

IDEE PER UNA LEZIONE DIGITALE

PARAGRAFO	CONTENUTO	DURATA (MINUTI)
1. Le macchine termiche	IN LABORATORIO Macchina termica di Stirling Si può usare il calore per accendere una lampadina? Come?	2
3. Secondo enunciato: Rudolf Clausius	ANIMAZIONE I due enunciati del secondo principio della termodinamica Qual è la differenza tra i due enunciati? Come si costruiscono macchine che li violino?	1
	ANIMAZIONE Equivalenza dei due enunciati di Clausius e Kelvin Perché i due enunciati sono equivalenti?	2,5
5. Trasformazioni reversibili e irreversibili	ANIMAZIONE Le trasformazioni termodinamiche reversibili Come si rappresenta una trasformazione reversibile nel piano p - V ?	2,5
7. Il ciclo di Carnot	ESPERIMENTO VIRTUALE Trasformazioni cicliche Gioca, misura, esercitati	
MAPPA INTERATTIVA	30 TEST INTERATTIVI SU CON FEEDBACK «Hai sbagliato, perché...»	

VERSO IL CLIL

FORMULAE IN ENGLISH	AUDIO
Thermal efficiency	$\eta = \frac{W}{Q}$ The efficiency of a heat engine η is equal to the ratio of the work done by the engine W to the heat absorbed by the engine Q .
Maximum thermal efficiency between fixed temperatures	$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2}$ The maximum efficiency of a machine between two temperatures equals one minus the ratio of the absolute temperature of the cold reservoir to the absolute temperature of the hot reservoir.
Heat produced by a fridge	$ Q_2 = Q_1 + W $ The heat released into the environment from a refrigerator equals the heat transferred from the inside plus the external work.
Coefficient of performance	$\text{COP} = \frac{Q_1}{ W }$ The coefficient of performance of a heat pump equals the ratio of the heat transferred by the pump to the external work consumed by the pump.
Energy efficiency ratio for a heat pump	$K = \frac{ Q_2 }{ W }$ The gain coefficient of a heat pump equals the ratio of heat out to the external work.

 QUESTIONS AND ANSWERS

► What is a heat engine? Give an example.

Joule demonstrated the mechanical equivalence of heat by using the work of a falling weight to heat water. However, attempting to reverse the process by heating the water will not result in work being done, i.e. the raising of the weight. Work can be converted to heat directly and completely, but special machines, called *heat engines*, are needed to convert heat into useful work. Heat engines operate by means of a working fluid that undergoes thermodynamic cycles in which it absorbs heat from a high-temperature source, converts some of the heat into work, and emits the remaining waste heat to the environment. The source and environment are called the hot reservoir and cold reservoir, or hot and cold sinks. A steam power plant is a good example of a heat engine: an external-combustion engine transfers heat to the steam, which does work on a turbine and unused heat is emitted to the atmosphere.

► Do internal-combustion engines operate on a Carnot cycle?

Internal combustion engines, such as diesel engines or gas turbines, are heat engines in the sense that they convert heat into mechanical work. However, they operate on a mechanical cycle and not a thermodynamic cycle since the working fluid – air and combustion products – is discarded from the engine as exhaust gases. Therefore, the internal combustion engine operates on an open thermodynamic cycle and not a closed Carnot cycle, but this does not mean that it cannot be analysed as a Carnot engine. To make the analysis, certain assumptions are made – the working fluid behaves as an ideal gas circulating in a closed loop, all processes are reversible, the combustion process is replaced by a heat addition process and the exhaust process by a heat rejection process – that reduce the complex working of the internal combustion engine into a simplified model that can be studied qualitatively.

► Explain the difference between reversible and irreversible processes.

Irreversible processes cannot spontaneously reverse themselves in order to restore a thermodynamic system to its initial state. For example a hot cup of tea or plate of food that goes cold cannot spontaneously warm up again. All real processes are irreversible. A reversible process by definition can be reversed: i.e. both system and surroundings return to their initial states. This is possible only if the net heat and work exchanged with the surroundings in a cycle (forward plus reverse processes) is zero. In the pV plane, the reverse process would retrace the same path as the forward process. Reversible processes are referred to as ideal due to the impossibility of eliminating all the factors that cause a process to be irreversible, the irreversibilities, such as friction, unrestrained expansion or heat transfers across a finite temperature difference.

► Can a refrigerator be used to heat as well as to cool?

A refrigerator is a cyclic device that makes use of a vapour (the refrigerant) to transfer heat from a cold place to a hotter place. It consists of: an *expansion valve* that lowers the pressure and temperature of the refrigerant; an *evaporator* in the form of the refrigerated space in which the refrigerant absorbs heat; a *compressor* that compresses the refrigerant to a high pressure and temperature; and a *condenser* in the form of the coils at the back of the refrigerator in which the refrigerant exchanges heat with the surrounding space. This emitted heat plus any heat dissipated by the compressor does not amount to much in a domestic setting but supermarkets are now beginning to use the heat recovered from refrigeration systems to warm ventilated air, heat the water supply, and consequently reduce energy costs and carbon emissions.

PROBLEMI MODELLO, DOMANDE E PROBLEMI IN PIÙ

1 LE MACCHINE TERMICHE

6 ★★★ Una macchina termica compie cinque cicli al secondo ed eroga una potenza pari a 1,6 kW. In ogni ciclo, il lavoro prodotto è il 38% del valore dell'energia ceduta alla sorgente fredda.

- Calcola il calore assorbito in ogni ciclo.

[1,2 kJ]

4 TERZO ENUNCIATO: IL RENDIMENTO

22 ★★★ Una locomotiva a vapore dell'Ottocento aveva all'incirca un rendimento dell'8%.

- Per ottenere un lavoro utile pari a 400 kJ, quanto calore si doveva assorbire dalla caldaia?

[5 MJ]

23 ★★★ In una fabbrica lavorano contemporaneamente 4 macchine termiche di tipo A con rendimento $\eta_A = 0,35$ e 6 macchine termiche di tipo B con rendimento $\eta_B = 0,22$. Tutte le macchine assorbono la stessa quan-

7 ★★★ Per produrre un lavoro di $2,79 \times 10^4$ J una macchina termica assorbe $1,12 \times 10^5$ J di calore. La variazione di temperatura della sorgente fredda, costituita da una massa m di acqua a temperatura ambiente, non deve essere maggiore di un decimo di grado.

- Determina la quantità minima di acqua necessaria per realizzare la sorgente fredda.

[201 kg]

tità di calore $Q_2 = 8,2 \times 10^2$ J in un ciclo e compiono tre cicli al secondo.

- Ricava la formula che esprime il rendimento dell'intero impianto.
- Determina il valore numerico del rendimento.
- Quanto calore è ceduto in un'ora alla sorgente fredda?

Suggerimento: pensa all'impianto come a un'unica macchina termica.

$$\left[\frac{4\eta_A + 6\eta_B}{10}; 0,27; -6,5 \times 10^7 \text{ J} \right]$$

7 IL CICLO DI CARNOT

46 ★★★ Una macchina termica è costituita da un gas perfetto monoatomico che compie cicli di Carnot alla frequenza di 15 Hz e genera una potenza di $3,9 \times 10^3$ W. A ogni ciclo, cede alla sorgente fredda 370 J di calore.

- Calcola il calore assorbito dalla sorgente calda in ogni ciclo e il rendimento della macchina.
- Di quanto è variata la temperatura del gas dopo un ciclo? E dopo un'ora di funzionamento?

[$6,3 \times 10^2$ J; 0,41; 0 °C]

47 ★★★ Una macchina termica di potenza 10 kW ha un rendimento del 30,0 % e cede a ogni ciclo una quantità di energia pari a 450 J.

- Calcola la quantità di energia assorbita dalla sorgente calda in ogni ciclo termodinamico.
- Calcola quanto dura un ciclo.

[643 J; $1,9 \times 10^{-2}$ s]

48 ★★★ Un gas perfetto monoatomico esegue un ciclo di Carnot come nella figura dell'esercizio numero 41. Conosci $V_A = 1,32 \times 10^{-2}$ m³, $p_A = 5,00$ atm, $V_C = 4,25 \times 10^{-2}$ m³, $p_C = 1,00$ atm e $\gamma = 1,67$.

- Determina le coordinate dei punti B e D del ciclo.
- Considera i dati del Problema modello 3. Verifica che il rapporto $\frac{V_C}{V_D}$ è uguale a $\frac{V_B}{V_A}$.

$$[V_B = 2,20 \times 10^{-2} \text{ m}^3, p_B = 3,00 \text{ atm}; V_D = 2,55 \times 10^{-2} \text{ m}^3, p_D = 1,67 \text{ atm}]$$

8 IL RENDIMENTO DELLA MACCHINA DI CARNOT

PROBLEMA MODELLO 4 LA MACCHINA DI CARNOT

Una macchina di Carnot lavora fra due temperature la cui differenza vale $\Delta T = 120$ K. Il suo rendimento è $\eta = 46\%$.

- Calcola le temperature delle due sorgenti di calore.

■ DATI

Differenza tra le temperature: $\Delta T = 120 \text{ K}$
 Rendimento: $\eta = 46\%$

■ INCOGNITE

Temperatura sorgente fredda: $T_1 = ?$
 Temperatura sorgente calda: $T_2 = ?$

L'IDEA

- Conoscendo il rendimento, conosciamo anche il rapporto tra le due temperature.
- Risolviamo allora un sistema di due equazioni nelle due incognite T_1 e T_2 .

LA SOLUZIONE

Calcolo il rapporto tra le temperature.

Dall'espressione del rendimento ricavo il rapporto tra le temperature:

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} \rightarrow \frac{T_1}{T_2} = 1 - \eta = 1 - 46\% = 54\%$$

Risolve il sistema nelle incognite T_1 e T_2 .

Sfruttando il valore del rapporto tra le temperature possiamo scrivere:

$$\begin{cases} T_2 - T_1 = 120 \text{ K} \\ \frac{T_1}{T_2} = 0,54 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} T_2 - 0,54 T_2 = 120 \text{ K} \\ T_1 = 0,54 T_2 \end{cases}$$

$$\rightarrow \begin{cases} 0,46 T_2 = 120 \text{ K} \\ T_1 = 0,54 T_2 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} T_2 = \frac{120 \text{ K}}{0,46} = 2,6 \times 10^2 \text{ K} \\ T_1 = 1,4 \times 10^2 \text{ K} \end{cases}$$

56 ******* Una macchina termica non reversibile lavora tra le temperature di 25°C e 420°C . Il rendimento è il 52% del rendimento di una macchina reversibile che opera tra le due stesse temperature ed è alimentata con la stessa potenza. La macchina assorbe una potenza di 400 kW .

- Qual è il rendimento della macchina?
- Quanto lavoro in meno produce, in un'ora, rispetto alla macchina reversibile?

[0,30; $3,9 \times 10^8 \text{ J}$]

9 IL MOTORE DELL'AUTOMOBILE

PROBLEMA MODELLO 5 CONFRONTO TRA UN MOTORE A SCOPPIO E UNA MACCHINA DI CARNOT

Consideriamo un motore a scoppio che genera una potenza di $1,91 \text{ kW}$ e un motore ideale costituito da una macchina di Carnot che lavora fra le stesse temperature, ovvero tra 2100°C (temperatura di combustione) e 450°C (temperatura dei gas di scarico).

- Calcola il rendimento del motore ideale.
- Calcola il calore assorbito in un'ora dal motore ideale per produrre la stessa potenza del motore a scoppio.

■ DATI

Temperature sorgenti:
 $T_1 = 450^\circ\text{C}$, $T_2 = 2100^\circ\text{C}$
 Potenza generata: $P = 1,91 \text{ kW}$

■ INCOGNITE

Rendimento motore ideale: $\eta = ?$
 Calore assorbito in un'ora: $Q_2 = ?$

L'IDEA

- Dalle temperature espresse in kelvin calcoliamo il rendimento del motore ideale $\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2}$.
- Conoscendo la potenza, calcoliamo il lavoro prodotto in un'ora e dalla formula del rendimento $\eta = \frac{W}{Q_2}$ calcoliamo il calore assorbito.

LA SOLUZIONE

Calcolo il rendimento del motore ideale.

Converto le temperature in kelvin e ottengo

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{(450 + 273)\text{K}}{(2100 + 273)\text{K}} = 0,695.$$

Calcolo il lavoro prodotto in un'ora dal motore a scoppio.

In un'ora il motore a scoppio compie un lavoro pari a

$$W = P\Delta t = (1,91 \times 10^3 \text{ W}) \times (3600 \text{ s}) = 6,88 \times 10^6 \text{ J}.$$

Calcolo il calore assorbito in un'ora.

Per produrre lo stesso lavoro del motore a scoppio, il motore ideale dovrebbe assorbire un calore pari a

$$Q_2 = \frac{W}{\eta} = \frac{6,88 \times 10^6 \text{ J}}{0,695} = 9,90 \times 10^6 \text{ J}.$$

74 ******* Un gas perfetto biatomico ($\gamma = 7/5$) esegue un ciclo Diesel ideale; dallo stato iniziale A , con $p_A = 1,0 \times 10^5 \text{ Pa}$, $V_A = 5,0 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, $T_A = 293 \text{ K}$, viene compresso adiabaticamente allo stato B . Poi segue un'espansione isobara fino allo stato C e una adiabatica fino allo stato D , con $p_D = 5,0 \times 10^5 \text{ Pa}$. Il ciclo si chiude con un'isocora. Il rapporto di compressione, ovvero il rapporto tra il volume massimo e quello minimo raggiunti nel ciclo, è 22.

- ▶ Calcola i valori della pressione, volume e temperatura ai vertici del ciclo.
- ▶ Disegna il ciclo nel piano (V, p).

$$[p_B = 76 \times 10^5 \text{ Pa}, T_B = 1,01 \times 10^3 \text{ K}; V_B = 2,3 \times 10^{-5} \text{ m}^3; \\ p_C = 76 \times 10^5 \text{ Pa}, T_C = 3,29 \times 10^3 \text{ K}; V_C = 7,2 \times 10^{-5} \text{ m}^3; \\ p_D = 5,0 \times 10^5 \text{ Pa}, T_D = 1,47 \times 10^3 \text{ K}; V_D = 5,0 \times 10^{-4} \text{ m}^3]$$

75 ******* Un'autovettura con un motore a ciclo Otto con Potenza massima di 73,5 kW (100 CV) viaggia alla velocità di 120 km/h utilizzando il 50% della potenza disponibile. Il rendimento del motore risulta del 30%; il potere calorifico della benzina è di $0,46 \times 10^8 \text{ J/kg}$ e la sua densità è di 0,71 kg/L.

- ▶ A partire dalla definizione di rendimento di una macchina termica, esprimi il rendimento in funzione della potenza erogata e della potenza assorbita.
- ▶ Calcola quanti chilometri l'autovettura percorre per ogni litro di benzina.

[9,0 km/L]

10 IL FRIGORIFERO

PROBLEMA MODELLO 6 IL CONSUMO DI UN FRIGORIFERO

Un frigorifero ha un coefficiente di prestazione pari a 4,5 e in un giorno assorbe dal suo interno $2,1 \times 10^8 \text{ J}$ di calore.

- Calcola il lavoro necessario a farlo funzionare ogni giorno .
- Calcola la potenza del frigorifero.
- Il frigorifero lavora fra le temperature di -10°C e 30°C . Calcola il coefficiente di prestazione massimo, considerando il frigorifero come una macchina ideale di Carnot che lavora fra le stesse temperature.

■ DATI

Coefficiente di prestazione: $\text{COP} = 4,5$
 Calore sottratto alla sorgente fredda in un giorno: $Q_1 = 2,1 \times 10^8 \text{ J}$
 Temperatura della sorgente fredda: $T_1 = -10^\circ\text{C}$
 Temperatura della sorgente calda: $T_2 = 30^\circ\text{C}$

■ INCOGNITE

Lavoro compiuto in un giorno: $W = ?$
 Potenza del frigorifero: $P = ?$

L'IDEA

- Conosciamo il COP e il calore assorbito Q_1 , quindi possiamo calcolare il lavoro W compiuto in un giorno da $\text{COP} = \frac{Q_1}{|W|}$.
- Dividendo il lavoro per il tempo di funzionamento calcoliamo la potenza $P = \frac{W}{t}$.
- Considero il frigorifero come una macchina di Carnot che lavora fra le stesse temperature e calcolo il COP come $\frac{T_1}{T_2 - T_1}$.

LA SOLUZIONE

Calcolo il lavoro compiuto in un giorno.

Ogni giorno il frigorifero compie un lavoro pari a

$$|W| = \frac{Q_1}{\text{COP}} = \frac{2,1 \times 10^8 \text{ J}}{4,5} = 4,7 \times 10^7 \text{ J}.$$

Calcolo la potenza del frigorifero.

In un giorno, ci sono $\Delta t = 24 \text{ h} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \times 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} = 8,64 \times 10^4 \text{ s}$ quindi:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{4,7 \times 10^7 \text{ J}}{8,64 \times 10^4 \text{ s}} = 5,4 \times 10^2 \text{ W}.$$

Calcolo il COP massimo teorico.

Considerando il frigorifero come macchina ideale di Carnot ricavo

$$\text{COP} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} = \frac{263 \text{ K}}{40 \text{ K}} = 6,6.$$

89 ★★★ Un frigorifero con coefficiente di prestazione di 5,50 assorbe un lavoro di 480 J.

- ▶ Quanto calore sottrae dall'interno del frigorifero?
- ▶ A parità di lavoro, per sottrarre l'8,00% in più di calore dall'interno del frigorifero che coefficiente di prestazione dovrebbe avere?

[$2,64 \times 10^3$ J; 5,94]

90 ★★★ Un frigorifero con coefficiente di prestazione di 2,90 assorbe in ogni ciclo di funzionamento 540 cal agli alimenti contenuti al suo interno.

- ▶ Quanto calore viene disperso nell'ambiente circostante se il frigorifero compie 15 cicli?

[$4,56 \times 10^4$ J]

91 ★★★ Un congelatore è in equilibrio termico con il suo contenuto alla temperatura di -12 °C. Anna regola il termostato alla temperatura di -18 °C per poter conservare degli alimenti surgelati. La temperatura dell'ambiente è 32 °C. La nuova temperatura di equilibrio viene raggiunta dopo 5,0 min. La capacità termica del freezer con gli alimenti in esso contenuti è $4,2 \times 10^4$ J/K.

- ▶ Qual è la potenza assorbita dal congelatore?

[$8,4 \times 10^2$ W]

PROBLEMI GENERALI

13 ★★★ Una macchina termica utilizza come sorgente calda del piombo al punto di fusione (601 K, calore latente $2,3 \times 10^4$ J/kg) e come sorgente fredda dell'azoto al punto di ebollizione (77 K, calore latente $2,0 \times 10^5$ J/kg). In ogni ciclo della macchina vengono solidificati 25 g di piombo e si fanno evaporare 2,0 g di azoto; la macchina opera con una frequenza di 5,0 Hz.

- ▶ Calcola la potenza e il rendimento della macchina.
- ▶ Calcola il rendimento di una macchina di Carnot che lavora tra le stesse sorgenti.

[$9,0 \times 10^2$ W, 0,31; 0,87]

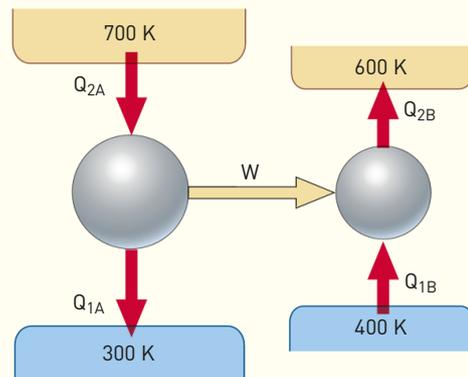
14 ★★★ Due moli di un gas perfetto biatomico compiono cicli di Carnot fornendo, nella metà del ciclo corrispondente all'espansione, 1,24 kJ di lavoro. Il 66,7% di questo lavoro è dovuto al tratto dell'espansione isoterma.

- ▶ Calcola il lavoro compiuto nell'espansione adiabatica.
- ▶ Determina la variazione di energia interna del gas durante l'espansione adiabatica.
- ▶ Qual è la differenza di temperatura tra le due sorgenti di calore?

Suggerimento: ricorda, dal capitolo precedente, che relazione esiste fra il lavoro compiuto nell'espansione adiabatica e la variazione dell'energia interna del gas perfetto.

[413 J; -413 J; 9,93 K]

15 ★★★ Due macchine termiche di Carnot lavorano insieme secondo lo schema mostrato nella figura. Sulla macchina B, che lavora come pompa di calore, è compiuto dall'esterno un lavoro pari a quello della macchina A. Le temperature delle sorgenti tra cui lavora la macchina A sono 700 K e 300 K. La macchina B lavora tra 600 K e 400 K. Il calore Q_{1A} , ceduto in un ciclo dalla macchina A, è $1,5 \times 10^3$ J.



- ▶ Determina il calore Q_{2B} ceduto dalla macchina B in un ciclo.

[$6,0 \times 10^3$ J]

16 ★★★ Una macchina termica che muove un generatore elettrico segue un ciclo ideale di Carnot con la sorgente ideale fredda tenuta alla temperatura ambiente. In estate la temperatura ambiente media risulta di 25 °C e il rendimento è $\eta = 0,50$. In inverno la temperatura ambiente media risulta di -10 °C mentre quella della sorgente calda resta invariata. La sorgente calda viene alimentata bruciando benzina, che ha un potere calorifico di $0,460 \times 10^8$ J/kg.

- ▶ Calcola la temperatura della sorgente ideale calda.
- ▶ Calcola il nuovo rendimento della macchina termica nel periodo invernale.
- ▶ Calcola il numero di kwh generati da questa macchina termica dopo la combustione di 10 kg di benzina, sia nel periodo estivo che nel periodo invernale.

[$6,0 \times 10^2$ K; 0,56; 65; 72]

