

TERMODINAMICA 5

MACCHINE TERMICHE

Una **macchina termica** è un apparato che compie una trasformazione ciclica, cioè con stato iniziale uguale a quello finale, trasformando calore in lavoro.

Le macchine termiche più semplici di tutte sono quelle formate da una sostanza a contatto con una sorgente di calore calda, detta *caldaia*, e con una sorgente fredda, detta *condensatore*.

Per esempio, la sostanza potrebbe il gas contenuto in un recipiente con un pistone libero di muoversi (una *macchina a vapore*). Se scaldiamo il gas con una fiamma (la caldaia) il gas compie una trasformazione isobara e in parte si scalda e in parte spinge il pistone verso l'alto facendo lavoro. Se vogliamo riportare poi il pistone in basso per ritornare allo stato iniziale e ri-iniziare il ciclo possiamo ora mettere il gas caldo a contatto con un refrigerante (il condensatore) per raffreddarlo alla temperatura iniziale. In tal modo abbiamo trasformato il calore ceduto dalla caldaia al gas in lavoro.

Non tutto il calore assorbito è trasformato in lavoro: giocoforza, se vogliamo raffreddare il gas a contatto tramite il condensatore, il gas stesso deve cedere almeno parte del calore assorbito al condensatore.

Convenzionalmente e per semplicità, si assume che la caldaia abbia una temperatura fissa T_2 e il condensatore una temperatura fissa T_1 (con $T_2 > T_1$ quindi). Se Q_2 è il calore estratto dalla caldaia e Q_1 il calore assorbito dal condensatore si avrà quindi, per la conservazione dell'energia:

$$L = Q_2 - Q_1 \quad (\text{macchina termica})$$

Rendimento

Si chiama **rendimento** η (lettera greca “eta”) di una macchina termica il rapporto fra il calore assorbito e il lavoro fatto. Per una macchina semplice del tipo suddetto che opera solo con una caldaia e un condensatore si ha quindi:

$$\eta = \frac{L}{Q_2} = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{Q_1}{Q_2}$$

Chiaramente, per la conservazione dell’energia, non si potrà produrre più lavoro di quanto non sia l’energia assorbita dalla caldaia ($L \leq Q_2$) e quindi in generale $0 \leq \eta \leq 1$. In genere si preferisce dare il rendimento in percentuale moltiplicando il risultato della formula precedente per 100 e quindi $0\% \leq \eta \leq 100\%$. Il caso $\eta = 0\%$ corrisponde quindi ad una macchina completamente inefficiente che non riesce a trasformare neanche un Joule del calore assorbito dalla caldaia in lavoro: $L=0$. Il caso $\eta = 100\%$ corrisponde invece ad una macchina ideale capace di trasformare tutto il calore assorbito dalla caldaia in lavoro: $L=Q_2$.

Come accennato prima, però, per il caso della macchina a vapore non è possibile aspettarsi di poter trasformare tutto il calore estratto dalla caldaia in lavoro, perchè in generale per chiudere il ciclo e ricominciare bisognerà giocoforza cedere calore ad un refrigerante.

2° PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA

E’ questo il contenuto del **secondo principio della termodinamica**, che si può enunciare in varie maniere alternative (ma tutte equivalenti):

- è impossibile realizzare una macchina termica il cui unico risultato sia trasformare tutto il calore assorbito in lavoro: $L < Q_2$ (enunciato di Kelvin)
- è impossibile realizzare una macchina termica il cui unico risultato sia far passare calore da una sorgente fredda ad una calda (enunciato di Clausius)
- è impossibile realizzare una macchina termica con rendimento del 100%

In particolare, dall’enunciato di Clausius, discende che se vogliamo costruire una macchina termica che opera al contrario, tipo il *frigorifero* dove estraiamo calore da una sorgente

fredda (l'interno del frigorifero) e lo cediamo ad una calda (l'ambiente circostante), dobbiamo giocoforza assorbire energia/lavoro da una fonte esterna (l'energia elettrica: se spegniamo la corrente il frigorifero cessa di funzionare).

Trasformazioni reversibili ed irreversibili

Si dice che una trasformazione di un sistema è **reversibile** quando si può immaginare idealmente di *rovesciare* la trasformazione, cioè procedere al contrario, ritornando allo stato iniziale.

Si tratta di una trasformazione ideale, cioè di un'astrazione matematica: in pratica in natura tutte le trasformazioni sono sempre **irreversibili** (per esempio se bruciamo un foglio di carta non possiamo certamente tornare indietro riavendo di nuovo in mano il foglio di carta intero).

Se consideriamo però, ad esempio, un gas perfetto contenuto in un cilindro con un pistone libero di muoversi e se tiriamo molto lentamente in su il pistone il gas si espanderà in una trasformazione che con ottima approssimazione si può considerare reversibile: possiamo ritornare allo stato di partenza spingendo lentamente indietro il pistone.

E' essenziale in questo esempio che l'estrazione/compressione del pistone avvenga molto lentamente (altrimenti si creano delle turbolenze nel gas) e che sia trascurabile ogni attrito fra il pistone e le pareti del contenitore.

Massimo rendimento – Teorema di Carnot

Il concetto ideale di trasformazione reversibile è importante perchè si può dimostrare che, a parità di altre condizioni (sostanza, caldaia, condensatore etc) il **massimo rendimento** di una macchina termica si avrà quando il ciclo è reversibile. In altre parole:

$$\eta_{REV} > \eta_{IRREV}.$$

risultato noto come **teorema di Carnot**. E' inoltre implicito nel teorema che tutte i possibili cicli reversibili di una macchina termica (a parità di altre condizioni), dovendo essi avere il massimo rendimento possibile, avranno quindi tutti rendimento uguale fra loro.

Ciclo di Carnot

Per calcolare quindi il massimo rendimento possibile di una macchina termica è logico andare a studiare il più semplice ciclo reversibile immaginabile. Per una macchina termica semplice che

lavora con una sola caldaia e un solo condensatore, il più semplice ciclo reversibile concepibile è il **ciclo di Carnot**. Si tratta di un ciclo di un gas perfetto composto da 4 fasi successive:

1. espansione isoterma a temperatura T_2 (cioè gas che si scalda a contatto colla caldaia)
2. espansione adiabatica che fa scendere la temperatura a T_1 (cioè gas che continua ad espandersi ma ora isolato termicamente dalla caldaia)
3. compressione isoterma a temperatura T_1 (cioè gas che si raffredda a contatto col condensatore)
4. compressione adiabatica che riporta la temperatura a T_2 e il gas allo stato iniziale (cioè gas che continua a contrarsi ma ora di nuovo isolato termicamente dal condensatore)

Tutte queste fasi vengono percorse lentamente e in assenza di attriti in modo da poterle considerare reversibili. Applicando il primo principio della termodinamica e l'equazione di stato dei gas perfetti a questo ciclo si può dimostrare che il suo rendimento, e quindi quello di un qualunque altro ciclo reversibile operante colla stessa caldaia e lo stesso condensatore, risulta:

$$\eta_{REV} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

E' questo quindi il massimo rendimento possibile di una macchina termica che opera fra le temperature T_2 (di una caldaia) e T_1 (di un condensatore).