



Appunti di Fisica _I

Secondo semestre

Termodinamica

Macchine termiche

Sommario

Macchina termica.....	1
Ciclo di Carnot.....	1
Il lavoro.....	2
Il frigorifero.....	4
Pompa di calore.....	5
Il condizionatore.....	5

Macchina termica

Lo studio della termodinamica è nato con la necessità dell'uomo di capire il *rendimento delle macchine*: un sistema che produce lavoro meccanico od elettrico a spese di altre fonti di energia, in genere il calore derivato da materiali sottoposti a reazioni chimiche violente.... Si chiama *macchina termica*, la macchina ideale che ripete infinite volte una trasformazione *ciclica* in cui lo stato iniziale coincide con lo stato finale e produce lavoro positivo o negativo.

Carnot inventò una semplice macchina teorica (più che pratica), che sfrutta un gas ideale per compiere un *ciclo reversibile*. Nonostante la sua semplicità questa macchina è la macchina base che ci aiuta a capire il funzionamento di un qualsiasi motore.

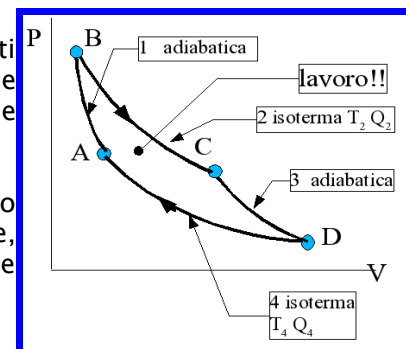
Ciclo di Carnot

Il *ciclo di Carnot* consiste di una serie di quattro trasformazioni che portano il gas dallo

1. stato iniziale A allo stato B con una compressione adiabatica,
2. da B a C con una espansione isoterma,
3. quindi da C a D con un'altra espansione adiabatica,
4. ed infine con una compressione isoterma si ritorna nello stato iniziale A

Cerca di visualizzarlo sul piano P,V sistemando gli stati A,B,C,D in modo che siano ai vertici dove le due adiabatiche incontrano le isoterme; si forma una figura chiusa che assomiglia ad un romboide (si fa per dire).

Ora durante le espansioni isoterme la macchina è a contatto con una sorgente (infinita!) di calore a temperatura costante, mentre durante le trasformazioni adiabatiche si suppone che non vi siano scambi di calore con l'esterno.





Ora vediamo di fare un bilancio energetico, e per questo, visto che la macchina è reversibile, dobbiamo definire la direzione in cui percorriamo il ciclo; per esempio proprio nell'ordine presentato più sopra.

Dunque si parte dallo stato A e si ritorna esattamente in A, dopo un cammino in cui le forze di pressione fanno lavoro L_p verso l'esterno e il sistema scambia calore con le due sorgenti.

Il lavoro

Il lavoro si calcola con il famoso integrale tra A e A lungo il cammino indicato dalla successione in senso orario A->B->C->D->A. con il segno positivo poiché ci stiamo interessando del lavoro fatto dalle forze di pressione (per questo usiamo la lettera L_p):

$$1) \quad L_p = \oint_A^A PdV = \int_A^B PdV + \int_B^C PdV + \int_C^D PdV + \int_D^A PdV$$

e scopriamo che il lavoro, ottenuto come somma algebrica delle aree individuate dai trapezoidi definiti dai quattro cammini lungo le quattro trasformazioni, è proprio l'area racchiusa dalle quattro curve. Un lavoro positivo nel caso di percorrenza come indicata.

Rendimento

Si scambia anche il calore; in particolare Q_2 con la sorgente a temperatura T_2 , Q_4 con quella a temperatura T_4 e zero lungo le due adiabatiche (nota $T_2 > T_4$). Ora ricordati che la variazione della energia interna tra lo stato iniziale (A) e finale (sempre A) è nulla visto che la temperatura è la stessa per i due stati e quindi il lavoro totale fatto dalle forze di pressione sull'ambiente esterno è $L_p = Q_2 + Q_4$, cioè pari al calore totale scambiato, ma attento con il suo segno; $Q_2 > 0$ poiché è calore che il gas ha ricevuto dalla sorgente più calda, $Q_4 < 0$ poiché è quello ceduto alla sorgente più fredda.

Abbiamo già tutti i dati per definire uno dei parametri fondamentali di tutti i motori: il rendimento η della macchina. Il rendimento è sempre un rapporto tra quanto si ottiene di lavoro e quello che si spende per ottenerlo. Nel nostro caso il lavoro ottenuto è dato da $L_p = Q_2 + Q_4$, mentre quanto si è pagato è il calore Q_2 (abbiamo pagato il petrolio per ottenerlo!), cioè il calore fornito dalla sorgente a più alta temperatura. Nota infine che Q_4 purtroppo è stato ceduto, quindi perso, inutile ai fini del lavoro....

$$1) \quad \eta = \frac{L_p}{Q_2} = \frac{Q_2 + Q_4}{Q_2} = 1 + \frac{Q_4}{Q_2} \quad \text{da cui} \quad L_p = \eta Q_2$$

e si capisce immediatamente che il rendimento è sempre minore di 1 (Q_4 è negativo?).

Un calcolo più attento ci permette di esprimere il calore in funzione delle variabili di stato

$$2) \quad Q_2 = nRT_2 \log \frac{V_C}{V_B} \quad Q_4 = -nRT_4 \log \frac{V_D}{V_A}$$



e per gli stati A e B oppure C e D che stanno sulla stessa adiabatica possiamo scrivere le relazioni derivate dalla equazione delle adiabatiche:

$$\begin{aligned} T_2 V_B^{\gamma-1} &= T_4 V_A^{\gamma-1} \\ T_2 V_C^{\gamma-1} &= T_4 V_D^{\gamma-1} \quad \text{dividendo membro a membro} \end{aligned}$$

3) $\frac{V_B}{V_C} = \frac{V_A}{V_D}$ e dalle 2 segue $\frac{Q_2}{Q_4} = -\frac{T_2}{T_4}$

così il rendimento si può esprimere

$$4) \quad \eta = 1 - \frac{T_4}{T_2}$$

che ti illuminerà:

Il rendimento di una macchina reversibile, non dipende dal gas impiegato, nè dalla sua quantità, ma solo dalle temperature delle sorgenti impiegate ed è tanto più vicino ad 1 quanto più le due temperature differiscono tra loro.

O anche che il rendimento è nullo per $T_2 = T_4$.!!!!

Il frigorifero

La macchina di Carnot sopra descritta è reversibile, quindi potremmo decidere di farla lavorare seguendo le trasformazioni nel senso inverso a prima: A->D->C->B->A.

1. l'inverso della 4; una espansione isoterma dove si acquista calore Q_4 dalla sorgente a T_4 in modulo uguale al Q_4 di prima, ma adesso di segno opposto!
2. adiabatica inverso della 3 da D a C; una compressione
3. inverso della 2; una compressione isoterma in cui si cede calore Q_2 alla sorgente T_2
4. in 1 da B ad A si espande adiabaticamente.

Il lavoro adesso è sempre quello corrispondente all'area della figura, ma è di segno contrario a prima, cioè negativo. Si interpreta come il lavoro che dobbiamo fare sul sistema per trasferire il calore Q_4 , prelevato da T_4 , nella sorgente più calda a temperatura T_2 . è proprio quello che fa un frigorifero, estrae il calore dai corpi da congelare e lo riversa nell'ambiente esterno, cioè ad una sorgente T_2 a più alta temperatura. Ricorda la griglia dietro il tuo frigo... quella è il mezzo per scambiare bene il calore con l'ambiente.

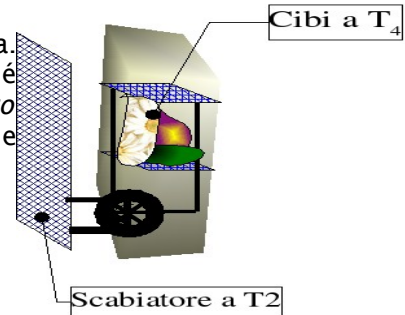
Nota anche che il calore Q_2 depositato nell'ambiente è in modulo maggiore a quello prelevato dalla sorgente T_4 !



Con quale *efficienza* ? - che è simile al rendimento di prima. Solo che ora sei interessato al rapporto inverso Q_4/L , poiché vuoi conoscere *quanto calore porti via per unità di lavoro* fatto dalle forze esterne; $L = -L_p$ necessario per raffreddare le tue vivande..

$$5) \quad \eta^R = \frac{Q_4}{L} = \frac{Q_4}{-(Q_2 + Q_4)} = \frac{T_4}{T_2 - T_4}$$

$$Q_4 = \eta^R L$$



che può andare a infinito per piccole differenze di T!

A temperatura ambiente, $T = 273^\circ$ Kelvin, con un salto di 30 gradi, ottieni una efficienza di 9.1, che leggerai: *per ogni joule di lavoro si estraggono 9.1 joule di calore dalle vivande.*

E scopri così anche che per ogni 9.1 joule di calore rendi nell'ambiente 10.1 joule (scaldandolo!).

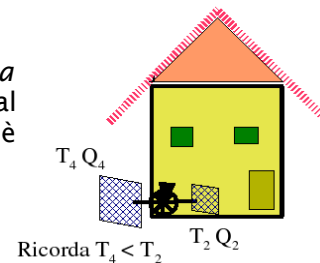
Pompa di calore

Visto che il frigo rende calore nell'ambiente in cui è immerso è pensabile una macchina che prende il calore dall'esterno di casa tua e lo riversa nell'ambiente interno anche se è a temperatura più alta. Questa macchina esiste e si chiama *pompa di calore*! Il suo ciclo è, come per il frigo, un ciclo di Carnot percorso in senso inverso.

E al solito calcoliamo ancora l'*efficienza Tecnicamente detta COP = Coefficiente di Prestazione* ed ora siamo interessati al lavoro necessario per immettere il calore in casa nostra, cioè Q_2 .

$$\eta^p = \frac{Q_2}{L} = \frac{Q_2}{-(Q_2 + Q_4)} = \frac{T_2}{T_2 - T_4}$$

$$Q_2 = \eta^p L$$



Per un salto di 27 gradi, con una temperatura esterna di zero gradi (273° Kelvin) ottieni una efficienza di circa 12; e' come dire che *ottiene 12 joule di calore per un joule di lavoro.*

Le pompe di calore sono ottime macchine, ma quelle reali viaggiano con COP di 3 o 4 e non sono ancora di largo impiego per i costi di impianto.

Il condizionatore

Ma è come un frigo! Preleva calore dall'interno della casa e lo riversa nell'ambiente esterno che d'estate è a temperatura più alta di quella interna!

GmP