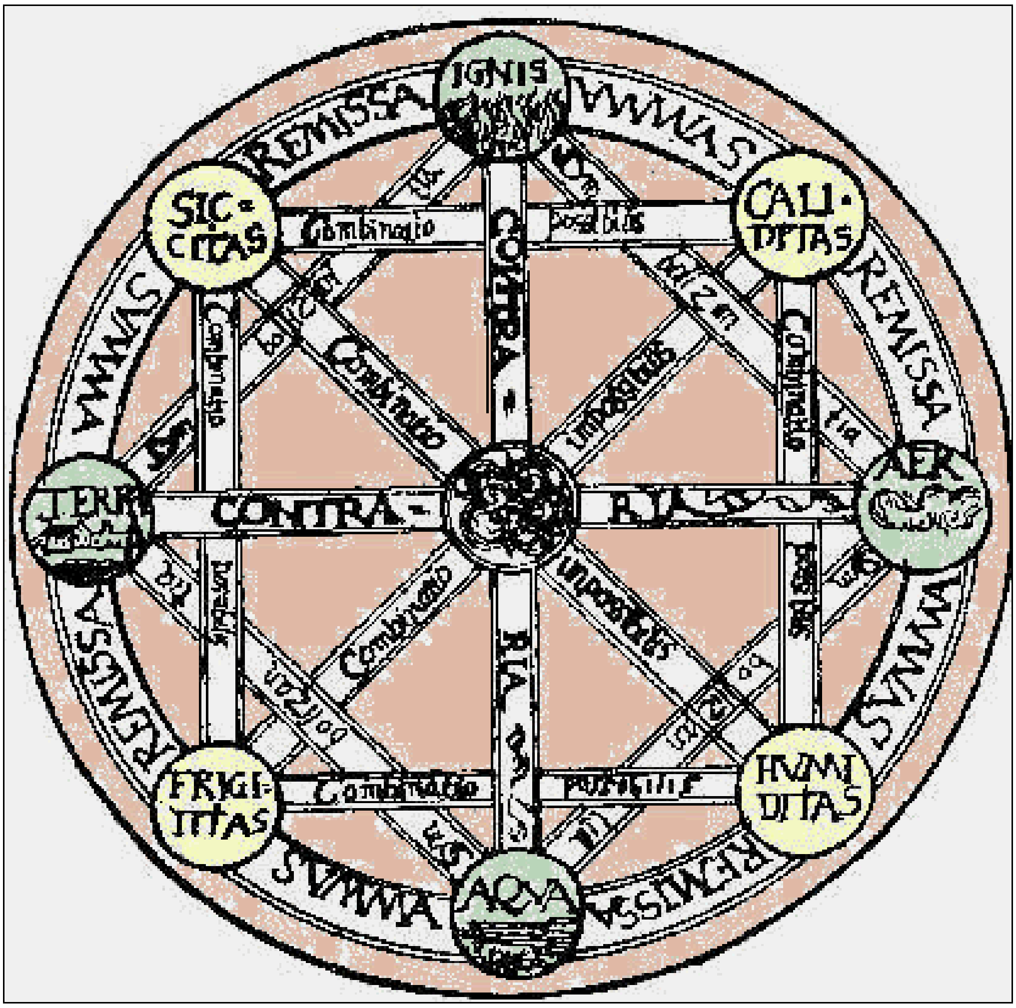
CORSO DI LAUREA IN DISEGNO INDUSTRIALE
A.A. 2006/07

FISICA TECNICA



Esercizi

Prof. Ing. Marco Beccali
Ing. Fulvio Ardente

Si ringrazia il Prof. Giuliano Dall'O'

Simbologia

Simbolo	Descrizione	Unità di misura
Q	Calore	J
U	Energia interna	J
L	Lavoro	J
H	Entalpia	J
S	Entropia	J
V	Volume	m^3
P	Pressione	Pa
T	Temperatura assoluta	K
t	Temperatura	°C
m	Massa	kg
R	Costante universale dei gas	J/mole K
g	Accelerazione di gravità	m/s^2
n	Numero di moli	
C_P	Calore specifico (o capacità termica specifica) a pressione costante	J/kg K
C_V	Calore specifico (o capacità termica specifica) a volume costante	J/kg K
γ	C_P/C_V	
η	Rendimento	

Convenzioni

Calore fornito dal sistema	negativo
Lavoro compiuto dal sistema	negativo

Parte Prima - Termodinamica

Esercizio 1.1 – Unità di misura

Dite quali delle seguenti unità di misura possono essere utilizzate per misurare l'energia termica

❑ kcal/h ❑ MWh ❑ kW/kg ❑ kW ❑ kcal
❑ nessuna delle risposte precedenti è giusta

Per misurare l'energia termica possono essere utilizzate le seguenti unità di misura:

- MWh
- kcal

La prima unità di misura è da preferire, in quanto unità di misura del Sistema Internazionale (SI)

Nota: In appendice sono riportate le tabelle di conversione tra le diverse unità di misura

Esercizio 1.2 – Unità di misura

Dite quali delle seguenti unità di misura possono essere utilizzate per misurare la potenza

❑ kcal/h ❑ MWh ❑ kW/kg ❑ kW ❑ kcal
❑ nessuna delle risposte precedenti è giusta

Per misurare la potenza possono essere utilizzate le seguenti unità di misura:

- kcal/h
- kW

La seconda unità di misura è da preferire, in quanto unità di misura del Sistema Internazionale (SI)

Nota: In appendice sono riportate le tabelle di conversione tra le diverse unità di misura

Esercizio 1.3 – Unità di misura

Trasformare le seguenti unità di misura, evidenziando i casi in cui ciò non è possibile

300 K	=	________	°C	❑ le unità di misura non sono coerenti
-120 °C	=	________	K	❑ le unità di misura non sono coerenti
127 °C	=	________	K	❑ le unità di misura non sono coerenti
25 °C (Δt)	=	________	K (Δt)	❑ le unità di misura non sono coerenti
257 Wh	=	________	J	❑ le unità di misura non sono coerenti
4500 kJ	=	________	kWh	❑ le unità di misura non sono coerenti
128 kJ/s	=	________	kJ	❑ le unità di misura non sono coerenti
12000 kcal	=	________	Wh	❑ le unità di misura non sono coerenti
10000 MW	=	________	Gcal/h	❑ le unità di misura non sono coerenti
200 HP	=	________	Wh	❑ le unità di misura non sono coerenti
10 Bar	=	________	Pa	❑ le unità di misura non sono coerenti
127 kg/cm^2	=	________	Pa	❑ le unità di misura non sono coerenti
120000 Pa	=	________	Bar	❑ le unità di misura non sono coerenti

In appendice sono riportate le tabelle di conversione tra le diverse unità di misura. Le unità di misura non coerenti sono le seguenti:

- kJ e kWh (la prima è una unità di energia, la seconda è anche una unità di energia)
- kJ/s e kJ (la prima è una unità di potenza mentre la seconda è una unità di energia)
- kcal e Wh (la prima è una unità di energia, la seconda è anche una unità di energia)
- HP e Wh (la prima è una unità di potenza mentre la seconda è una unità di energia)

Esercizio 1.4 – Unità di misura

Dite quali delle seguenti coppie di unità di misura è dimensionalmente omogenea

❑ kW e N ❑ kcal e J ❑ Nm e kW ❑ kWh e J/s ❑ kWh e kcal/h
❑ nessuna delle risposte precedenti è giusta

Svolgimento

Sono coerenti le seguenti unità di misura:
- kcal e J (due unità di misura dell'energia)

le altre unità di misura non sono coerenti.

Esercizio 1.5 – Energia potenziale

Un uomo di massa 70 kg compie un percorso di 5.000 m per salire da quota 200 m a quota 1.000 m. Determinare:

a) L'incremento di energia potenziale J [__549360__]

Svolgimento

L'incremento di energia potenziale non dipende dal percorso fatto ma dal dislivello relativo tra la quota iniziale della massa e la quota finale. Pertanto:

$$\Delta E_P = m \cdot \Delta h \cdot g = 70 \cdot (1000 - 200) \cdot 9{,}81 \left[kg \cdot m \cdot \frac{m}{s^2} \right] = 549360 \quad J$$

Esercizio 1.6 – Energia e potenza

Un motore elettrico di 25 kW di potenza è accoppiato ad un argano che deve sollevare una massa di 10.000 kg. Di quanti metri verrà sollevato il carico in 10 minuti primi, sapendo che il motore ha assorbito dalla rete costantemente una potenza di 20 kW ? (si consideri un rendimento del sistema pari al 40 %).

a) sollevamento argano m [__48,82_]

Svolgimento

L'energia elettrica assorbita nei 10 minuti primi è la seguente:

$$L_{ass} = 20 \ (kW) * \frac{10}{60} (h) = 3.33 \ (kWh)$$

Il lavoro effettivo di sollevamento è però penalizzato dal rendimento dell'argano e pertanto si riduce a:

$$L_{eff} = L_{ass} * \eta = 3{,}33 \ (kWh) * 0{,}4 = 1{,}332 \ (kWh)$$

Nel Sistema Internazionale l'unità di misura utilizzata per esprimere il calore, l'energia ed il lavoro è il J (joule). Siccome 1 W = 1 J/s, per trasformare l'unità di misura occorrerà eseguire il seguente passaggio:

$$L_{eff} = 1{,}332 * 1000 * 3600 = 4{,}79 * 10^6 \quad (J)$$

Ricordando che l'energia potenziale U è esprimibile mediante l'equazione:

$$\Delta U = m * g * \Delta h$$

dove m è la massa, g l'accelerazione di gravità (9,81 m/s^2) e Δh il dislivello, nel nostro caso l'incognita è proprio il dislivello, essendo invece nota l'energia potenziale U che equivale a L_{eff}.

$$\Delta h = \frac{\Delta U}{m * g} = \frac{4{,}79 * 10^6}{10.000 * 9{,}81} = 48{,}82 \quad (m)$$

Esercizio 1.7 - Calore specifico

Ad un blocco di calcestruzzo di 200 kg è fornita una quantità di calore pari a 700 Wh che innalza la sua temperatura da 20 °C a 35 °C
Trascurando le perdite di calore verso l'ambiente esterno, determinare:

a) il calore specifico del calcestruzzo Wh/kg K [___0,23__]

Svolgimento

Per risolvere questo esercizio si applica la relazione: $Q = m \cdot c_p \cdot \Delta t$
che deve essere esplicitata in funzione del calore specifico incognito c_p.

$$c_p = \frac{Q}{m \cdot \Delta t} = \frac{700}{200 \cdot (35 - 20)} = 0{,}23 \quad \left[\frac{Wh}{kg \cdot K}\right]$$

Esercizio 1.8 - Primo principio

3 m^3 di acqua vengono scaldati da 10 °C a 90 °C con un generatore di calore che fornisce una potenza termica pari a 40 kW.
Determinare:

a) La quantità di calore da fornire all'acqua kJ [_1.003.200]
b) Il tempo necessario ore [__6,97__]
c) Il combustibile utilizzato supponendo che questo abbia un potere calorifico Pari a 41,8 MJ/kg kg [__24___]

Dati: densità ρ dell'acqua 1000 kg/m^3

Svolgimento

La massa dell'acqua è calcolata con la relazione: $m = V \cdot \rho = 3 \cdot 1000 \left[m^3 \cdot \frac{kg}{m^3}\right] = 3000 \quad kg$

la quantità di calore da fornire all'acqua è ricavabile dalla relazione:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta t = 3000 \cdot 4{,}18 \cdot (90 - 10) \quad \left[kg \cdot \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot K\right] = 1.003.200 \quad kJ$$

Noto il valore dell'energia necessaria Q, il tempo necessario per riscaldare l'acqua, nota la potenza termica disponibile, è ricavabile dalla relazione: $\dot{Q} = \frac{Q}{t}$ esplicitando il tempo:

$$t = \frac{Q}{\dot{Q}} = \frac{1.003.200}{40} \left[\frac{kJ}{kW\left(\text{oppure } \frac{kJ}{s}\right)} \right] = 25.080 \quad s/3600 = 6{,}97 \quad \text{ore}$$

Il potere calorifico di un combustibile esprime la quantità di energia che il combustibile è in grado di generare, attraverso la combustione, per unità di massa.
Il consumo di combustibile, pertanto, sarà ricavato dal rapporto tra l'energia che occorre fornire e il potere calorifico del combustibile stesso:

$$Q_{comb} = \frac{Q}{PCI} = \frac{1.003}{41{,}8} \left[\frac{MJ}{\frac{MJ}{kg}} \right] \cong 24 \quad kg$$

Esercizio 1.9 – Rappresentazione ciclo termodinamico

Sul piano (p,V) viene rappresentato un ciclo termodinamico. L'area racchiusa dalle trasformazioni rappresenta:

- ❑ il calore scambiato con l'esterno ❑ il lavoro scambiato con l'esterno ❑ la variazione di energia interna
- ❑ nessuna delle risposte precedenti è giusta

Svolgimento

In un diagramma con assi p, V, l'area racchiusa dal ciclo termodinamico rappresentato corrisponde al lavoro L scambiato con l'esterno. Se la sequenza delle trasformazioni segue un ciclo orario, il lavoro è positivo (ossia è fatto dal sistema verso l'ambiente esterno), se segue in ciclo antiorario il lavoro è negativo (ossia è subito dal sistema).
In una macchina termica il lavoro è positivo mentre in una macchina frigorifere (oppure una pompa di calore) il lavoro è negativo.

Esercizio 1.10 – Rappresentazione ciclo termodinamico

Sul piano (T, S) viene rappresentato un ciclo termodinamico. L'area racchiusa dalle trasformazioni rappresenta:

- ❑ il calore scambiato con l'esterno ❑ il lavoro scambiato con l'esterno ❑ la variazione di entropia
- ❑ nessuna delle risposte precedenti è giusta

Svolgimento
In un diagramma con assi T, S, l'area racchiusa dal ciclo termodinamico rappresentato corrisponde al lavoro L scambiato con l'esterno. Se la sequenza delle trasformazioni segue un ciclo orario, il lavoro è positivo (ossia è fatto dal sistema verso l'ambiente esterno), se segue in ciclo antiorario il lavoro è negativo (ossia è subito dal sistema).
In una macchina termica il lavoro è positivo mentre in una macchina frigorifere (oppure una pompa di calore) il lavoro è negativo.

Esercizio 1.11 – Primo principio, variazione della temperatura di un gas

La temperatura di un gas ideale che cede calore all'ambiente che lo circonda:

- ❑ diminuisce sempre ❑ diminuisce se il sistema cede anche lavoro ❑ aumenta
- ❑ dati insufficienti per valutare

Svolgimento

La risposta giusta è la seconda (diminuisce se il sistema cede anche lavoro). Per un gas ideale, infatti, ΔU è funzione unicamente di T. Il primo principio ci assicura che se il sistema cede sia calore, sia lavoro, diminuisce la propria energia interna, per cui anche la sua temperatura.

Esercizio 1.12 – Grandezze termodinamiche

Indicare quale/i grandezze non dipendono dal percorso di una trasformazione

- ❑ pressione
- ❑ temperatura
- ❑ entalpia
- ❑ lavoro
- ❑ energia interna
- ❑ calore
- ❑ volume
- ❑ entropia

Svolgimento

Non dipendono dal percorso della trasformazione tutte le variabili di stato o le grandezze funzioni di variabili di stato. (pressione, temperatura, entalpia, energia interna, volume, entropia). Queste, infatti, dipendono unicamente dallo “stato” in cui si ritrova il sistema, non dal percorso utilizzato per raggiungerlo. Viceversa le energie in transito tra sistemi, come il calore e il lavoro, dipendono da come avvengono gli scambi energetici durante le trasformazioni fisiche.

Esercizio 1.13 – Primo principio, variazione della temperatura di un gas

In una trasformazione isoterma di un gas ideale:

- ❑ se forniamo calore otteniamo lavoro
- ❑ se forniamo calore dobbiamo fornire anche lavoro
- ❑ la pressione aumenta con l’aumentare del volume
- ❑ l’energia interna varia sempre

Svolgimento

La risposta giusta è la prima (se forniamo calore otteniamo lavoro). Se la trasformazione è isoterma, infatti, ne consegue che U è costante ($\Delta U = 0$), quindi $L = -Q$.

Esercizio 1.14 – Primo principio, potenza termica

In uno spogliatoio si considerano contemporaneamente in funzione 15 docce, ciascuna con una portata volumica di 10 litri/minuto. Calcolare la potenza termica del sistema di produzione del calore, nell’ipotesi che all’acqua venga fornito un incremento di temperatura di 35 K.

a) Potenza termica del sistema kW [__365 _]

Dati: densità dell’acqua $\rho = 1$ kg/l, c_p acqua = 4,18 kJ/kg K

Svolgimento

la portata in massa per ciascuna doccia è data da: $V \cdot \rho = 10 \cdot 1 = 10$ kg/minuto

La portata di acqua calda (massa nell’unità di tempo) è data da:

$$\dot{m} = 15 \cdot 10 = 150 \frac{kg}{min} \cdot \frac{1}{60} = 2{,}5 \ \ \frac{kg}{s}$$

La potenza termica da fornire all’acqua è ricavabile dalla relazione:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta t = 2{,}5 \cdot 4{,}18 \cdot 35 \ \left[\frac{kg}{s} \cdot \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot K \right] = 365 \ \ kW$$

Esercizio 1.15 – Calore specifico

Un sistema di accumulo è costituito da un serbatoio contenente 10 m^3 di acqua. Se in una certa fase di funzionamento l'accumulatore modifica la sua temperatura media da 20 °C a 40 °C, determinare:

a) quanta energia termica è stata accumulata kJ [_836.000_]
b) di quanto occorrerebbe innalzare la temperatura dell'accumulo, partendo sempre da 20 °C, nell'ipotesi di voler accumulare il 50% in più dell'energia termica rispetto a quella del punto a) K [_40____]

Dati: c_p acqua = 4,18 kJ/kg K, densità ρ acqua = 1000 kg/m^3

Svolgimento

La massa dell'acqua contenuta nel serbatoio è pari a $m = V \cdot \rho = 10 \cdot 1000 = 10.000$ kg
La quantità di energia termica accumulata è pari a:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta t = 10000 \cdot 4{,}18 \cdot (40 - 20) \ \left[kg \cdot \frac{kJ}{kg \cdot K} K \right] = 836.000 \ \ kJ$$

Volendo accumulare il doppio dell'energia termica, ossia 836.000 x 2 = 1.672.000 kJ, l'incremento di temperatura sarebbe pari a:

$$\Delta t = \frac{Q}{m \cdot c_p} = \frac{1.672.000}{10000 \cdot 4{,}18} = 40 \ \ K$$

Esercizio 1.16 – Calore specifico

Si vuole accumulare una quantità di energia termica pari a 10000 kWh mediante un accumulo liquido di capacità incognita ed ottenendo un salto termico di 10 °C. Calcolare detta capacità nel caso in cui si impieghino i seguenti liquidi:

a) Acqua (Cp = 4,18 kJ/kg°C, densità ρ = 1000 kg/m^3) m^3 [_821_]
b) Olio (Cp = 1,67 kJ/kg°C, densità ρ = 900 kg/m^3) m^3 [_2395_]

Svolgimento

E' conveniente innanzi tutto uniformare le unità di misura a quelle del SI:

Q = 10.000 kWh . 3.600 = 36.000.000 kJ

Dalla relazione base: $Q = m \cdot c_p \cdot \Delta t$ si esplicita la massa. Si avranno pertanto i tre casi:

Acqua $$m = \frac{Q}{c_p \cdot \Delta t} = \frac{36.000.000}{4{,}18 \cdot 10} \left[\frac{kJ}{\frac{kJ}{kg \cdot K} K} \right] = 861.244 \ \ kg$$

Olio $$m = \frac{Q}{c_p \cdot \Delta t} = \frac{36.000.000}{1{,}67 \cdot 10} \left[\frac{kJ}{\frac{kJ}{kg \cdot K} K} \right] = 2.155.688 \ \ kg$$

Per passare dalla massa al volume:

Acqua $V = \frac{m}{\rho} = \frac{821.244}{1000} \left[\frac{kg}{\frac{kg}{m^3}} \right] \cong 821 \quad m^3$

Olio $V = \frac{m}{\rho} = \frac{2.155.688}{900} \left[\frac{kg}{\frac{kg}{m^3}} \right] \cong 2395 \quad m^3$

Esercizio 1.17 – Calore specifico, potenza termica

In uno scalda-acqua istantaneo a gas da 5 l/min si valuti la quantità di calore necessaria per erogare continuamente acqua alla temperatura di 55 °C in un periodo di tempo di 1 ora (si supponga che la temperatura iniziale dell'acqua sia pari a 12 °C)

a)	Quantità di calore	Wh	[_14.978_]
b)	Potenza dello scalda-acqua istantaneo	W	[_14.978_]
c)	Calcolare il consumo orario di gas (potere calorifico = 36 MJ/m^3)	m^3 /h	[_1,50_]

Dati: cp acqua = 4,18 kJ/kg K, densità ρ acqua = 1 kg/l

Svolgimento

La massa d'acqua erogata in un'ora è data da:

$$m = 5 \left[\frac{l}{min} \right] \cdot 60 \left[\frac{min}{h} \right] \cdot 1 \; [h] \cdot 1 \left[\frac{kg}{l} \right] = 300 \; [kg]$$

la quantità di calore che è necessario fornire è data dalla relazione:

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta t = 300 \cdot 4{,}18 \cdot$$

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta t = 300 \cdot 4{,}18 \cdot (55 - 12) \left[kg \cdot \frac{kJ}{kg \cdot K} K \right] = 53.922 \quad kJ / 3{,}6 = 14.978 \quad Wh$$

la potenza termica è ricavabile dal rapporto tra l'energia fornita ed il tempo, nel nostro caso:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} = \frac{14.978}{1} \left[\frac{Wh}{h} \right] = 14.978 \quad W$$

Il consumo orario di combustibile è dato dalla relazione:

$$Q_{comb} = \frac{\dot{Q}}{PCI} = \frac{14{,}978 \cdot 3600}{36 \cdot 1000} \left[\frac{kW \left(oppure \frac{kJ}{s} \right) \cdot 3600}{\frac{MJ}{m^3} \cdot 1000} \right] = 1{,}50 \quad \frac{m^3}{h}$$

Esercizio 1.18 – Potenza ed energia

Un ambiente è riscaldato mediante una stufa elettrica da 1 kW che sta accesa per 8 ore al giorno. Determinare :

a) Quanti kJ vengono immessi nell'ambiente in un mese di 30 giorni? kJ [_864.000_]

L'energia necessaria si ricava direttamente moltiplicando la potenza per il tempo (per comodità trasformato in secondi):

$$Q = \dot{Q} \cdot t = 1 \cdot (8 \cdot 30 \cdot 3.600) \quad \left[kW \quad o \quad \frac{kJ}{s} \cdot s \right] = 864.000 \quad kJ$$

Esercizio 1.19 – Gas

A quale pressione 1 kg di aria occupa 1 litro di volume?

- ❑ 1 atmosfera ❑ dipende dalla temperatura ❑ 871 bar
- ❑ 1,2 kg/m^2

Dati: si consideri l'aria un gas perfetto: R aria = 287 J/kg K)

Svolgimento

La risposta giusta è la seconda (dipende dalla temperatura). Considerando l'aria un gas perfetto, infatti, si può fare riferimento all'equazione di stato: pV = nRT.
Poiché n ed R sono costanti e, in questo esercizio anche V, si deduce che la pressione è linearmente dipendente con la temperatura.

Esercizio 1.20 – Gas perfetti

Quante moli di un gas ideale monoatomico alla pressione di 50 kPa e temperatura di 30 °C sono contenute in un recipiente con volume pari ad un litro?

a) Numero moli [_____0,02__]

Svolgimento

Essendo un gas ideale, possiamo applicare l'equazione di stato dei gas perfetti: pV= nRT. Fatte le conversioni delle unità di misura, il numero n di moli vale:

$$n = \frac{pV}{RT} = \frac{50000 \cdot 0{,}001}{8{,}314 \cdot (50 + 273)} \left[\frac{Pa \cdot m^3}{\frac{J}{moli \cdot K} K} \right] = 0{,}019848 \cong 0{,}02 \quad moli$$

Esercizio 1.21 – Aria

Dell'aria, contenuta in un recipiente con volume pari a 1 litro si trova alla pressione di 50 kPa alla temperatura di 30 °C. Determinare:

a) La massa dell'aria contenuta nel recipiente g [__0,57___]

Dati: R aria aria = 287 J/kg K)

Svolgimento

Possiamo considerare l'aria un gas ideale ed applicare pertanto l'equazione di stato dei gas perfetti: pV= mR[1]T. Si noti in questo caso, essendo l'incognita la massa espressa, sia necessario utilizzare la costante R specifica del gas. Fatte le conversioni delle unità di misura, la massa dell'aria contenuta nel recipiente vale:

$$m = \frac{pV}{RT} = \frac{50000 \cdot 0{,}001}{287 \cdot (50+273)} \left[\frac{\mathrm{Pa} \cdot \mathrm{m}^3}{\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{K}} \mathrm{K}} \right] = 0{,}575 \cdot 10^{-3}\, \mathrm{kg} = 0{,}575 \quad \mathrm{g}$$

Esercizio 1.22 – Trasformazione di un gas perfetto

Durante una trasformazione 2,5 kg di gas perfetto diminuiscono la temperatura di 8 K. Se il gas ha assorbito 84.000 J da un pistone che lo comprime, quanta potenza termica cede se il sistema funziona per 10 secondi?.

a) potenza termica kW [__10,8___]

Dati: c_v= 1200 J/kg K

Svolgimento

Per questa trasformazione la variazione di energia interna è ricavabile dalla relazione:

$$\Delta U = m \cdot c_v \cdot \Delta T = 2{,}5 \cdot 1200 \cdot 8 \quad \left[\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{K}} \cdot \mathrm{K} \right] = 24000 \quad \mathrm{J} = 24\, \mathrm{kJ}$$

La potenza termica ceduta è ricavabile dal rapporto tra il calore scambiato dal sistema ed il tempo:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} = \frac{\Delta U - L}{t} = \frac{24000 - (-84000)}{10} \quad \left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}} \right] = 10800 \quad \mathrm{W} = 10{,}8 \quad \mathrm{kW} \ \text{(potenza uscente)}$$

Esercizio 1.23 - Trasformazione isobara

Quanto vale la temperatura finale di una massa d'aria unitaria se le viene sottratta, con processo isobaro, una quantità di calore Q pari a 90 kJ?

a) temperatura finale °C [__-90___]

Dati: c_p aria= 1000 J/kg K, ti = 0 °C (= 273 K) , p= 1 bar

Svolgimento

Essendo un processo isobaro, il salto entalpico coincide con il calore scambiato, perciò:

$$\Delta H = Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T\,,$$

per cui: $$\Delta T = \frac{Q}{m \cdot c_p} = \frac{90000}{1 \cdot 1000} \left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg} \cdot \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg} \cdot \mathrm{K}}} \right] = 90 \quad \mathrm{K}$$

La temperatura finale sarà pertanto uguale a: 273-90=183 K (≅ -90 °C)

Esercizio 1.24 - Gas perfetti

Spiegare perché un gas perfetto che cede potenza termica per 1000 W e assorbe in un'ora 7200 kJ non può diminuire, a seguito di questi scambi energetici, la propria temperatura.

Svolgimento

Il bilancio di primo principio ci dice che: $\Delta U = Q + L$
Nel nostro caso, L = 7200 kJ e Q = 1000 · (1 · 3,6) = 3600 kJ, quindi: ΔU = 3600 + 7200 = 10800 kJ

Poiché per un gas perfetto l'energia interna è funzione della temperatura, ne segue che, visto che la variazione dell'energia interna è positiva, anche la temperatura deve crescere.

Esercizio 1.25 - Ciclo termodinamico

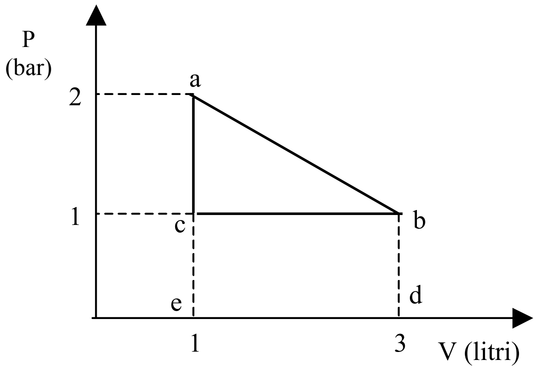
Una mole di gas perfetto monoatomico compie un ciclo come quello indicato in figura. Determinate per ognuna delle trasformazioni e per l'intero ciclo:

a)	il lavoro scambiato L	J	[_-100_]
b)	la variazione di energia interna ΔE	J	[__0_]

sapendo che il calore introdotto nel ciclo Q è il seguente:

-	tratto a-b	800	J
-	tratto c-b	- 950	J
-	tratto c-a	250	J

(Ricordando la convenzione adottata: calore fornito dal sistema negativo, lavoro compiuto dal sistema negativo).



Svolgimento

Si determinano le pressioni ed i volumi nei punti a, b e c con unità di misura del Sistema Internazionale:

1 bar = 100.000 Pa, quindi P_a = 200.000 Pa e $P_c = P_b$ =100.000 Pa
$V_a = V_c = 0{,}001\ m^3$ e $V_b = 0{,}003\ m^3$.

Trasformazione a-b
Il lavoro L lungo la trasformazione a-b è rappresentato dall'area sottesa dal trapezio a-b-d-e-a e può essere calcolato con la relazione:

$L_{a-b} = (P_a + P_b) * (V_b - V_a) / 2$

quindi
L_{a-b} = (200.000 + 100.000) * (0,003 - 0,001) / 2 = - 300 J

Il valore trovato risulta negativo in quanto, per convenzione, si considerano positivi il calore Q ed il lavoro L forniti al sistema.
Nel tratto a-b viene fornita al sistema una quantità di calore Q_{a-b} pari a 800 J.

Applicando l'espressione generale del Primo Principio della Termodinamica, la variazione di energia interna

$dE = \delta Q + \delta L$

Nel nostro caso si otterrà che:

$\Delta E_{a\text{-}b} = Q_{a\text{-}b} + L_{a\text{-}b} = 800 - 300 = 500$ J.

<u>Trasformazione b-c</u>
Il lavoro lungo la trasformazione b-c è rappresentato dall'area sottesa dal rettangolo b-c-e-d-b e vale pertanto:

$L_{b\text{-}c} = (V_b - V_c) * P_b$

quindi

$L_{b\text{-}c} = (0{,}003 - 0{,}001) * 100.000 = 200$ J

Nel tratto b-c viene fornita al sistema una quantità di calore $Q_{b\text{-}c}$ pari a - 950 J (quindi per convenzione il calore viene sottratto).

$\Delta E_{b\text{-}c} = Q_{b\text{-}c} + L_{b\text{-}c} = -950 + 200 = -750$ J.

<u>Trasformazione c-a</u>
La trasformazione c-a è una trasformazione a volume costante (isocora). Lungo una trasformazione di questo tipo L = 0 e la variazione di energia interna E dipende unicamente dal calore scambiato Q.
Nel tratto c-a viene fornita al sistema una quantità di calore $Q_{c\text{-}a}$ pari a 250 J.

$\Delta E_{c\text{-}a} = Q_{b\text{-}c} = 250$ J.

Il bilancio del ciclo in esame risulta pertanto il seguente:

Trasformazione	*ΔE*	*Q*	*L*
a-b	500	800	-300
b-c	-750	-950	200
c-d	250	250	0
ciclo a-b-c-d	0	100	-100

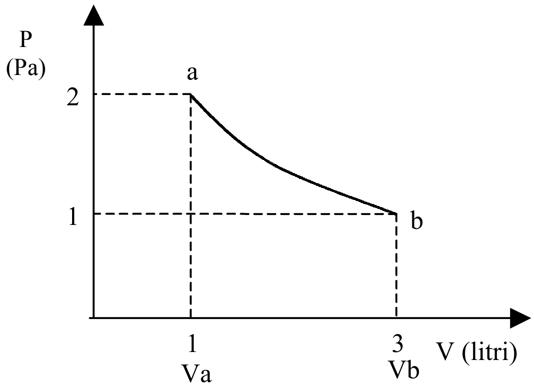
Esercizio 1.26 – Espansione isoterma

Una mole di gas perfetto monoatomico compie una espansione lungo una isoterma secondo lo schema illustrato in figura.

Condizioni iniziali (punto a): Pressione = 2 bar
Volume = 1 litro
Condizioni finali (punto b): Volume = 3 litri

Calcolare il lavoro compiuto durante la trasformazione a-b e la pressione che si avrà quando il gas raggiungerà il punto b.

a) il lavoro scambiato L durante la trasformazione a-b J [-219]
b) la pressione del gas nel punto b Pa [__66560_]



Svolgimento

In una trasformazione quasi statica finita, in cui il volume passa da V_1 a V_2, il lavoro vale:

$$L = -\int_{V_1}^{V_2} P dV$$

Ricordando l'equazione di stato per un gas ideale:

P V = n R T

dove: V è il volume occupato dal gas
n è il numero delle moli del gas
R è la costante universale dei gas (8,32 J/mole K)

e ponendo: $P = \frac{nRT}{V}$

$$L = -\int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V} dV \quad \text{da cui} \quad L = -nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V}$$

ed integrando nel tratto V_1 - V_2 si otterrà l'espressione che permette di calcolare il lavoro lungo una trasformazione isoterma:

$$L = nRT \ln \frac{V_1}{V_2}$$

Per calcolare il lavoro lungo il tratto a-b è necessario conoscere la temperatura alla quale avviene la trasfomazione. Dall'equazione di stato dei gas si avrà che:

$$T = \frac{P_a V_a}{R}$$

ricordando che 1 bar = 100.000 Pa, P_a = 2 x 100.000 = 200.000 Pa

$$T = \frac{200.000 * 0,001}{8,32} = 24 \ \text{K}$$

L_{a-b} sarà pertanto ricavabile dall'espressione del lavoro lungo una isoterma (trattandosi di una mole di gas, n=1) :

$$L_{a-b} = 8,32 * 24 * \ln\left(\frac{0,001}{0,003}\right) = -219 \text{ J}$$

La pressione finale P_b è ancora ricavabile dall'equazione di stato dei gas:

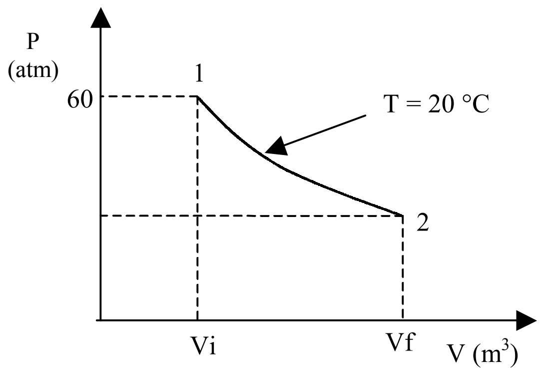
$$P_b = \frac{RT}{V_b} = \frac{8{,}32 \times 24}{0{,}003} = 66560 \text{ Pa} = 0{,}665 \text{ bar}$$

Esercizio 1.27 - Espansione isoterma

Un cilindro contiene aria che è posta alle seguenti condizioni iniziali:

Temperatura	20 °C
Volume	0,1 m^3
Pressione	60 atm

L'aria contenuta nel cilindro subisce una espansione isoterma passando ad un volume finale di 0,3 m^3. Considerando l'aria come un gas perfetto e supponendo che la trasformazione sia quasi statica determinare il lavoro lungo la trasformazione [667478 J]



Svolgimento

Nel caso in esame il lavoro lungo una espansione isoterma si calcola mediante l'equazione:

$$L = mR_1T \ln \frac{V_1}{V_2}$$

dove

m	è la massa del gas interessato alla trasformazione, in questo caso	aria (kg)
R_1	è la costante riferita al tipo di gas impiegato, in questo caso uguale	a 288 $\frac{J}{kgK}$

Per risolvere l'equazione è innanzi tutto necessario conoscere la massa d'aria contenuta nel cilindro. Il valore della massa può essere ricavato dall'equazione generale di stato dei gas:

$$PV = mR_1T$$

La pressione iniziale di 60 atm corrisponde a 60 * 101.325 = 6.079.500 Pa
Mentre la temperatura, espressa in K, è pari a 20 + 273 °C = 293 K

la massa risulta pertanto pari a:

$$m = \frac{PV}{R_1T} = \frac{6.079.500 \cdot 0{,}1}{288 \cdot 293} \cong 7{,}2\text{kg}$$

Essendo il lavoro lungo una trasformazione isoterma ricavabile dalla relazione:

$$L = -mR_1T \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

$$L = -7{,}2(\text{kg}) \cdot 288\left(\frac{J}{kgK}\right) \cdot 293(K) \cdot \ln\left(\frac{0{,}3(m^3)}{0{,}1(m^3)}\right) = -667.478(J)$$

Esercizio 1.28 - Espansione isobara

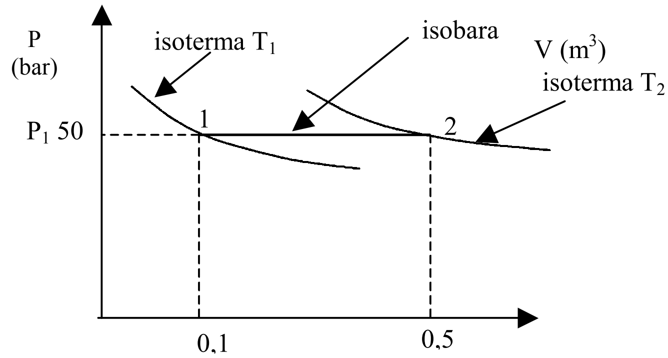
Dell'aria compie un'espansione isobara alla pressione di 60 bar passando da un volume iniziale di 0,1 m^3 ad un volume finale di 0,3 m^3.

Ipotizzando che l'aria si trovi ad una temperatura iniziale di 20 °C determinare, lungo la trasformazione:

a) il lavoro compiuto L	J	[2000000]
b) il calore scambiato Q	J	[7000000]
c) la variazione di energia interna ΔU	J	[5000000]
d) la variazione di entalpia ΔH	J	[7000000]

Temperatura	20 °C
Volume	0,1 m^3
Pressione	60 atm

Ipotizzare l'aria come un gas perfetto biatomico (R^I aria = 288 J/kg K) e la trasformazione quasi statica



Svolgimento

E' innanzi tutto necessario calcolare la massa dell'aria in questione. Dall'equazione di stato dei gas perfetti:

$P \cdot V = m \cdot R^1 * T$ da cui: $m = \dfrac{P * V}{R^1 * T}$

e sostituendo i valori:

$$m = \frac{5.0000.000 \ (Pa) * 0{,}1 \left(m^3\right)}{288 \left(\dfrac{J}{kg \quad K}\right) * 293 \ (K)} = 5{,}92 \ (kg)$$

Il lavoro lungo la trasformazione si può calcolare applicando l'equazione:

$L_{1-2} = -P \cdot (V_2 - V_1)$

da cui $L_{1-2} = -5.000.000 \cdot (0{,}5 - 0{,}1) = -2.000.000 \ (J)$

oppure l'equazione: $L_{1-2} = -m * R^1 * (T_2 - T_1)$

In questo caso, però, occorre calcolare la temperatura del gas nel punto 1. T_2 la si può ricavare applicando l'equazione di stato dei gas perfetti nei punti 1 e 2:

$P_1 * V_1 = m * R^1 * T_1$

$P_2 * V_2 = m * R^1 * T_2$

Dividendo membro a membro e semplificando ($P_1 = P_2$) si otterrà che:

$\dfrac{V_1}{V_2} = \dfrac{T_1}{T_2}$ da cui $T_2 = \dfrac{T_1 * V_2}{V_1} = \dfrac{293 * 0{,}5}{0{,}1} = 1.465 \ (K)$

Quindi: $L_{1-2} = -5{,}95 * 288 * (1.465 - 293) \cong -2.000.000 \ (J)$

Il calore scambiato può essere calcolato con l'equazione:

$Q_{1-2} = m * C_P * (T_2 - T_1)$

Trattandosi di un gas biatomico, $C_P = \frac{7}{2} * \ R^1 = \frac{7}{2} * \ 288 = 1.008 \ \left(\frac{J}{kg\,K} \right)$, quindi:

$$Q_{1-2} = 5{,}92 * 1.008 * (1.465 - 293) \cong 7.000.000 \ \ (J)$$

la variazione di energia interna può essere calcolata applicando il primo principio della Termodinamica:

$$dU = \delta Q + \delta L$$

da cui

$$\Delta U_{1-2} = 7.000.000 - 2.000.000 = \ \ 5.000.000 \ \ (J)$$

oppure l'equazione:

$$\Delta U_{1-2} = m * C_V * (T_2 - T_1)$$

Trattandosi di un gas biatomico, $C_V = \frac{5}{2} * \ R^1 = \frac{5}{2} * \ 288 = 720 \ \left(\frac{J}{kg\,K} \right)$, quindi:

$$\Delta U_{1-2} = 5{,}92 * 720 * (1.465 - 293) \cong 5.000.000 \ \ (J)$$

La variazione di entalpia può essere calcolata con la relazione:

$$\Delta H_{1-2} = m * C_P * (T_2 - T_1)$$

In una trasformazione isobara la variazione di entalpia eguaglia il calore scambiato, per cui:

$$\Delta H_{1-2} = Q_{1-2} = \ \ 7.000.000 \ \ (J)$$

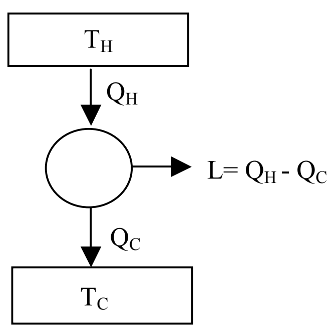
Esercizio 1.29 – Ciclo di Carnot

Un ciclo di Carnot scambia energia tra due sorgenti che si trovano rispettivamente alla temperatura di 800 °C (T_H) e 100 °C (T_C) assorbendo alla sorgente calda 1000 kJ (Q_H).
Determinare:

a)	il rendimento del ciclo		[__0,65 __]
b)	il lavoro prodotto dal ciclo L	kJ	[__650 _]
c)	il calore ceduto alla sorgente fredda Q_C	kJ	[__350 _]

Svolgimento

Riportiamo a fianco lo schema del ciclo



Prima di procedere nei calcoli è opportuno uniformare le unità di misura:

T_H = 800 °C + 273 = 1073 K

T_C = 100 °C + 273 = 373 K

Il rendimento della macchina che opera secondo un ciclo di Carnot (macchina ideale) può essere calcolato in funzione delle temperature delle due sorgenti:

$$\eta_{carnot} = \frac{T_H - T_C}{T_H} = \frac{1073 - 373}{1073} = 0{,}65$$

Il lavoro prodotto vale pertanto: $L = Q_H \cdot \eta = 1000 \cdot 0{,}65 = 650 \quad kJ$

Il calore ceduto alla sorgente fredda vale: $Q_C = Q_H - L = 1000 - 650 = 350 \quad kJ$

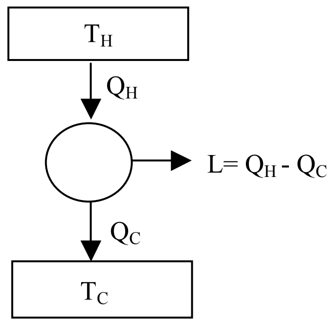
Esercizio 1.30 – Motore termico, rendimento

Un motore termico scambia calore con due sorgenti, rispettivamente a 123 °C e 323 °C. Sapendo che il rendimento di questa macchina è pari al 40% di quello di una macchina operante con cicli reversibili (ciclo di Carnot) , che il calore scambiato con la sorgente fredda Q_C è pari a 10 kJ, determinare:

a) il rendimento della macchina [__0,134__]
b) il lavoro prodotto dal ciclo kJ [__1,55 _]

Svolgimento

Riportiamo a fianco lo schema del ciclo



Prima di procedere nei calcoli è opportuno uniformare le unità di misura:

T_H = 323 °C + 273 = 596 K

T_C = 123 °C + 273 = 396 K

Se la macchina funzionasse secondo un ciclo ideale (macchina di Carnot), il rendimento della stessa potrebbe essere calcolato in funzione delle temperature delle due sorgenti:

$$\eta_{carnot} = \frac{T_H - T_C}{T_H} = \frac{596 - 396}{596} = 0{,}335$$

Il rendimento della macchina reale è pertanto pari a: $\eta = 0{,}4 \cdot \eta_{carnot} = 0{,}4 \cdot 0{,}335 = 0{,}134$

per il calcolo del lavoro prodotto dal ciclo, si applica la definizione del rendimento in funzione delle quantità di energia scambiate:

$\eta = \frac{L}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H}$ che con semplici passaggi può essere esplicitata in funzione di Q_H

$$Q_H = \frac{Q_C}{1 - \eta} = \frac{10}{1 - 0{,}134} = 11{,}55 \quad kJ$$

il lavoro prodotto è pertanto pari a :

$$L = Q_H - Q_C = 11{,}55 - 10 = 1{,}55 \quad kJ$$

Esercizio 1.31 – Macchina termica

Una macchina termica assorbe 7 kWh (Q_H) da una sorgente a 550 °C e cede 5,5 kWh (Q_C) all'ambiente che si trova alla temperatura di 0 °C. Supponendo che durante la trasformazione le temperature delle due sorgenti rimangano costanti, calcolare:

a) il lavoro teorico perduto rispetto ad un ciclo di Carnot che opera tra le stesse temperature kWh [__3,17__]

Svolgimento

Il lavoro della macchina termica reale è ricavato da:

$$L = Q_H - Q_C = 7 - 5{,}5 = 1{,}5 \quad \text{kWh}$$

Se la macchina funzionasse secondo un ciclo ideale (macchina di Carnot), il rendimento della stessa potrebbe essere calcolato in funzione delle temperature delle due sorgenti:

$$\eta_{carnot} = \frac{T_H - T_C}{T_H} = \frac{(550 + 273) - (0 + 273)}{(550 + 273)} = 0{,}668$$

Il lavoro generato dalla macchina nelle condizioni ideali (ciclo di Carnot) sarebbe pertanto pari a:

$$L_{carcot} = Q_H \cdot \eta = 7 \cdot 0{,}668 = 4{,}67 \quad \text{kJ}$$

Il lavoro teorico perduto dalla macchina è uguale alla differenza tra i due lavori:

$$\Delta L = L_{carnot} - L = 4{,}67 - 1{,}5 = 3{,}17 \quad \text{kWh}$$

Esercizio 1.32 – Ciclo di Carnot

Una macchina di Carnot (motore termico), avente la sorgente a bassa temperatura a 10°C (T_C) , ha un rendimento del 20%.Calcolate:

a) la temperatura T della sorgente calda K [__353__]

Svolgimento

Si trasforma innanzi tutto T_C da gradi centigradi a Kelvin: TC=10 °C +273= 283 K

Dalla equazione del rendimento di una macchina ideale in funzione delle temperature alle quali opera:

$$\eta_{carnot} = \frac{T_H - T_C}{T_H} \quad \text{si esplicita la temperatura incognita:} \quad T_H = \frac{T_C}{1-\eta} = \frac{283}{1-0{,}2} \cong 353 \quad \text{K}$$

Esercizio 1.33 – Motore termico, rendimento

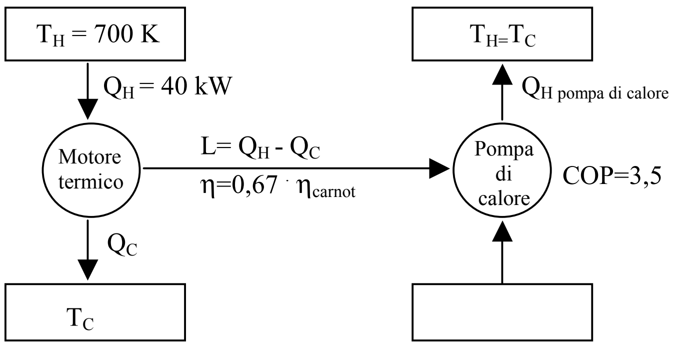
Un motore termico con rendimento meccanico 0,25 aziona una pompa di calore con COP uguale a 3,5, che fornisce calore alla temperatura T_C. Sapendo che il motore assorbe una potenza termica pari a 40 kW alla temperatura T_H = 700 °C, e che il suo rendimento è pari al 67% del rendimento di un ciclo di Carnot che opera alle stessa temperature, calcolate:

a) il valore della temperatura T_C K [___439__]

b) la quantità totale di calore prodotta alla temperatura T_C (dal motore termico e dalla pompa di calore) in 7 ore di funzionamento del sistema kWh [___455___]

Svolgimento

Lo schema del sistema proposto è illustrato in figura. Il lavoro meccanico fornito dal motore termico aziona direttamente il compressore della pompa di calore. Si noti come la temperatura del serbatoio caldo della pompa di calore T_H corrisponda alla temperatura al valore della temperatura del serbatoio freddo del motore termico T_C.
Motore termico e pompa di calore sono due sistemi che lavorano su due serbatoi di calore differenti separati. L'unico elemento che lega le due macchine è il fatto che il lavoro meccanico dell'una (motore termico) diventa in pratica il lavoro entrante dell'altra (pompa di calore)



Se il rendimento del motore è pari a 0,65, e se questo è pari al 67% di quello di un ciclo di Carnot che opera alle stesse temperature, è possibile ricavare il valore del rendimento di Carnot che vale:

$$\eta_{carnot} = \frac{\eta}{0,67} = \frac{0,25}{0,67} = 0,373$$

Dalla equazione del rendimento di una macchina ideale in funzione delle temperature alle quali opera:

$\eta_{carnot} = \dfrac{T_H - T_C}{T_H}$ si esplicita la temperatura incognita: $T_C = T_H - (\eta_{carnot} \cdot T_H) = 700 - (0,373 \cdot 700) \cong 439 \quad K$

La potenza termica totale prodotta alla temperatura T_C corrisponde alla somma tra il calore ceduto dal motore termico al suo serbatoio freddo ed il calore ceduto dalla pompa di calore al suo serbatoio caldo (entrambi i serbatoi, per convenzione adottata, si trovano infatti alla temperatura T_C).

Potenza termica ceduta dal motore termico:

$$\dot{Q}_C = \dot{Q}_H - \dot{L} = \dot{Q}_H - (\dot{Q}_H \cdot \eta) = 40 - (40 \cdot 0,25) = 30 \quad kW$$

Potenza termica ceduta dalla pompa di calore:

$$\dot{Q}_{H\ pompa\ di\ calore} = \dot{L} \cdot COP = (40 \cdot 0,25) \cdot 3,5 = 35 \quad kW$$

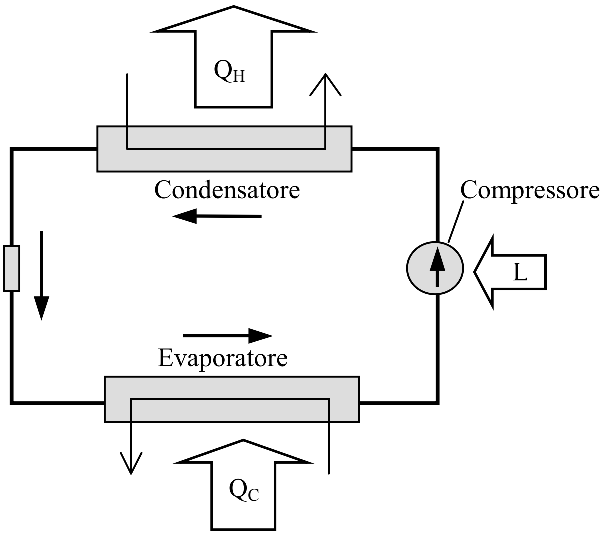
La quantità totale di calore prodotta alla temperatura T_C (dal motore termico e dalla pompa di calore) in 7 ore di funzionamento del sistema vale pertanto: (30 + 35) · 7 = 455 kWh

Esercizio 1.34 – Ciclo frigorifero

Un ciclo frigorifero è caratterizzato dai seguenti dati: differenza di entalpia specifica del fluido refrigerante tra stato iniziale e stato finale della condensazione Δh_H= 120 kJ/kg; differenza di entalpia specifica tra stato finale e stato iniziale della compressione Δh_L= 40 kJ/kg; sapendo che la massa di fluido che compie il ciclo nell'unità di tempo (portata del fluido) è di 0,2 kg/s, calcolate:

a)	la potenza termica ceduta attraverso il condensatore	kW	[__24___]
b)	la potenza del compressore	kW	[__8___]
c)	la potenza termica assorbita attraverso l'evaporatore	kW	[__16__]
d)	l'efficienza ε della macchina frigorifera	COP	[___2___]
e)	il COP di una pompa di calore che funziona secondo tale ciclo	COP	[___3__]

Svolgimento



La potenza termica ceduta dalla macchina frigorifera attraverso il condensatore è data da:

$$\dot{Q}_H = \Delta h_H \cdot \dot{m} = 120 \cdot 0{,}2 \quad \left[\frac{kJ}{kg}\cdot\frac{kg}{s}\right] = 24 \quad \frac{kJ}{s} = 24 \quad kW$$

La potenza del compressore è data da:

$$\dot{Q}_L = \Delta h_L \cdot \dot{m} = 40 \cdot 0{,}2 \quad \left[\frac{kJ}{kg}\cdot\frac{kg}{s}\right] = 8 \quad \frac{kJ}{s} = 8 \quad kW$$

La potenza termica assorbita dall'evaporatore vale pertanto: $Q_C = Q_H - L = 24 - 8 = 16 \quad kW$

L'efficienza ε della macchina frigorifera è pari a:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{L}} = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{Q}_H - \dot{Q}_C} = \frac{16}{8} = 2$$

Il COP di una pompa di calore che funziona secondo lo stesso ciclo vale:

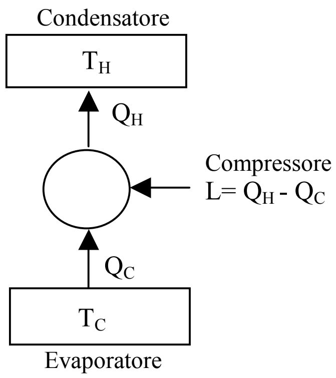
$$COP = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{L}} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{Q}_H - \dot{Q}_C} = \frac{24}{8} = 3$$

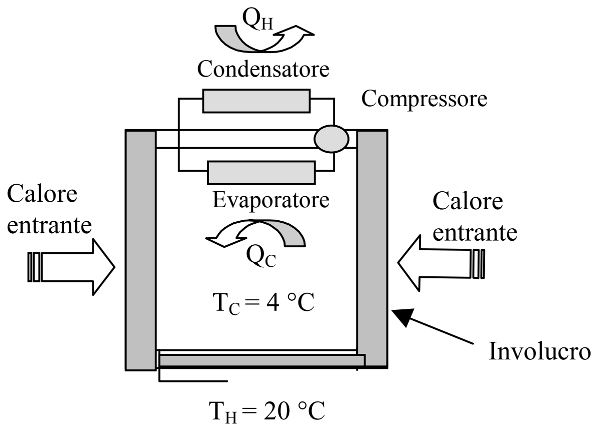
Esercizio 1.35 – Ciclo frigorifero

La macchina che consente di mantenere a 4 °C la temperatura interna di un frigorifero ha una efficienza pari al 16 % di quella di una macchina reversibile (ciclo di Carnot) che opera tra le stesse temperature. A regime, quando l'ambiente che contiene il frigorifero ha una temperatura di 20 °C, si può mantenere la temperatura interna voluta impiegando una potenza meccanica costante di 80 W. Calcolare:

a) l'efficienza della macchina frigorifera ε [__2,77__]
b) la potenza termica scambiata fra l'ambiente e la cella frigorifera attraverso l'involucro W [__221,6__]
c) la potenza termica ceduta dal frigorifero all'ambiente W [__80 _]

Svolgimento





L'efficienza di una macchina frigorifera ideale, ossia di una macchina che opera secondo un ciclo di Carnot inverso, è pari a:

$$\varepsilon_{carnit} = \frac{T_C}{T_H - T_C} = \frac{(4+273)}{(20+273)-(4+273)} = 17{,}3$$

L'efficienza della macchina reale vale pertanto:

$$\varepsilon = \varepsilon_{carnot} \cdot 0{,}16 = 17{,}3 \cdot 0{,}16 = 2{,}77$$

Quando il sistema è a regime, ossia quando i cibi contenuti nella cella hanno raggiunto la temperatura di 4 °C, la macchina frigorifera deve solo compensare le entrate di calore attraverso le pareti dell'involucro. La potenza termica scambiata fra l'ambiente e la cella frigorifera attraverso l'involucro corrisponde alla potenza termica che deve assorbite l'evaporatore, quindi Q_C.
Il valore di Q_C, in termini di potenza, può essere ricavato dalla relazione che definisce il rendimento di un ciclo frigorifero:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_C}{\dot{L}} \quad \Rightarrow \quad \dot{Q}_C = \varepsilon \cdot \dot{L} = 2{,}77 \cdot 80 = 221{,}6 \quad \text{W}$$

In questo caso particolare le due sorgenti, quella fredda e quella calda, non sono separate ma corrispondono all'ambiente in cui è inserito il frigorifero. In condizioni di regime, il calore ceduto dal frigorifero all'ambiente coincide perciò all'equivalente termico del lavoro immesso, quindi dell'energia elettrica fornita alla macchina.
Il bilancio termico del sistema è il seguente:

$$\dot{Q}_{ceduto} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_C = (221+80) - 221{,}6 = 80 \quad \text{W}$$

Nel bilancio, il calore $\dot{Q}_C$ risulta negativo rispetto all'ambiente in quanto calore entrante nel frigorifero (attraverso le pareti della cella) e comunque sottratto all'ambiente esterno.

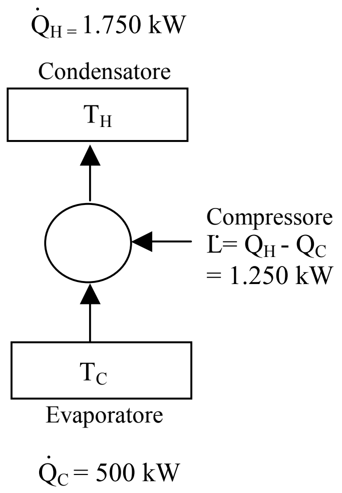
Esercizio 1.36 – Ciclo frigorifero, pompa di calore

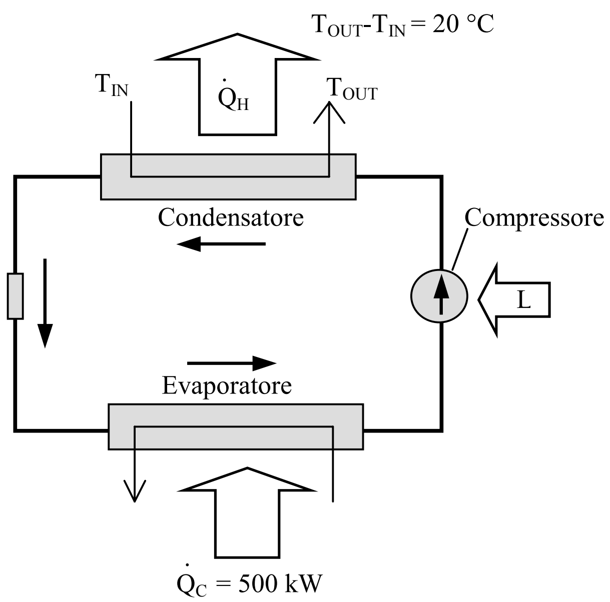
Una macchina frigorifera reale opera con una efficienza ε pari a 2,5 e sviluppa una potenza refrigerante (Q_c) pari a 500 kW. Il condensatore della macchina è raffreddato ad acqua (C_p = 4,2 kJ/kg K) ed il salto di temperatura tra ingresso e uscita dell'acqua nel condensatore è di 20 °C. Determinare:

a)	la potenza termica del condensatore	kW	[__1.750__]
b)	la portata d'acqua necessaria per raffreddare il condensatore	kg/h	[__75.240_]
c)	la potenza termica che sarebbe in grado di produrre la macchina se funzionasse, a parità di condizioni, come pompa di calore	kW	[__1.750_]

Dati: c_p acqua = 4,18 kJ/kg K

Svolgimento





La potenza meccanica che è necessario fornire alla macchina è ricavabile dalla:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}c}{\dot{L}} \quad \text{da cui:} \qquad \dot{L} = \dot{Q}_C \cdot \varepsilon = 500 \cdot 2{,}5 = 1.250 \quad \text{kW}$$

La potenza termica del condensatore vale pertanto:

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_C + \dot{L} = 500 + 1.250 = 1.750 \quad \text{kW}$$

La portata d'acqua necessaria per raffreddare il condensatore è ricavabile dalla relazione generale:

$$\dot{Q}_H = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad \text{dalla quale si ricava che}$$

$$m = \frac{\dot{Q}_H}{c_p \cdot \Delta T} = \frac{1.750}{4{,}18 \cdot 20} \left[\frac{\text{kW} \quad \text{oppure} \quad \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot \text{K}} \right] = 20{,}9 \quad \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 3600 = 75.240 \quad \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

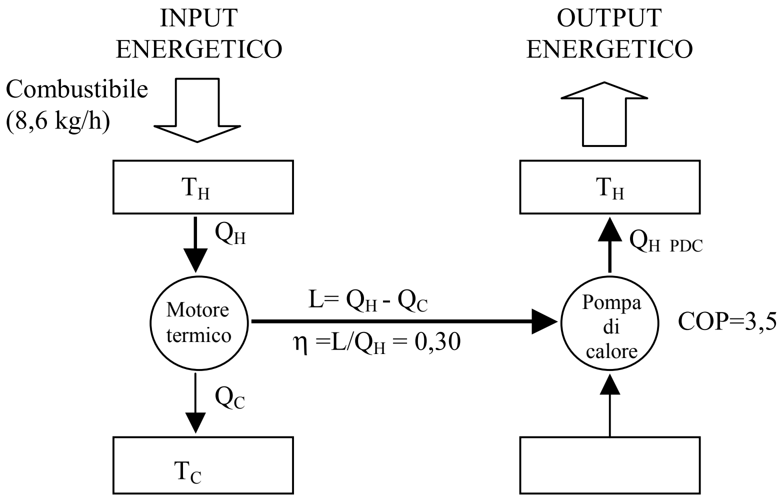
Se la macchina funzionasse come pompa di calore, a parità di condizioni, la potenza erogata sarebbe quella al condensatore, corrispondente quindi a 1.750 kW.

Esercizio 1.37 – Motore termico

Un motore termico alimentato a gasolio aziona il compressore di una pompa di calore (pdc). Assumendo un valore di 0,30 per il rendimento del motore, un valore di 3,5 per il COP della pdc e un valore di 10.000 kcal/kg per il potere calorifico inferiore del gasolio, e sapendo che il consumo orario di combustibile è di 8.6 kg/h di gasolio, calcolate:

a) la potenza meccanica erogata dal motore kW [___100__]
b) la potenza termica erogata dalla pompa di calore kW [___105_]
c) il rendimento totale del sistema motore termico + pdc; [___1,05_]

Svolgimento



La quantità di energia che viene immessa nel sistema corrisponde all'equivalente energetico del combustibile utilizzato:

$$Q_H = m_{comb} \cdot PCI = 8{,}6 \cdot 10.000 \ \left[\frac{kg}{h} \cdot \frac{kcal}{kg}\right] = 86.000 \frac{kcal}{h} \cdot \frac{1}{860} = 100 \quad kWh$$

Nel nostro caso il consumo di combustibile si riferisce ad 1 ora, quindi la quantità di energia per unità di tempo vale:

$$\dot{Q}_H = \frac{Q_H}{t} = \frac{100}{1} \ \left[\frac{kWh}{h}\right] = 100 \quad kW$$

Per valutare la quantità di calore erogata dal condensatore della pompa di calore è necessario valutare la potenza meccanica che alimenta il compressore della pompa di calore, potenza che corrisponde a quella erogata dalla macchina termica:

$$\dot{L} = \dot{Q}_H \cdot \eta = 100 \cdot 0{,}30 = 30 \quad kW$$

La potenza termica erogata attraverso il compressore dalla pompa di calore è data da:

$$\dot{Q}_{H \ PDC} = L \cdot COP = 30 \cdot 3{,}5 = 105 \quad kW$$

Il motore termico e la pompa di calore sono due macchine in serie. Il rendimento globale del sistema è pari al prodotto dei due rendimenti, quindi:

$$\eta_{TOT} = \eta_{MOT} \cdot COP = 0{,}3 \cdot 3{,}5 = 1{,}05$$

Avremmo ottenuto lo stesso risultato considerando il sistema come una macchina unica ed applicando la definizione generale di rendimento:

$$\eta_{TOT} = \frac{\text{potenza erogata}}{\text{potenza spesa}} = \frac{105}{100} = 1{,}05$$

Esercizio 1.38 – Macchina frigorifera, calore specifico

Un frigorifero industriale per raffreddare 10 quintali di patate da 30 °C a 3 °C assorbe una quantità di energia elettrica pari a 11,7 kWh operando con una efficienza media di 2,5. Determinare :

a) Il calore specifico delle patate kJ/kg K [___0,388___]

Svolgimento

La quantità di calore sottratta alle patate corrisponde alla quantità di calore sottratta dall'evaporatore del frigorifero Q_C. Dall'equazione che definisce l'efficienza di una macchina frigorifera:

$\varepsilon = \frac{Q_C}{L}$, che esplicitata in funzione di Q_C diventa: $Q_C = \varepsilon \cdot L = 2{,}5 \cdot 11{,}7 \quad \text{kWh}$

Il calore specifico delle patate può essere ricavato dall'equazione generale:

$Q_C = m \cdot c_p \cdot \Delta T$ dalla quale si ricava che:

$$C_p = \frac{Q_C}{m \quad \Delta T} = \frac{29{,}250}{10.000 \cdot (30-3)} \left[\frac{\text{Wh}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right] = 0{,}108 \quad \frac{\text{Wh}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 3{,}6 = 0{,}388 \quad \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Esercizio 1.39 - Condizionatore

Un condizionatore mantiene un ambiente a 25 °C con una temperatura esterna di 35 °C. In un periodo di 24 ore assorbe una quantità di energia elettrica pari a 96 kWh operando con una efficienza frigorifera reale ε pari a 2,5.
Determinare:

a) il carico frigorifero medio del locale W [______10000]
b) la quantità di calore che il condizionatore dovrà cedere all'ambiente esterno nello stesso periodo di 24 ore kWh [_______336]
c) l'energia elettrica che sarebbe necessario fornire al condizionatore, nelle stesse condizioni operative, se questo funzionasse secondo un ciclo ideale kWh [_______8,05]

Svolgimento

E' necessario innanzi tutto calcolare la quantità di calore che il condizionatore, operante secondo un ciclo frigorifero, sottrae all'ambiente:

$$Q_C = \varepsilon \cdot L = 2{,}5 \cdot 96 = 240\text{kWh}$$

Il carico frigorifero medio del locale nelle 24 ore si ricava semplicemente dal rapporto tra l'energia e il tempo:

$$\dot{Q}_C = \frac{Q_C}{t} = \frac{240}{24} = 10\text{kWh} = 10.000\text{Wh}$$

Il condizionatore dovrà dissipare all'esterno, nel periodo di 24 ore, una quantità di calore pari a:

$$Q_H = Q_C + L = 240 + 96 = 336\text{kWh}$$

Un condizionatore ideale opera secondo un ciclo ideale (ciclo di Carnot inverso), pertanto con una efficienza frigorifera pari a:

$$\varepsilon_{ideale} = \frac{T_C}{T_H - T_C} = \frac{(25+273)}{(35+273)-(25+273)} = 29{,}8$$

Con un rendimento ideale, per sottrarre all'ambiente la stessa quantità di calore il lavoro speso (energia elettrica consumata) sarebbe pari a:

$$L = \frac{Q_C}{\varepsilon_{ideale}} = \frac{240}{29,8} = 8,05\text{kWh}$$

Esercizio 1.40 – Riscaldamento acqua, consumo combustibile

L'acqua contenuta in una piscina di dimensioni 12 * 6 * 2,5 deve essere riscaldata dalla temperatura iniziale di 12 °C alla temperatura finale di 26 °C attraverso un generatore di calore alimentato a gas. Trascurando le perdite termiche della piscina durante la fase di riscaldamento, determinare:

a) la potenza termica che dovrà avere il generatore di calore nell'ipotesi in cui il riscaldamento dell'acqua debba avvenire in un tempo massimo di 8 ore (Cp acqua = 4,18 kJ/kg K) kW [_______365,7]
b) la quantità di combustibile necessaria per riscaldare l'acqua ipotizzando che il rendimento del generatore di calore sia pari al 90% (PCI gas = 9,060 kWh/m^3) m^3 [________44,8]

Svolgimento

La massa dell'acqua da riscaldare è data dal prodotto del volume per la densità (nel caso dell'acqua si può assumere un valore di 1000 kg/m^3):

$$m = V \cdot \rho = (12 \cdot 6 \cdot 2,5) \cdot 1.000 = 180.000\text{kg}$$

la quantità di calore da fornire all'acqua (trascurando le perdite termiche verso l'esterno) è pari a:

$$Q = m \cdot C_P \cdot \Delta t = 180.000 \cdot 4,18 \cdot (26-12) = 10.533.600\text{kJ} = 10.533.600 / 3.600 = 2.926\text{kWh}$$

La potenza termica del generatore di calore è ricavabile dalla relazione:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} = \frac{2.926}{8} = 365,7\text{kWh}$$

La quantità di combustibile necessaria per riscaldare l'acqua è data dalla relazione:

$$F_{Comb.} = \frac{\dot{Q}}{\eta_{caldaia} \cdot PCI} = \frac{365,7}{0,9 \cdot 9,06} = 44,8\text{m}^3$$

Esercizio 1.41 – Riscaldamento edificio con pompa di calore

Un edificio è riscaldato da una pompa di calore che utilizza come sorgente fredda un lago (temperatura dell'acqua costante = 10 °C). In condizioni di progetto il sistema di riscaldamento (pompa di calore) fornendo una potenza termica di 100 kW garantisce una temperatura ambiente di 20 °C con una temperatura esterna dell'aria di –5 °C.

a) determinare il consumo energetico della pompa di calore (COP = 3,5) nell'ipotesi che l'impianto funzioni per 12 ore e che la temperatura dell'aria esterna si mantenga costantemente a –5 °C kWh [____342,8____]
b) con riferimento alle condizioni operative indicate al punto a), calcolare la variazione di entropia del lago kJ/K [__-10.908__]
c) se al posto della pompa di calore fosse installato un impianto di riscaldamento tradizionale dimensionato per erogare la stessa potenza in condizioni di progetto, calcolare il consumo di combustibile nelle 12 ore (considerare un rendimento dell'impianto pari a 0,80 ed un potere calorifico del combustibile pari a 9775 Wh/m^3) m^3 [____153____]

Svolgimento

La quantità di calore che la pomp a di calore fornisce all'edificio nelle 12 ore è data da:

$$Q_H = \dot{Q}_H \cdot t = 100 \cdot 12 = 1.200\text{kWh}$$

Il consumo energetico della pompa di calore corrisponde al lavoro che viene fornito sotto forma di energia elettrica dato da:

$$L = \frac{Q_H}{COP} = \frac{1.200}{3,5} = 342,8\text{kWh}$$

La variazione di entropia del lago si calcola considerando il calore sottratto dalla pompa di calore sempre nelle 12 ore (Q_C):

$$\Delta S = \frac{Q_C}{T} = \frac{Q_H - L}{T} = \frac{1.200 - 342,8}{10 + 273,15} = 3,03\frac{\text{kWh}}{\text{K}} \cdot 3.600 = -10.908\frac{\text{kJ}}{\text{K}}$$

L'entropia risulta negativa considerando il fatto che il lago viene raffreddato.

Se al posto della pompa di calore fosse installato un impianto di riscaldamento tradizionale, questo fornirebbe una quantità di energia Q pari alla quantità di energia fornita dalla pompa di calore, ossia 1.200 kWh.

Il fabbisogno di combustibile F_C è calcolato dalla:

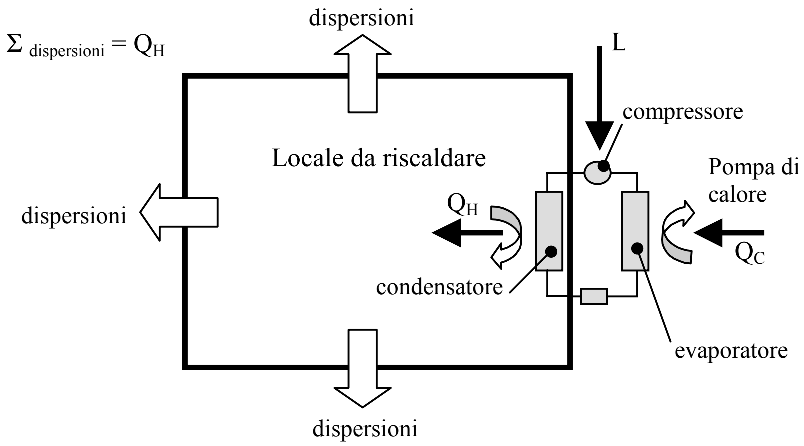
$$F_C = \frac{Q}{\eta \cdot PCI} = \frac{1.200 \cdot 1000}{0,80 \cdot 9.775} = 153\text{m}^3$$

Esercizio 1.42 – Pompa di calore

Per mantenere un ambiente di 3000 m^3 alla temperatura di 20 °C si intende usare una pompa di calore ideale aria/aria. Se la temperatura dell'aria esterna è di 5 °C e la potenza termica dispersa dall'ambiente caldo è pari a 200 kW, Determinare:

a)	il coefficiente di prestazione COP della pompa di calore	COP	[___19,5__]
b)	la potenza meccanica fornita alla pompa di calore	kW	[___10,25_]

Svolgimento



La potenza termica dispersa dall'ambiente deve essere compensata dalla potenza termica che la pompa di calore fornisce attraverso il condensatore.
Trattandosi di una pompa di calore ideale, ossia di una pompa di calore che opera secondo un ciclo di Carnot inverso, il suo COP può essere calcolato in funzione delle temperature dei due ambienti:

$$COP = \frac{T_H}{T_H - T_C} = \frac{(20+273)}{(20+273)-(5+273)} = 19{,}5$$

La potenza meccanica fornita alla pompa di calore è pari a:

$$\dot{L} = \frac{\dot{Q}_H}{COP} = \frac{200}{19{,}5} = 10{,}25 \quad kW$$

Esercizio 1.43 – Variazione di entropia

Una parete di 20 m^2 separa due ambienti che si trovano rispettivamente a 20 °C (T_2) e a 0 °C (T_1) ed è attraversa da un flusso di 35 W/m^2. Determinare:

a)	La variazione di entropia del sistema parete-ambienti dopo 24 ore	Wh/K	[____4,2____]

Svolgimento

La quantità di calore che attraversa la parete nelle 24 ore è data da:

$$Q = \phi \cdot A \cdot t = 35 \cdot 20 \cdot 24 \quad \left[\frac{W}{m^2} \cdot m^2 \cdot h\right] = 16.800 \quad Wh$$

Supponendo che i due ambienti rimangano a temperatura costante, la variazione di entropia del sistema parete-ambientiè data da:

$$\Delta S = \left|\frac{Q}{T_1}\right| + \left|\frac{Q}{T_2}\right| = \frac{16.800}{(0+273)} + \frac{-16.800}{(20+273)} = 4{,}2 \quad \frac{Wh}{K}$$

Esercizio 1.44 – Variazione di entropia

10 m^3 di acqua vengono scaldati da 10 °C a 80 °C con un generatore di calore che fornisce una potenza termica pari a 50 kW.
Determinare:

a)	La quantità di calore da fornire all'acqua	kJ	[_2.808.960_]
b)	Il tempo necessario	ore	[___15,6___]
c)	la variazione di entropia del sistema, esplicitando il segno	kJ/K	[__9.053_]

Dati: densità dell'acqua ρ 0,98 kg/litro, calore specifico medio dell'acqua 4,18 kJ/kg K

Svolgimento

La quantità di calore da fornire all'acqua è ricavabile dalla relazione:

$$Q = (V \cdot \rho) \cdot c_p \cdot \Delta T = (10.000 \cdot 0{,}98) \cdot 4{,}18 \cdot (80-10) \quad \left[1 \cdot \frac{kg}{l} \cdot \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot K\right] = 2.808.960 \quad kJ$$

Il tempo necessario per riscaldare l'acqua con un generatore di calore che fornisce una potenza termica di 50 kW è data da:

$$t = \frac{Q}{\dot{Q}} = \frac{2.808.960}{50} \quad \left[\frac{kJ}{kW \quad \text{oppure} \quad \frac{kJ}{s}}\right] = 56..179 \quad s \cdot \frac{1}{3.600} = 15{,}6 \quad h$$

Per il calcolo della variazione di entropia, occorre tenere conto che la temperatura del sistema (acqua contenuta nel serbatoio) varia. E' necessario quindi applicare la relazione:

$$\Delta S = m \cdot c_{p \ medio} \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = (10.000 \cdot 0{,}98) \cdot 4{,}18 \cdot \ln\left(\frac{80+273}{10+273}\right) = 9.053 \quad \frac{kJ}{K}$$

Esercizio 1.45 – Coerenza di un ciclo con primo e secondo principio

Il bilancio energetico di una macchina termica reale è il seguente:

Q_H = 1000 kWh, Q_C = 900 kWh, L = 100 kWh

Dire se questi valori sono in contrasto:

- ❑ con il I° Principio della Termodinamica
- ❑ con il II° Principio della Termodinamica
- ❑ con il I° ed il II° Principio della Termodinamica
- ❑ con nessuno dei due

Svolgimento

Il bilancio energetico può essere coerente con il primo principio della termodinamica, in quanto:

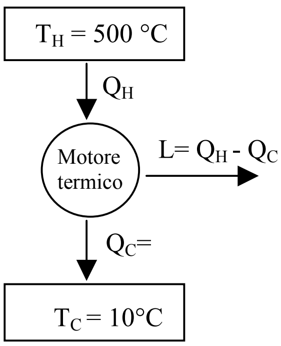
$Q_H - Q_C = L$

Non conoscendo i valori delle temperature alle quali opera la macchina, non è possibile stabilire se la macchina è coerente con il secondo principio, in quanto non è possibile calcolare il rendimento ideale (ciclo di Carnot) che, come noto, dipende solo dalle due temperature T_C e T_H.

Esercizio 1.46 – Variazione di entropia in un ciclo termodinamico

Un ciclo termodinamico opera tra le temperatura di 500 °C (T_H) e 10 °C (T_C) e produce una potenza meccanica di 1.000 kW. Il rendimento della macchina è pari al 70% del rendimento di un ciclo di Carnot che opera tra le stesse temperature.
Calcolare:

a)	il rendimento del ciclo		[___0,44__]
b)	la potenza termica scambiata con la sorgente calda Q_H	kW	[___2.273__]
c)	la variazione globale di entropia (fluido + ambiente) supponendo che il ciclo funzioni per 10 ore e che gli scambi termici avvengano a temperatura costante	kWh/K	[__18,69__]
d)	la variazione globale di entropia del ciclo ideale che opera secondo le stesse temperature	kWh/K	[___0_]



Il rendimento di un ciclo di Carnot che opera tra le stesse temperature del ciclo in esame è dato da:

$$\eta_{carnot} = \frac{T_H - T_C}{T_H} = \frac{(500+273)-(10+273)}{(500+273)} = 0,634$$

Il rendimento del ciclo in esame è pertanto pari a: $\eta = 0,70 \cdot \eta_{carnot} = 0,70 \cdot 0,633 = 0,44$

La potenza termica scambiata dalla sorgente calda è ricavabile dalla equazione che definisce il rendimento:

$$\eta = \frac{\dot{L}}{\dot{Q}_H} = \quad \text{da cui:} \quad \dot{Q}_H = \frac{\dot{L}}{\eta} = \frac{1.000}{0,44} = 2.273 \quad \text{kW}$$

Si può facilmente ricavare il valore di $\dot{Q}_C = Q_H - \dot{L} = 2.273 - 1.000 = 1.273 \quad \text{kW}$

Se il ciclo funziona per 12 ore, si avrà che:

$Q_H = \dot{Q}_H \cdot t = 2.273 \cdot 12 = 27.276 \quad \text{kWh}$ e

$Q_C = \dot{Q}_C \cdot t = 1.273 \cdot 12 = 15.276 \quad \text{kWh}$

La variazione di entropia nel serbatoio caldo ΔS_H vale:

$$\Delta S_H = \frac{Q_H}{T_H} = \frac{27.276}{773} = 35,28 \quad \frac{kWh}{K}$$

mentre la variazione di entropia nel serbatoio freddo ΔS_C vale:

$$\Delta S_C = \frac{Q_C}{T_C} = \frac{15.276}{283} = 53,97 \quad \frac{kWh}{K}$$

La variazione di entropia totale è uguale a:

$$\Delta S_{tot} = \Delta S_C - \Delta S_C = 53,97 - 35,28 = 18,69 \quad \frac{kWh}{K}$$

In un ciclo ideale, con rendimento pari a 0,634, a parità di lavoro prodotto L, il valore di Q_H sarebbe dato dalla:

$$Q_H = \frac{L}{\eta} = \frac{(1.000 \cdot 12)}{0,634} = 18.927 \quad kWh$$

Il valore di Q_C sarebbe pari a: $Q_C = Q_H - L = 18.927 - 12.000 = 6.927 \quad kWh$

La variazione di entropia nel serbatoio caldo ΔS_H vale:

$$\Delta S_H = \frac{Q_H}{T_H} = \frac{18.927}{773} = 24,48 \quad \frac{kWh}{K}$$

mentre la variazione di entropia nel serbatoio freddo ΔS_C vale:

$$\Delta S_C = \frac{Q_C}{T_C} = \frac{6.927}{283} = 24,48 \quad \frac{kWh}{K}$$

La variazione di entropia totale è uguale a:

$$\Delta S_{tot} = \Delta S_C - \Delta S_C = 24,48 - 24,48 = 0 \quad \frac{kWh}{K}$$