

# Capitolo 1

## Introduzione alle macchine termiche

In questa nota <sup>1</sup> introduciamo il concetto di macchina termica che opera con trasformazioni cicliche per trasformare calore in lavoro. In generale questo argomento viene trattato nei libri di testo a partire dal ciclo di Carnot, il quale, come primo impatto, può essere di non semplice comprensione.

Ci proponiamo quindi di introdurre intuitivamente le macchine termiche ragionando sugli inevitabili limiti fisici che si incontrano nella realtà.

Questa introduzione intuitiva verrà poi formalizzata con rigore affrontando il ciclo di Carnot e il secondo principio della termodinamica nel corso di fisica.

### 1.1 Trasformazione di calore in lavoro

Il principio zero della termodinamica mostra l'equivalenza fra calore e lavoro in un particolare processo termodinamico, in altre parole dice che calore e lavoro non sono altro che due forme diverse dell'energia.

Il primo principio della termodinamica formalizza questa equivalenza per una qualsiasi trasformazione termodinamica nella seguente relazione:

$$Q = \Delta U + L \tag{1.1}$$

La 1.1 dice che in una qualsiasi trasformazione il calore scambiato è la somma della variazione dell'energia interna e del lavoro interessato nella trasformazione. Su questa uguaglianza si potrebbero fare molte osservazioni per distinguere e analizzare i vari casi in cui il calore totale è assorbito oppure ceduto dal sistema, il lavoro è compiuto dal sistema oppure compiuto sul sistema etc etc. Tutte queste osservazioni sono state affrontate durante lo studio delle applicazioni del primo principio della termodinamica.

Lo scopo di questa nota è quello di introdurre le macchine termiche, quindi ci limiteremo ad ana-

---

<sup>1</sup>Nella presente nota è riportata la lezione introduttiva alle macchine termiche tenuta alla classe 4<sup>a</sup> K del Liceo Scientifico di Bondeno in data 22/01/2008 dal Dott. Mirco Andreotti come attività di tirocinio per la SSIS. La presente nota è disponibile online all'indirizzo <http://df.unife.it/u/mandreot/SSIS/Tirocinio/Documenti/MacchineTermiche.pdf> [17].

lizzare e utilizzare il primo principio per le trasformazioni eseguite dalle macchine termiche.

L'uomo ha bisogno di macchine che compiano lavoro, macchine che ci facilitano e che faticano al posto nostro, non a caso per muoverci usiamo il motorino o l'automobile. Noi stessi compiamo lavoro in tutte le attività quotidiane, addirittura anche quando ci sembra di non fare nulla il nostro corpo compie lavoro, pensate per esempio al cuore che continuamente pompa il sangue nel sistema circolatorio.

La domanda che sorge spontanea é: ma da dove e come produciamo lavoro?

Il lavoro viene prodotto con macchine termiche che trasformano il calore in energia meccanica. Le prime macchine furono quelle a vapore, si brucia legna o carbone per produrre calore, il quale poi viene trasformato in lavoro dalla macchina. La nostra automobile brucia benzina producendo calore che poi viene convertito in lavoro. Il nostro stesso corpo trasforma l'energia chimica degli zuccheri in calore che poi viene trasformato in lavoro. Gli esempi potrebbero continuare all'infinito, ma in ogni caso le macchine trasformano calore in lavoro e queste sono dette macchine termiche.

## 1.2 Le trasformazioni che producono indefinitamente lavoro

A seguito di un continuo rifornimento di calore una macchina deve indefinitamente produrre lavoro. Indefinitamente non significa che produce lavoro senza spese, semplicemente si intende il fatto che finché si continua a fornire calore la macchina continua a produrre lavoro.

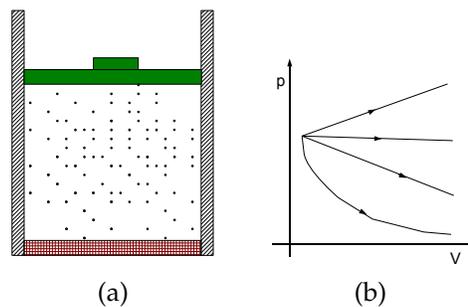


Figura 1.1: (a) Gas in un contenitore con pistone mobile. (b) Espansioni nel piano  $pV$ .

Immaginiamo ora una macchina che produca lavoro e che lavori per mezzo di un gas perfetto. A questo scopo immaginiamo un gas in un contenitore con pistone mobile a pareti laterali adiabatiche, mentre la parete inferiore può condurre calore, come rappresentato in Fig. 1.1(a).

Consideriamo ora il piano  $pV$  e ci poniamo la seguente domanda:

quale tipo di trasformazione eseguita da una macchina in grado di produrre continuamente lavoro possiamo indicare sul piano  $pV$ ?

Una tipica risposta da non esperti é quella di considerare una qualsiasi trasformazione che corrisponda ad un continuo aumento di volume come quelle indicate in Fig. 1.1(b), infatti un aumento di volume corrisponde a lavoro positivo e quindi a lavoro compiuto dal sistema/macchina.

In linea di principio la risposta é corretta, ma premettiamo subito che trasformazioni di questo tipo non possono essere quelle eseguite da una macchina reale. La giustificazione a questa affermazione é evidente se analizziamo le grandezze fisiche in gioco in queste trasformazioni.

- In alcuni casi abbiamo un indefinito aumento di volume, cioè nel tempo il volume aumenta sempre, quindi tende a diventare infinito. Sarà mai possibile realizzare fisicamente un contenitore di gas con pistone mobile e volume infinito? NO!
- In altri casi la pressione cresce indefinitamente, quindi con il tempo diventerá infinita. Sarà mai possibile realizzare concretamente un contenitore in grado di sopportare pressioni di questa entità? NO!
- Anche le temperature in gioco possono assumere valori molto elevati, addirittura ci saranno casi in cui le temperature sono cosí elevate da superare la temperatura del sole. Sarà mai praticamente possibile realizzare praticamente un contenitore in grado di sopportare tali temperature? NO!
- In altri casi aumentano indefinitamente sia il volume che la pressione che la temperatura, quindi valgono le precedenti considerazioni.

Abbiamo giustificato il fatto che trasformazioni che corrispondono a un continuo aumento di volume non possono essere realizzate da una macchina per produrre lavoro, dobbiamo quindi ancora determinare quali trasformazioni possano essere quelle giuste.

Dalle precedenti considerazioni, le trasformazioni termodinamiche che possono essere eseguite da una macchina termica per produrre lavoro devono avere le seguenti caratteristiche:

- produrre lavoro, quindi  $L > 0$ .
- mantenere limitati entro certi intervalli i parametri del gas  $p, V, T$ .
- la trasformazione deve poter essere rieseguita indefinitamente.

Le uniche trasformazioni che soddisfano le precedenti richieste sono le trasformazioni cicliche. Tali trasformazioni infatti, se scelte in modo opportuno, possono produrre un lavoro positivo, mantengono i parametri  $p, V, T$  limitati e possono essere ripetute indefinitamente. Notiamo negli esempi di trasformazioni cicliche di Fig.1.2 che per ciascuno il lavoro é positivo se scegliamo di

percorrere il ciclo in senso orario.

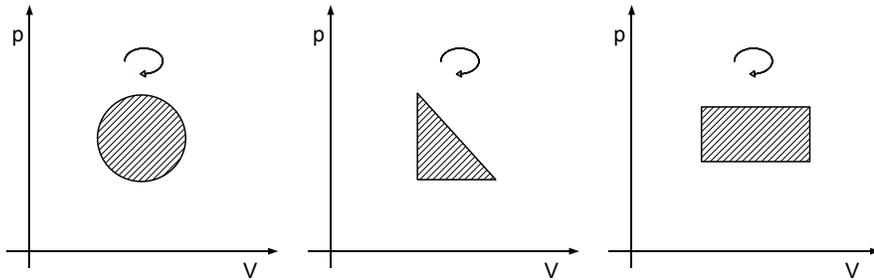


Figura 1.2: Esempi di trasformazioni cicliche con  $L > 0$  rappresentate nel piano  $pV$ .

### 1.3 La macchina termica e il rendimento

Vediamo ora quali sono le caratteristiche principali di una macchina termica ciclica in termini di calore scambiato e lavoro prodotto. Non serve considerare come caratteristica della macchina termica la variazione di energia interna, in quanto sappiamo bene che in una trasformazione ciclica tale variazione è nulla. Infatti per qualsiasi trasformazione ciclica il primo principio della termodinamica diventa:

$$Q = \Delta U + L \xrightarrow{\text{ciclo}} Q = L \quad (1.2)$$

L'uguaglianza fra  $Q$  ed  $L$  ci dice che tutto il calore scambiato nella trasformazione è uguale al lavoro prodotto. Essendo  $L > 0$ , anche  $Q > 0$ , quindi il calore  $Q$  è assorbito e sembrerebbe che tutto il calore che viene fornito al sistema sia quindi trasformato in lavoro. Questa affermazione non è corretta in quanto  $Q$  rappresenta il calore scambiato durante l'intero ciclo, ciò indica che sarà composto da una quantità di calore assorbito e da una quantità di calore ceduto. Essendo in eccesso la quantità di calore assorbito rispetto a quello ceduto il calore totale risulta positivo e quindi lo indichiamo come assorbito, ma in realtà è diverso dal calore che viene effettivamente fornito al sistema.

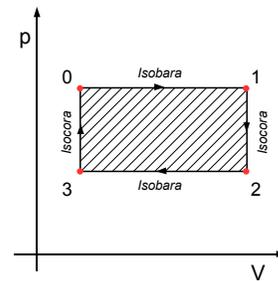


Figura 1.3: trasformazione ciclica nel piano  $pV$

Per chiarire le precedenti considerazioni analizziamo una semplice trasformazione ciclica rappresentata in Fig. 1.3. Tale trasformazione è composta in sequenza dall'espansione isobara  $0 \rightarrow 1$ , dalla isocora  $1 \rightarrow 2$ , dalla compressione isobara  $2 \rightarrow 3$  e dalla isocora  $3 \rightarrow 0$  che richiude il ciclo. Analizziamo qualitativamente il lavoro e il calore scambiato in questo ciclo.

La determinazione del lavoro non comporta nessuna difficoltà, in quanto essendo la trasformazione ciclica sappiamo che il lavoro non è altro che l'area racchiusa dal ciclo, come indicato dall'area evidenziata in Fig. 1.3. Possiamo inoltre affermare che tale lavoro è positivo, in quanto la trasformazione ciclica è percorsa in senso orario. Essendo il lavoro positivo, ciò indica che è un lavoro prodotto dal sistema, quindi complessivamente il sistema produce lavoro:

$$L > 0 \implies \text{Lavoro prodotto dal sistema} \quad (1.3)$$

Per quanto riguarda il calore totale scambiato durante il ciclo dobbiamo analizzare i calori scambiati in ciascuna trasformazione.

- $Q_{01} > 0 \implies$  calore **assorbito** dal sistema.
- $Q_{12} < 0 \implies$  calore **ceduto** dal sistema.
- $Q_{23} < 0 \implies$  calore **ceduto** dal sistema.
- $Q_{30} > 0 \implies$  calore **assorbito** dal sistema.

Notiamo che in 2 trasformazioni abbiamo calori ceduti, mentre nelle altre due abbiamo calori assorbiti. Possiamo quindi, per comodità, raggruppare i calori scambiati nelle singole trasformazioni in calore totale assorbito ( $Q_{ASS}$  che è positivo) e calore totale ceduto ( $Q_{CED}$  che è negativo):

$$Q_{ASS} = Q_{01} + Q_{30} > 0 \quad (1.4)$$

$$Q_{CED} = Q_{12} + Q_{23} < 0 \quad (1.5)$$

Essendo il calore totale  $Q$  scambiato durante l'intero ciclo la somma dei singoli calori, allora sarà anche la somma fra calore assorbito e calore ceduto, inoltre essendo  $Q_{CED} < 0$  possiamo tranquillamente scriverlo come  $Q_{CED} = -|Q_{CED}|$ , quindi il calore totale diventa:

$$Q = Q_{01} + Q_{30} + Q_{12} + Q_{23} = Q_{ASS} + Q_{CED} = Q_{ASS} - |Q_{CED}| \quad (1.6)$$

Come abbiamo accennato prima notiamo che il calore totale è positivo e quindi diciamo che complessivamente è assorbito, ma in realtà il calore che effettivamente viene fornito al sistema è  $Q_{ASS}$ , in quanto nel calore totale c'è compreso anche una parte di calore ceduto  $Q_{CED}$ .

Riprendiamo ora il primo principio della termodinamica per questo ciclo esplicitando il calore totale con la precedente differenza:

$$Q_{ASS} - |Q_{CED}| = L \implies Q_{ASS} = L + |Q_{CED}| \quad (1.7)$$

Abbiamo espresso il calore fornito al sistema come somma del lavoro e di  $|Q_{CED}|$ , in quanto vista in questo modo, tale relazione indica che per produrre un certo lavoro  $L$  dobbiamo fornire effettivamente al sistema una quantità di calore  $Q_{ASS}$ . Tale quantità di calore sarà quindi in parte

trasformata in lavoro e in parte in calore  $|Q_{CED}|$  che viene perso. Possiamo vedere  $Q_{ASS}$  come la quantità di combustibile che, fornito alla macchina, in parte serve per produrre lavoro  $L$  e in parte viene perso sotto forma di calore  $|Q_{CED}|$ . Una macchina termica può quindi essere schematizzata come in Fig. 1.4.

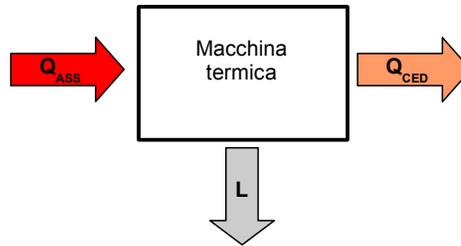


Figura 1.4: Schematizzazione della macchina termica.

Dalle precedenti considerazioni risulta quindi chiaro che quando parliamo di macchina termica ciclica siamo interessati in primo luogo a conoscere quanto questa macchina è efficiente, ossia sapere quanto lavoro possiamo ricavare da una certa quantità di calore effettivamente fornito al sistema. Per esempio se abbiamo due macchine termiche che a parità di una quantità di calore  $Q_{ASS} = 20J$  producono rispettivamente i lavori  $L_1 = 10J$  e  $L_2 = 5J$ , risulta chiaro che la prima macchina è più efficiente e la preferiamo alla seconda, in quanto riesce a produrre più lavoro rispetto alla seconda a parità di calore fornito.

Possiamo quindi identificare se una macchina è più o meno efficiente definendo il rendimento di una macchina termica come il rapporto fra il lavoro prodotto e il calore fornito al sistema:

$$\eta = \frac{L}{Q_{ASS}} \quad (1.8)$$

Essendo  $L < Q_{ASS}$  il rendimento sarà una quantità minore di 1. Sarà 1 solo per casi estremi, concretamente non raggiungibili. Possiamo inoltre vedere che il rendimento è sempre un quantità positiva per una macchina termica ciclica che produce lavoro. Possiamo quindi dire che:

$$0 < \eta < 1 \quad (1.9)$$

Possiamo, in modo equivalente, esprimere il rendimento in termini di  $Q_{ASS}$  e  $|Q_{CED}|$  con la seguente relazione:

$$\eta = 1 - \frac{|Q_{CED}|}{Q_{ASS}} \quad (1.10)$$

## 1.4 Conclusioni e approfondimenti

Con questa breve nota si é voluto dare una definizione pratica di macchina termica, fornendo quelle che sono le principali richieste che devono essere rispettate, ossia il fatto che la macchina termica per poter essere realizzata praticamente deve lavorare con una trasformazione ciclica. Abbiamo inoltre definito il parametro rendimento che ci permette di classificare la bontá di una macchina termica.

Maggiori approfondimenti saranno trattati durante il corso di fisica con il ciclo di Carnot e il secondo principio della termodinamica.

Curioso e istruttivo sarebbe analizzare qualitativamente il funzionamento di una delle prime macchine termiche cicliche realizzate dall'uomo: la macchina a vapore. A tale proposito indichiamo un sito internet sul quale si possono trovare diverse animazioni della macchina a vapore, dall'animazione completa alle animazioni che ne illustrano i dettagli. Sempre sullo stesso sito si puó visionare un video di un modellino di macchina a vapore. Il link del sito é <http://www.racine.ra.it/ungaretti/SeT/macvapor/> [13].



# Bibliografia

- [1] E. Fermi 'Termodinamica', Editore Boringhieri, 1982.
- [2] S. Rosati 'Fisica generale' Vol. 1, Casa Editrice Ambrosiana, 1994.
- [3] A. Caforio, A. Ferilli 'Le leggi della fisica 2', Le Monnier 2005.
- [4] U. Amaldi, L'Amaldi 'Introduzione alla fisica' vol.1, Zanichelli, 2004  
U. Amaldi, L'Amaldi 'Introduzione alla fisica' vol.2, Zanichelli, 2004
- [5] J. Walker 'Fisica' Meccanica, vol 1, Zanichelli, 2004
- [6] M. E. Bergamaschini, P. Marazzini, L. Mazzoni 'L'indagine del mondo fisico' Calore e termodinamica Vol. C, C. Signorelli Editore, Parma 2004  
M. E. Bergamaschini, P. Marazzini, L. Mazzoni 'L'indagine del mondo fisico' Elettromagnetismo Vol. E, C. Signorelli Editore, Parma 2004
- [7] M. Bergamini e A. Trifone 'Il calcolo letterale' Moduli di Matematica C, Zanichelli 2004.  
M. Bergamini e A. Trifone 'La retta e i sistemi lineari' Moduli di Matematica E, Zanichelli 2004.  
M. Bergamini e A. Trifone 'La geometria euclidea' Moduli di Matematica F, Zanichelli 2004.  
M. Bergamini e A. Trifone 'Trigonometria, vettori, numeri complessi' Moduli di Matematica O, Zanichelli 2004.  
M. Bergamini e A. Trifone 'Diseguazioni e funzioni' Moduli di Matematica S, Zanichelli 2004.  
M. Bergamini e A. Trifone 'I limiti' Moduli di Matematica U, Zanichelli 2004.
- [8] L. Lamberti, L. Mereu, A. Nanni, 'Il Manuale di Matematica - Secondo', Etas Libri 1992.
- [9] Sito internet del Liceo Sociale G. Carducci di Ferrara:  
<http://www.comune.fe.it/carducci/home.html>, per il POF seguire i link offerta formativa.  
Sito internet del Liceo Scientifico di Bondeno (FE):  
<http://www.comune.bondeno.fe.it/scuole/liceo/>, per il POF seguire i link Istituto→Pof.
- [10] Applet Java per la simulazione di un gas reale:  
<http://jersey.uoregon.edu/vlab/Thermodynamics/therm1f.html>

- [11] Applet della McGraw-Hill per la simulazione delle trasformazioni di un gas perfetto:  
[http://highered.mcgraw-hill.com/sites/0078458137/student\\_view0/chapter12/thermodynamics\\_applet.html](http://highered.mcgraw-hill.com/sites/0078458137/student_view0/chapter12/thermodynamics_applet.html)
- [12] Software per la simulazione dei gas ideali, scaricabile dal sito:  
<http://www.physics-software.com/software.html>
- [13] Sito internet con applet per la macchina a vapore:  
<http://www.racine.ra.it/ungaretti/SeT/macvapor/>
- [14] M. Andreotti 'Dalla nascita della meccanica dei quanti alla dualità onda-corpuscolo', versione preliminare del percorso didattico di fisica svolto nell'ambito del tirocinio indiretto SSIS AA 2007/2008.  
<http://df.unife.it/u/mandreot/SSIS/Tirocinio/Documenti/UDFisicaAndreotti.pdf>
- [15] M. Andreotti 'Applicazioni del calcolo differenziale: studio di funzione reale di variabile reale e problemi di massimo e di minimo (anche per via elementare)', versione preliminare del percorso didattico di fisica svolto nell'ambito del tirocinio indiretto SSIS AA 2007/2008.  
<http://df.unife.it/u/mandreot/SSIS/Tirocinio/Documenti/UDMatematicaAndreotti.pdf>
- [16] M. Andreotti 'Problemi di massimo e di minimo con il software geometrico CaR', versione preliminare del percorso didattico sull'utilizzo dei software matematici nella didattica svolto nell'ambito del laboratorio di attività didattiche e trasversali, SSIS AA 2007/2008.  
<http://df.unife.it/u/mandreot/SSIS/Tirocinio/Documenti/UDSoftwareAndreotti.pdf>
- [17] M. Andreotti, 'Introduzione alle macchine termiche', Appunti per la classe 4<sup>a</sup> K del Liceo Scientifico di Bondeno nell'ambito del tirocinio attivo 2007.  
<http://df.unife.it/u/mandreot/SSIS/Tirocinio/Documenti/MacchineTermiche.pdf>
- [18] M. Andreotti, 'Verifica di un limite con la definizione', Appunti per la classe 5<sup>a</sup> A del Liceo delle Scienze Sociali G. Carducci di Ferrara nell'ambito del tirocinio attivo 2007.  
<http://df.unife.it/u/mandreot/SSIS/Tirocinio/Documenti/NotaLimiti.pdf>