina:

$$T2' = (P2 \times v2') / (R / MM) = 193 \text{ K} = -80 \text{ °C}$$

Calore specifico a pressione costante dell'idrogeno:

$$cp = 7/2 \times R / MM = 14.550 \text{ J/kg K} = 14,55 \text{ kJ/kg K}$$

Salto entalpico trasformazione ideale:

$$h1-h2' = Cp \times (T1-T2') = 2.617 \text{ kJ/kg}$$

Salto entalpico reale:

$$h1-h2 = (h1-h2') \times \text{etaad} = 2.094 \text{ kJ/kg}$$

Temperatura uscita idrogeno da turbina (trasformazione reale)

$$T2 = T1 - (T1-T2') \times \text{etaad} = 229 \text{ K} = -44 \text{ °C}$$

Potenza prodotta:

$$P = G \times (h1 - h2) = 291 \text{ kW} =$$

Essendo cp costante per i gas ideali, il salto entalpico reale si poteva calcolare anche determinando prima la temperatura T2 e poi  $h1-h2 = Cp (T1-T2)$

## SEZIONE 7- SOLUZIONI

### Esercizio n. 7.4

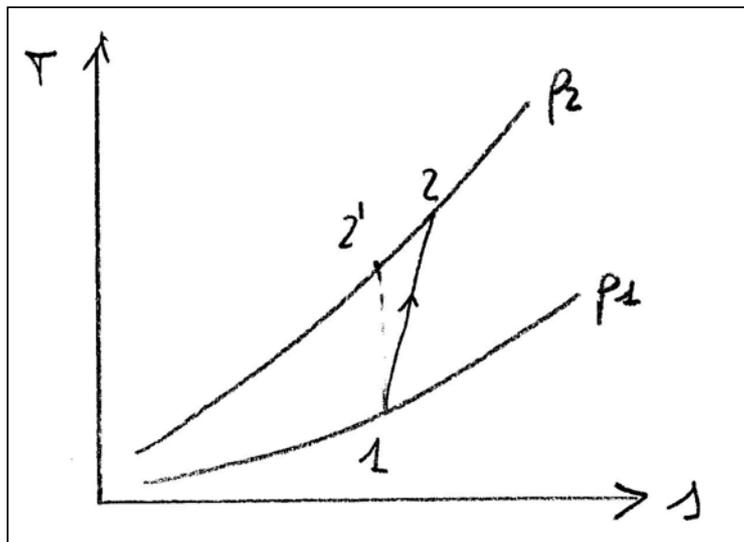
#### DATI

|                                    |         |             |                          |
|------------------------------------|---------|-------------|--------------------------|
| Portata di ossigeno:               | G =     | 100 kg/h =  | 0,0278 kg/s              |
| Pressione di ingresso compressore: | P1 =    | 0,5 bar a = | 50.000 N/m <sup>2</sup>  |
| Temperatura ingresso compressore:  | T1 =    | 10 °C =     | 283,15 K                 |
| Pressione di uscita compressore:   | P2 =    | 8,0 bar a = | 800.000 N/m <sup>2</sup> |
| Rendimento adiabatico compressore: | etaad = | 80 %        |                          |

#### COSTANTI

|                                    |           |                |  |
|------------------------------------|-----------|----------------|--|
| Massa molecolare ossigeno:         | MM =      | 32 kg/kmol     |  |
| Costante universale dei gas ideali | R =       | 8.315 J/kmol K |  |
| Esp. adiabatica per gas biatomici  | K=Cp/Cv = | 1,4            |  |

#### CALCOLI



Volume specifico ingresso compressore:

$$v_1 = R \times T_1 / MM \times P_1 = 1,471 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Volume specifico uscita compressore:

$$v_2' = v_1 \times (P_1/P_2)^{(1/k)} = 0,203 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Temperatura ideale uscita compressore:

$$T_2' = (P_2 \times v_2') / (R / MM) = 625,2 \text{ K} = 352,1 \text{ °C}$$

Temperatura reale uscita compressore:

$$T_2 = T_1 + (T_2' - T_1) / \text{etaad} = 711 \text{ K} = 438 \text{ °C}$$

Calore specifico a pressione costante dell'azoto:

$$c_p = 7/2 \times R / MM = 909 \text{ J/kg K} = 0,91 \text{ kJ/kg K}$$

Salto entalpico reale:

$$h_2 - h_1 = C_p \times (T_2 - T_1) = 388,9 \text{ kJ/kg}$$

Potenza prodotta:

$$P = G \times (h_2 - h_1) = 10,8 \text{ kW}$$