



asdf

LA MACCHINA TERMICA

9 March 2012

Premessa

Nel seguente articolo cercherò di analizzare gli aspetti essenziali che ci serviranno per capire in linea generale cosa sia una macchina termica e per cercare di fare delle brevi considerazioni (analitiche e non) in merito.

Onde evitare di fare una trattazione troppo lunga e "continua", ho cercato di suddividere in varie "sezioni" l'articolo (si consulti a riguardo l'indice cliccando su **Mostra indice**) al fine di comprendere meglio determinati concetti. Il "punto di partenza" è l'[articolo](#) dedicato ai bilanci di entropia nei sistemi termodinamici chiusi ed aperti.

Buona lettura.

SET

Nel corso della trattazione ricorreremo all'utilizzo del SET e di quello che poi vedremo essere il SEM.

Partiamo dal primo.

Il **SET**, **Serbatoio di energia termica**, è un sistema ideale di volume costante e con capacità termica infinita atto al trasferimento di energia nella sola modalità calore. Questo trasferimento di energia avviene a temperatura costante e con generazione entropica interna nulla.

Dal punto di vista analitico :

$$T_{SET} = cost. \quad V_{SET} = cost. \quad S_{gen}^{SET} = 0$$

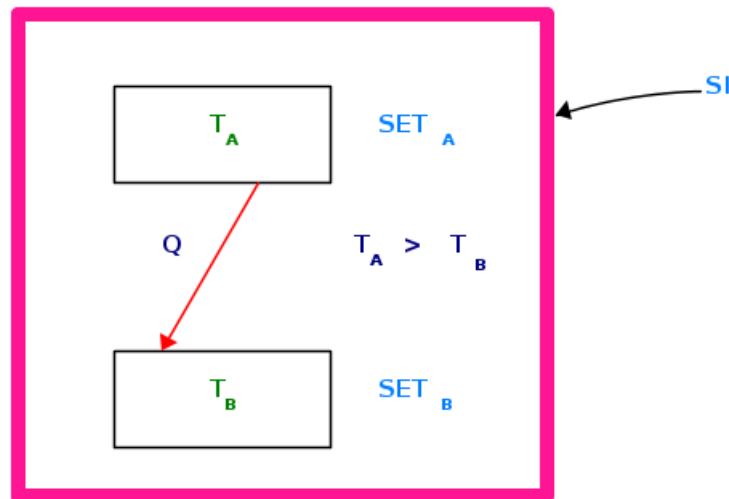
Possono essere considerati dei SET, ad esempio, un sistema termostato o comunque un sistema la cui capacità termica è molto grande.

Il calcolo della variazione di entropia di un SET provocata da una interazione termica è :

$$\Delta S^{SET} = \int \left(\frac{\delta Q}{T} \right)_{SET} = \left(\frac{Q}{T} \right)_{SET}$$

In sostanza la variazione di entropia è pari al rapporto tra l'energia termica trasferita e la temperatura del SET : sarà positiva se il SET riceve energia e negativa nel caso contrario.

Consideriamo la seguente figura :



Essa raffigura schematicamente l'interazione tra due *SET* che si trovano a temperature differenti ed è detta *Q* l'energia termica che viene trasferita durante l'intervallo di tempo di osservazione.

I due SET nel loro insieme costituiscono un sistema isolato *SI*.

Il fenomeno è irreversibile e una misura del **grado di irreversibilità** è data dalla generazione di entropia del sistema complessivo isolato, che calcoliamo come segue :

$$S_{gen}^{SI} = \frac{Q}{T_B} - \frac{Q}{T_A} = Q \left(\frac{1}{T_B} - \frac{1}{T_A} \right) > 0$$

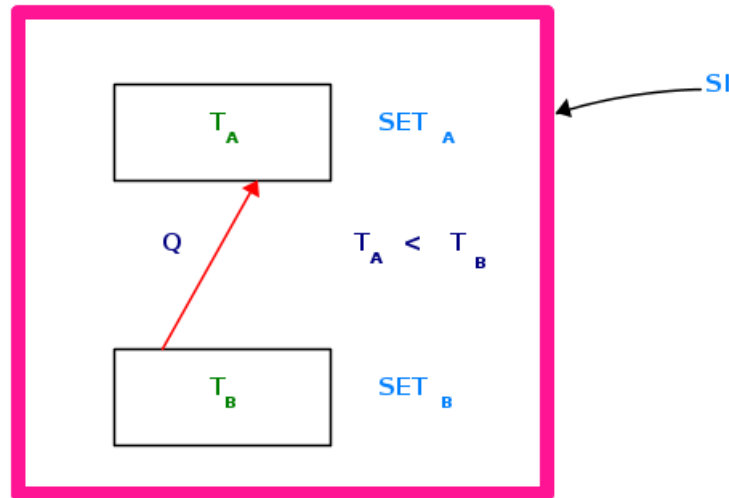
Fissata *Q*, il grado di irreversibilità termica è una funzione crescente della differenza di temperatura tra i *SET*: affinché l'irreversibilità tenda a zero, deve tendere a zero la differenza di temperatura tra i due *SET*.

Possiamo dire che questa generazione entropica è **esterna** poiché i *SET* per ipotesi hanno generazione entropica interna nulla, e quindi l'entropia che si è generata è dovuta all'interazione e non a quello che avviene all'interno dei sistemi.

Ora ci chiediamo: è possibile una interazione termica "al contrario", cioè da una temperatura inferiore ad una superiore ?

Rispondiamo immediatamente ed in modo molto semplice andando a calcolare l'entropia generata nel sistema isolato.

Consideriamo a tal proposito la seguente figura schematica :



L'entropia generata è quindi :

$$S_{gen}^{SI} = \frac{Q}{T_A} - \frac{Q}{T_B} = Q \left(\frac{1}{T_A} - \frac{1}{T_B} \right) < 0$$

e risulterà negativa, il che contraddice quanto già sappiamo, cioè che l'entropia generata è sempre positiva.

Quindi il trasferimento spontaneo di energia termica da una temperatura inferiore ad una superiore è impossibile.

SEM

In maniera analoga a quanto fatto per il SET, introduciamo ora il SEM.

Il **SEM**, **Seratoio di energia meccanica**, è un sistema ideale che consente il trasferimento di energia nella sola modalità lavoro. Questo trasferimento di energia è caratterizzato da generazione entropica interna nulla :

$$S_{gen}^{SEM} = 0 .$$

L'entropia del SEM, provocata da una interazione energetica nella forma lavoro, è pari a zero :

$$\Delta S^{SEM} = 0 \ .$$

I 3 "casi"

Fatte le opportune premesse, possiamo cominciare con una definizione iniziale.

La **macchina termica** è un sistema termodinamico che interagisce con l'ambiente e converte **con continuità** energia nella modalità calore in energia nella modalità lavoro.

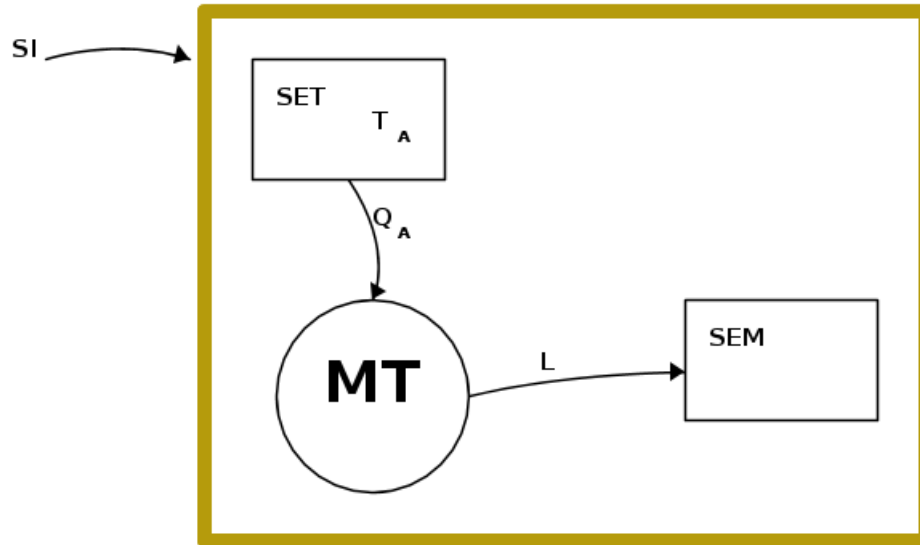
ai fini della trattazione, schematizziamo l'ambiente con un insieme di SET (il cui numero e le cui temperature sono fissate di caso in caso e che sono necessari per i trasferimenti di energia termica) e un SEM, che consente il trasferimento di energia nella modalità lavoro.

Poiché la conversione è continua, la macchina **deve operare ciclicamente**, cioè deve periodicamente ritornare nello stato di partenza per poi ripercorrere di nuovo gli stessi stati. Il periodo di osservazione coinciderà quindi con un numero intero di cicli.

In questo periodo tutte le proprietà assumeranno di nuovo il valore di partenza, cioè:

$$\Delta U^{MT} = \Delta S^{MT} = 0 \ .$$

Consideriamo la seguente figura schematica :



Relativamente alla conversione dell'energia termica Q_A in energia meccanica L , potrebbero verificarsi, ipoteticamente, **tre casi** :

- $Q_A < L$ (1);
- $Q_A = L$ (2);
- $Q_A > L$ (3).

Il caso (1) è quello in cui l'**energia convertita è maggiore dell'energia da convertire** e viola la prima legge della termodinamica (e anche la seconda) ed è da scartare. Una macchina che opera secondo questa modalità è detta **macchina perpetua del primo tipo**.

il caso (2) è quello in cui l'**energia convertita è uguale all'energia da convertire**. Questo caso viola invece la seconda legge della termodinamica. Vediamo il perché. Consideriamo a tal proposito il sistema complessivo isolato, la variazione di entropia si esprime come :

$$\Delta S^{SI} = \Delta S^{SET} + \Delta S^{SEM} + \Delta S^{MT} .$$

Se ci ricordiamo che :

$$\Delta S^{SET} = \left(\frac{Q}{T} \right)_{SET}$$

$$\Delta S^{SEM} = 0$$

$$\Delta S^{MT} = 0$$

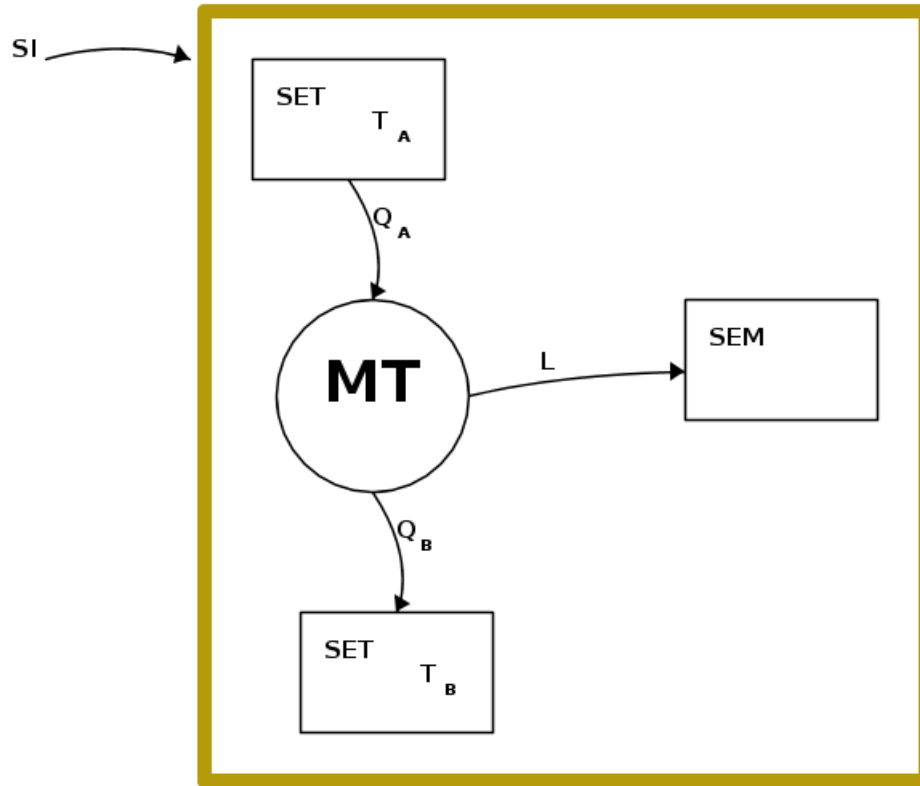
abbiamo :

$$\Delta S_{gen}^{SI} = -\frac{Q_A}{T_A}$$

che è un risultato chiaramente in contrasto con la seconda legge della termodinamica.

Una macchina che opera secondo questa modalità è detta **macchina perpetua del secondo tipo**.

Il caso (3) è quello in cui l'**energia convertita è minore dell'energia da convertire**. Questo è il solo caso possibile. Poiché, quindi, $L < Q_A$, la macchina dovrà cedere nella modalità calore all'ambiente la parte di Q_A che non ha convertito in lavoro. Ovviamente dovrà essere disponibile un secondo SET, la cui temperatura sia ovviamente sufficientemente bassa. Questo caso è rappresentato schematicamente nella figura schematica che segue :



Il rendimento termodinamico

Introduciamo ora un utile parametro adimensionale. Questo parametro fornisce una misura del grado di conversione che è capace di realizzare una macchina termica. E' detto **rendimento termodinamico** ed è definito come segue :

$$\eta = \frac{L}{Q_A}$$

cioè come il rapporto tra l'energia convertita (il lavoro) e quella che deve essere convertita (il calore fornito alla macchina termica).

Scriviamo la prima legge della termodinamica per una superficie di controllo che racchiude la macchina termica e per un numero intero di cicli :

$$Q_A = Q_B + L .$$

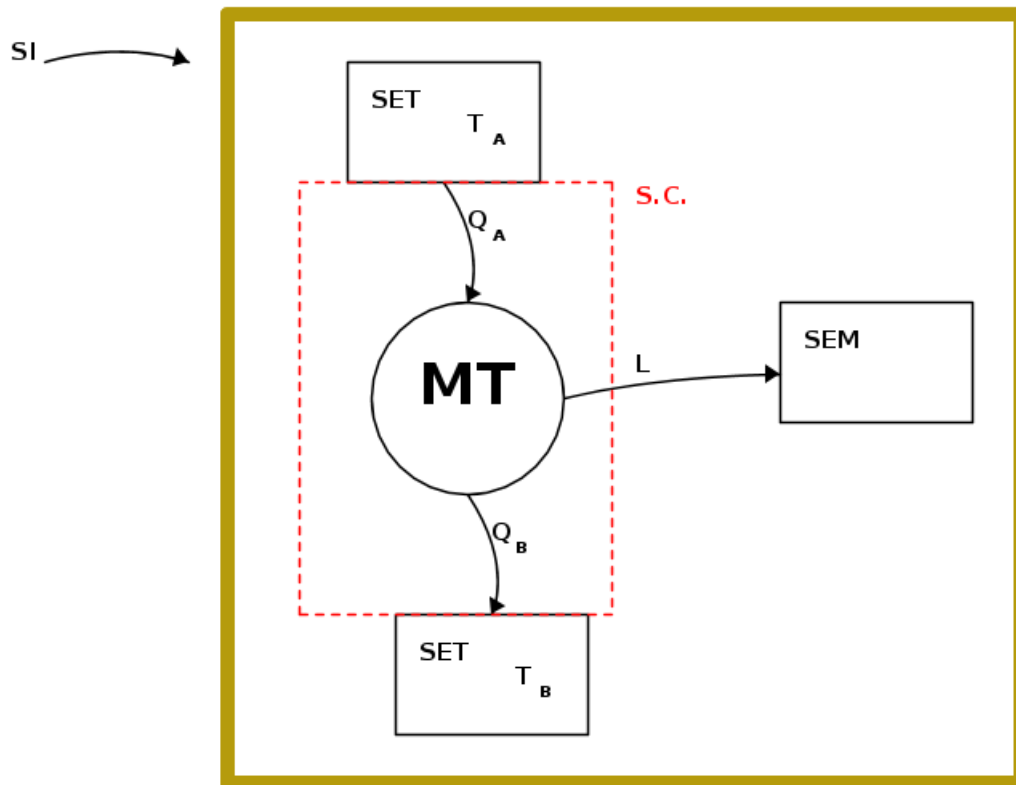
Sostituiamo l'espressione del lavoro ricavabile dalla relazione precedente nella relazione che esprime il rendimento termodinamico :

$$\eta = \frac{Q_A - Q_B}{Q_A} = 1 - \frac{Q_B}{Q_A} \quad (4)$$

Poiché abbiamo visto prima che Q_B non può essere pari a zero, la (4) mette in evidenza che il rendimento non può essere mai pari ad uno. Non ha senso però considerare un rendimento nullo (cioè vuol dire che non ci sarebbe alcuna conversione), possiamo dire che :

$$0 < \eta < 1 \quad (7).$$

Consideriamo ora la seguente figura :



in cui abbiamo considerato una superficie di controllo $S.C.$ che racchiude la macchina termica MT e si estende fino a lambire i SET : sarà quindi costante la temperatura delle parti della superficie di controllo attraversate dai flussi termici. Possiamo quindi scrivere :

$$\int \frac{\delta Q}{T} + S_{gen}^{MT} = \Delta S^{MT}$$

che può essere "semplificata" nella seguente espressione :

$$S_{gen}^{MT} = \frac{Q_B}{T_B} - \frac{Q_A}{T_A} \quad (5)$$

La (5) permette di calcolare subito quella che è la generazione di entropia derivante dal processo di conversione energetica di una macchina termica.

Qualitativamente possiamo dire che la generazione entropica sarà tanto maggiore quanto maggiori saranno le differenze finite di temperatura che causano i flussi termici, e quanto maggiori saranno gli effetti dissipativi di tipo meccanico.

Consideriamo l'espressione (5), risolviamo l'espressione rispetto al rapporto Q_B / Q_A ed abbiamo:

$$\frac{Q_B}{Q_A} = \frac{T_B}{T_A} - \frac{T_B S_{gen}^{MT}}{Q_A} .$$

Sostituiamo tale espressione in quella del rendimento, ottenendo :

$$\eta = 1 - \frac{T_B}{T_A} - \frac{T_B S_{gen}^{MT}}{Q_A} \quad (6) .$$

Questa nuova espressione del rendimento mette in luce che il rendimento stesso è differenza di due termini :

- $1 - \frac{T_B}{T_A}$, funzione solo delle temperature dei due SET ;
- $\frac{T_B S_{gen}^{MT}}{Q_A}$, funzione di T_B , Q_A e della generazione entropica.

Si vede quindi che se consideriamo il singolo caso, fissando quindi T_A , T_B e Q_A , vediamo che il rendimento è tanto maggiore quanto minore è la generazione entropica ed, in particolare, è massimo quando la generazione entropica è nulla, cioè nel caso di macchina ideale reversibile. Si può parlare quindi di un η_{rev} :

$$\eta_{rev} = 1 - \frac{T_B}{T_A}$$

Possiamo quindi riformulare la disuguaglianza (7) e scrivere :

$$0 < \eta < \eta_{rev} < 1$$

da cui si deduce che il limite massimo del rendimento è il rendimento della macchina reversibile più che l'unità.

Il rendimento di seconda legge

Può essere utile, inoltre, effettuare un confronto tra le prestazioni di una macchina reale, con tutte le sue irreversibilità, con le prestazioni che avrebbe una macchina ideale reversibile a parità di T_A e T_B .

In altre parole vogliamo cercare di capire di quanto una macchina reale è più o meno vicina dal punto di vista delle prestazioni a quella ideale.

Definiamo quindi un secondo parametro adimensionale, che è pari al rapporto tra il rendimento termodinamico η e il rendimento termodinamico reversibile, η_{rev} :

$$\psi = \frac{\eta}{\eta_{rev}}$$

che è detto **rendimento di seconda legge**, perché basato sulla definizione di η_{rev} , ricavata ricorrendo alla seconda legge della termodinamica.

Il rendimento di seconda legge varierà nel modo che segue :

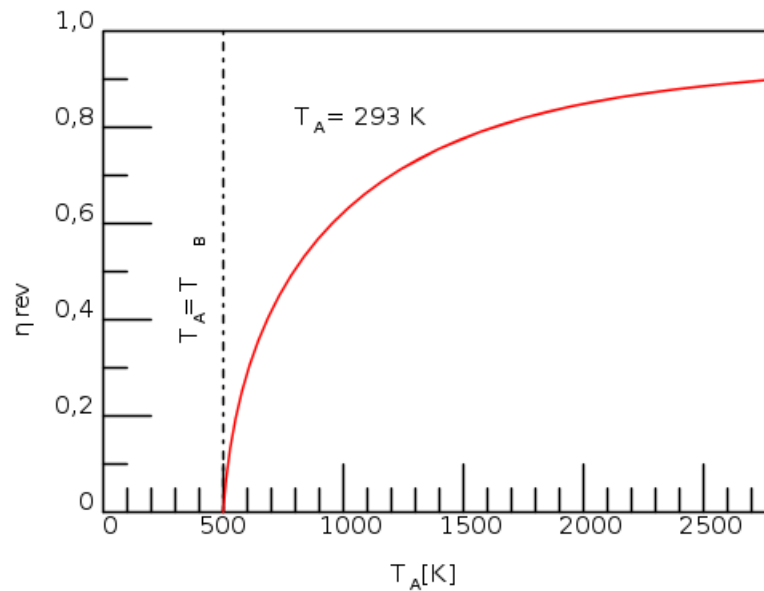
$$0 < \psi < 1 .$$

Dalla (6) si deduce la convenienza di realizzare delle macchine termiche che prelevino l'energia da convertire da SET che abbiano la temperatura più elevata possibile e che cedano l'energia non convertita a SET con la minore temperatura possibile.

Per quanto riguarda la T_B , va detto che essa nella realtà quotidiana coincide con la temperatura ambiente fisico esterno all'impianto ed è quindi un dato non controllabile, ma certamente fissato.

A tal proposito, nella figura che segue, è riportato l'andamento del rendimento di

seconda legge in funzione della T_A , avendo considerato per T_B un "valore standard" che è quello di 20° C, dell'ambiente terrestre :



Va detto però che anche la T_A non può variare in maniera arbitraria per via di alcuni limiti tecnologici (come la resistenza dei materiali) che impediscono alla T_A di innalzarsi sempre di più.

La macchina di Carnot

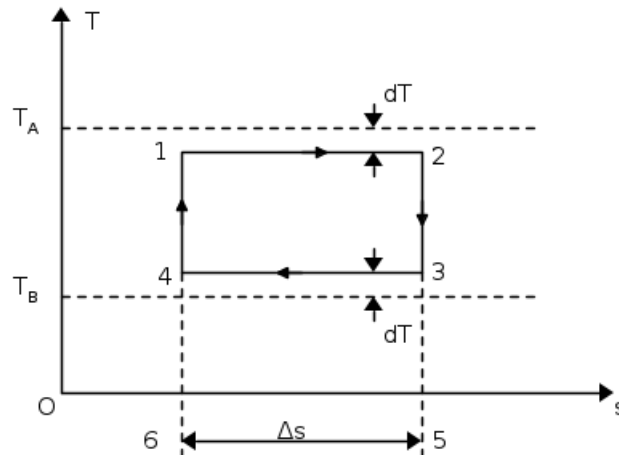
La **macchina di Carnot (MC)** è una macchina reversibile che evolve secondo un **ciclo di Carnot**.

Il ciclo di Carnot è costituito da **quattro trasformazioni** :

- due lungo le quali avvengono i trasferimenti di energia termica;
- due adiabatiche.

Le prime due trasformazioni dovendo essere reversibili devono avvenire con una differenza di temperatura che tende a zero : una sarà una isoterma alla temperatura T_A e l'altra alla temperatura T_B .

Le due adiabatiche reversibili saranno isoentropiche. Il ciclo è così composto da due isoterme e due isoentropiche. La seguente figura ritrae il ciclo Carnot rappresentato sul piano TS :



L'area 1256 rappresenta la q_A , cioè energia ceduta per unità di massa, dal SET alla macchina; l'area 3564 rappresenta la q_B , energia specifica ceduta dalla macchina all'ambiente. L'area 1234, uguale alla differenza tra le due aree prima citate, è l'energia come lavoro ottenuta dalla conversione.

Il rendimento della macchina di Carnot è :

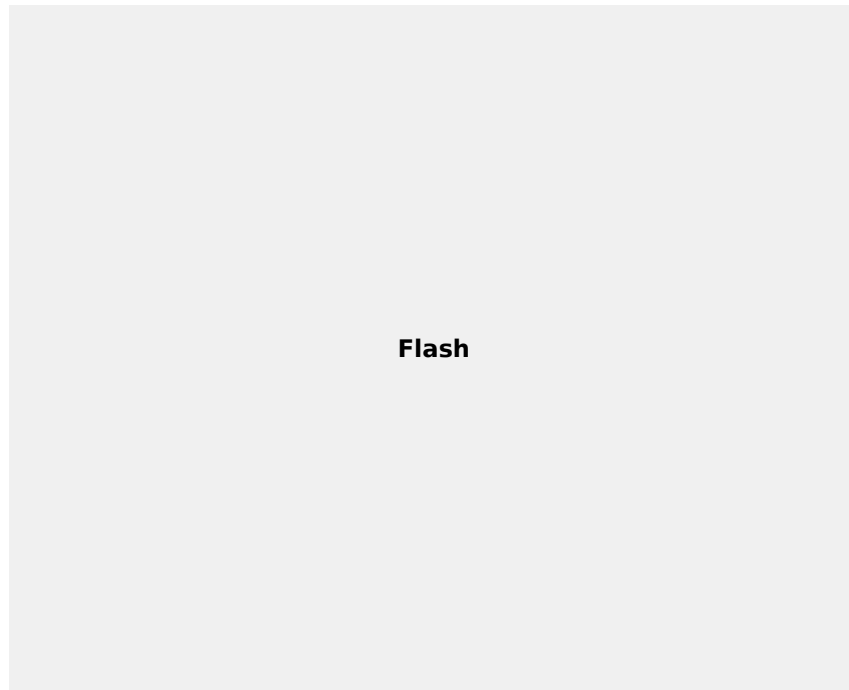
$$\eta_{MC} = \frac{1234}{1256} = \frac{(T_A - T_B)\Delta s}{T_A \Delta s} = \frac{T_A - T_B}{T_A} = 1 - \frac{T_B}{T_A}$$

e risulta che :

$$\eta_{MC} = \eta_{rev} .$$

La corrispondenza tra aree sul piano TS ed energia termica specifica è possibile perché il ciclo di Carnot è costituito per definizione da trasformazioni reversibili. Il ciclo è percorso in **senso orario** e quindi si parla in tal caso di **ciclo diretto** e quindi la q_A sarà positiva ed in valore assoluto maggiore della q_B (negativa). La differenza $q_A - q_B$ è positiva, cioè **il lavoro è fatto dalla macchina sull'ambiente**.

Un video interessante



Bibliografia

Elementi di termodinamica applicata - Cesarano, Mazzei.

Estratto da "<http://www.electroyou.it/mediawiki/index.php?title=UsersPages:Asdf:la-macchina-termica>"