

ITI OMAR Dipartimento di Meccanica

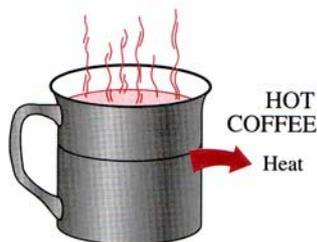
Introduzione allo studio delle Macchine termiche

(parte seconda)

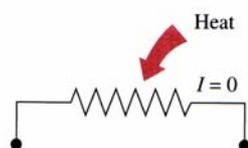
Yunus A. Çengel, Michael A. Boles
Thermodynamics: an engineering approach 4th Edition McGraw-Hill

Introduzione al secondo principio

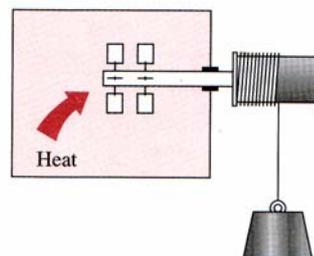
Il primo principio della termodinamica, che abbiamo esaminato in precedenza, è un'espressione del principio di conservazione dell'energia. In effetti nessun processo conosciuto viola questo principio fondamentale. Tuttavia il rispetto del primo principio non assicura di per sé che un processo possa realmente realizzarsi. Consideriamo ad esempio una tazzina di caffè bollente posta all'interno di una camera isolata a temperatura ambiente: dopo un certo tempo noteremo che la tazzina di caffè si è raffreddata, mentre la temperatura della camera è leggermente aumentata. Il calore perso dalla tazzina si è trasferito all'ambiente in accordo con il primo principio della termodinamica. Tuttavia, dal punto di vista prettamente teorico, potremmo immaginare che la tazzina si riscaldi ulteriormente e l'ambiente si raffreddi pur in accordo con il primo principio. Anche questo secondo processo in realtà non si è mai verificato.



A cup of hot coffee does not get hotter in a cooler room.



Transferring heat to a wire will not generate electricity.



Transferring heat to a paddle wheel will not cause it to rotate.

Consideriamo ora un filo percorso da una corrente elettrica: sappiamo che esso subirà un riscaldamento in accordo con il primo principio. Adesso immaginiamo di invertire il processo: riscaldiamo il filo nella speranza di generare corrente elettrica. Purtroppo questo processo, pur in accordo con il primo principio, non si è mai realizzato.

Ciò significa che alcuni processi teorici, pur rispettosi del primo principio, in realtà non possono verificarsi. In altri termini tutti i processi devono rispettare il primo principio, ma non tutti i processi che rispettano tale principio possono realizzarsi.

Il primo principio è pertanto inadeguato a stabilire la realizzabilità o meno di un processo.

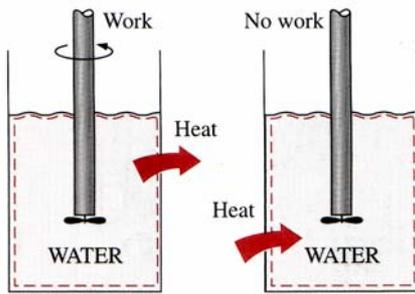
Per stabilire la realizzabilità o meno di un processo abbiamo bisogno pertanto di altri elementi di giudizio che, come vedremo, ci saranno forniti dal *secondo principio della termodinamica*.

In effetti noteremo che gli esempi sopra illustrati violano il secondo principio e che in generale un processo può essere realizzato se e solo se soddisfa il primo e il secondo principio della termodinamica.

Il secondo principio tuttavia non è solo importante perché permette di definire la direzione secondo cui si verifica un processo, ma anche perché, come vedremo, introduce il concetto di qualità di energia.

Mentre il primo principio considera l'energia solo dal punto di vista quantitativo, il secondo principio fornisce i mezzi adeguati a determinare la degradazione della qualità dell'energia durante i processi.

Macchine termiche



Work can always be converted to heat directly and completely, but the reverse is not true.

Come abbiamo già visto in precedenza, il lavoro può essere convertito in altre forme di energia, ma non è altrettanto semplice convertire altre forme di energia in lavoro.

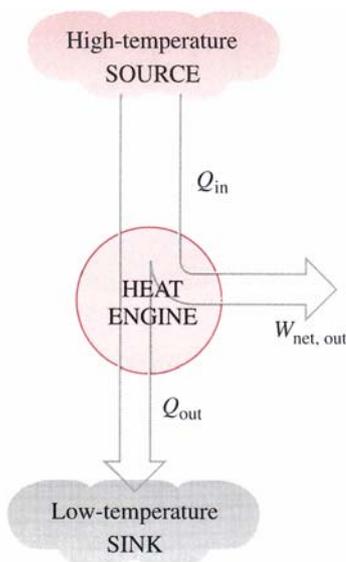
Il lavoro meccanico compiuto dall'albero a fianco raffigurato viene convertito in aumento dell'energia interna dell'acqua che può trasferirsi come calore. Sappiamo che ogni tentativo di invertire il processo è irrealizzabile: scaldando esternamente l'acqua non si riesce ad ottenere direttamente lavoro.

Per convertire il calore in lavoro abbiamo bisogno di particolari dispositivi che chiameremo *macchine termiche*. Le macchine termiche differiscono notevolmente tra loro, ma hanno alcuni caratteri fondamentali comuni.

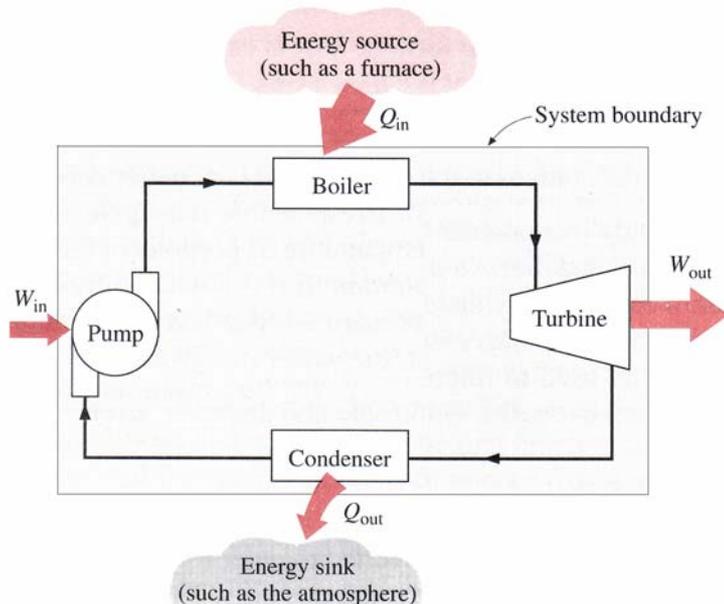
1. ricevono calore da una sorgente ad elevata temperatura (energia solare, combustione, reazione nucleare..)
2. convertono *parte* di questo calore in lavoro;
3. riversano il calore inutilizzato in un serbatoio a bassa temperatura (atmosfera, fiumi...);
4. operano ciclicamente.

Il termine di macchina termica è comunemente usato ad indicare anche dispositivi che producono lavoro senza operare secondo un ciclo termodinamico. E' il caso ad esempio delle turbine a gas e dei motori automobilistici che operano secondo un ciclo meccanico, ma non propriamente termodinamico. Il fluido di lavoro (i gas combusti) non viene sottoposto ad un ciclo completo, non viene infatti raffreddato alla temperatura iniziale bensì viene sostituito da carica fresca al termine del ciclo.

Il dispositivo che meglio si adatta alla definizione di macchina termica è l'impianto a vapore (motore a combustione esterna).



Part of the heat received by a heat engine is converted to work, while the rest is rejected to a sink.

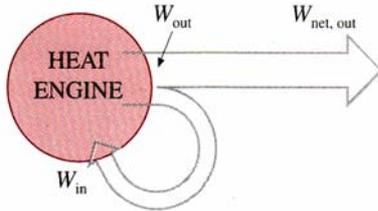


Schematic of a steam power plant.

Q_{in} quantità di calore fornita al vapore in caldaia
 Q_{out} quantità di calore scaricata dal vapore al condensatore (serbatoio a bassa temperatura)
 W_{out} lavoro fornito dalla turbina
 W_{in} lavoro assorbito dalla pompa

Il lavoro netto vale:

$$W_{net,out} = W_{out} - W_{in}$$



A portion of the work output of a heat engine is consumed internally to maintain continuous operation.

Il lavoro netto può essere determinato come differenza tra calore entrante e calore uscente dal sistema. Il sistema nel suo complesso può essere analizzato come un sistema chiuso in cui la variazione di energia interna è ovviamente nulla. Pertanto, in base al primo principio si ha:

$$W_{net,out} = Q_{in} - Q_{out}$$

Efficienza termica

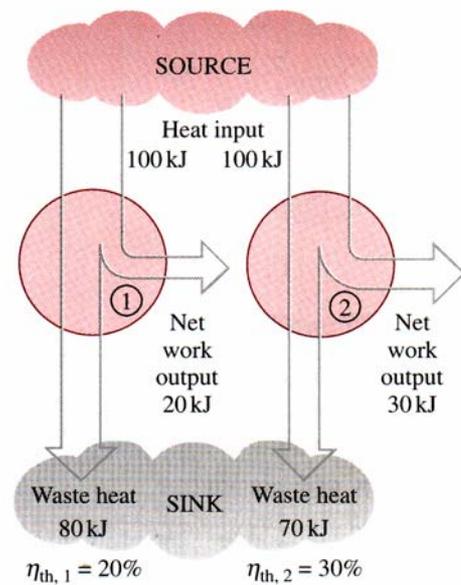
Q_{out} rappresenta la quota di energia termica inutilizzata e trasferita al serbatoio di accumulo a bassa temperatura. Come vedremo, Q_{out} non può mai essere pari a zero, conseguentemente il lavoro netto non potrà mai essere pari al calore prelevato dalla sorgente ad alta temperatura. La frazione del calore in ingresso trasformato in lavoro è una misura dell'efficienza termica della macchina termica.

L'efficienza termica è così definita:

$$\eta_{th} \equiv \frac{W_{net,out}}{Q_{in}}$$

e può anche essere espressa come:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}}$$



Some heat engines perform better than others (convert more of the heat they receive to work).

Esempio 1-1

Una macchina termica riceve una potenza termica di 80 MW e ne riversa 50 MW nel serbatoio a bassa temperatura. Determinare la potenza netta ottenuta e l'efficienza termica della macchina.

$$W_{net,out} = Q_{in} - Q_{out} = 30 \text{ MW}$$

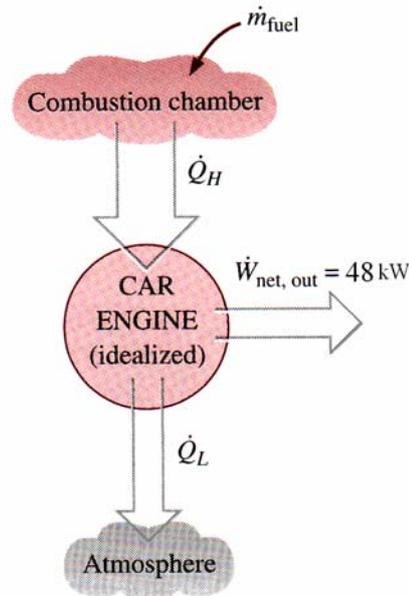
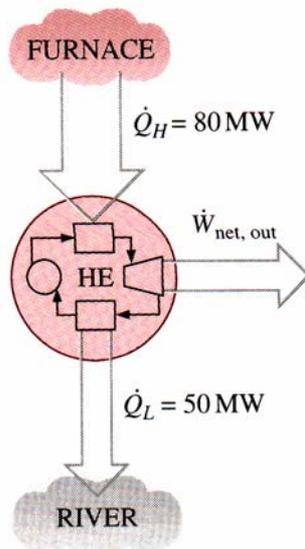
$$\eta_{th} \equiv \frac{W_{net,out}}{Q_{in}} \cong 0.375$$

Esempio 1-2

Un motore automobilistico fornisce una potenza di 48 kW con un'efficienza termica del 24%.
 Determinare il consumo orario di combustibile nell'ipotesi che il suo potere calorifico sia pari a 40000 kJ/kg.

$$\dot{Q}_{in} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\eta_{th}} \cong 200 \text{ kW}$$

$$\dot{m} = 3600 \frac{\dot{Q}_{in}}{40000} \cong 18 \text{ kg/h}$$



Schematic for Example 1-1. Schematic for Example 1-2.

Il secondo principio della termodinamica

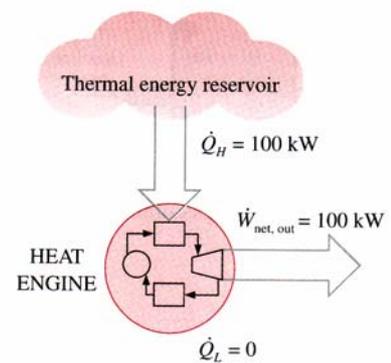
Formulazione secondo Kelvin-Planck

È impossibile costruire una macchina operante secondo un processo ciclico il cui unico effetto sia quello di convertire in lavoro tutto il calore estratto da una sorgente a temperatura uniforme e costante nel tempo.¹

Infatti ogni macchina termica deve necessariamente scambiare calore sia con una sorgente calda, sia con una fredda.

Dal precedente enunciato si deduce immediatamente che nessuna macchina termica può avere un'efficienza del 100% e questo indipendentemente dalla presenza di attriti o altri fenomeni dissipativi.

In seguito si dimostrerà che l'efficienza massima di una macchina termica dipende dalle temperature delle sorgenti che scambiano calore con la macchina stessa.



A heat engine that violates the Kelvin-Planck statement of the second law.

¹ Esiste una seconda formulazione dell'enunciato di Kelvin che fa riferimento a processi non ciclici, esso afferma: è impossibile realizzare una trasformazione termodinamica, il cui *unico* risultato, sia la conversione integrale di calore in lavoro

Frigoriferi, pompe di calore e condizionatori d'aria

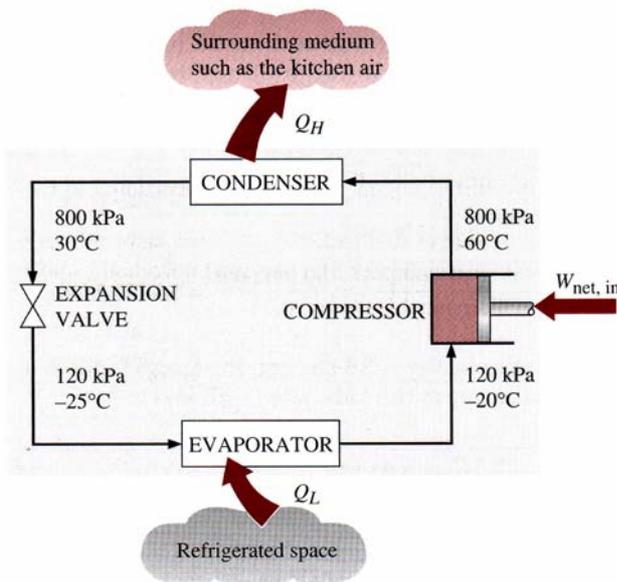
Frigoriferi

Sappiamo per esperienza che il calore fluisce da una sorgente ad alta temperatura verso una sorgente a temperatura minore. Questo trasferimento è naturale e non richiede alcun dispositivo. Il processo inverso non può invece avvenire spontaneamente: per trasferire calore da una sorgente a bassa temperatura ad una sorgente a temperatura più elevata dobbiamo utilizzare una macchina termica particolare detta *frigorifero*.

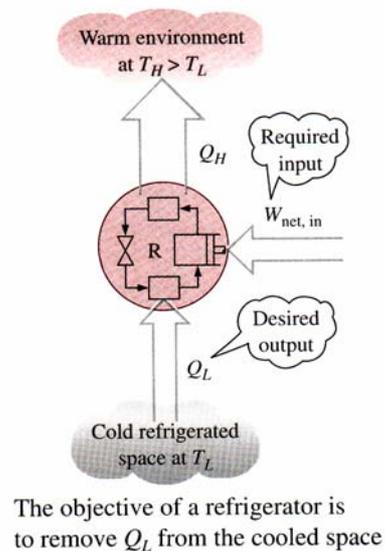
Il fluido di lavoro utilizzato da tali macchine viene chiamato refrigerante.

I frigoriferi sono costituiti da quattro componenti principali:

1. compressore;
2. condensatore;
3. valvola di espansione;
4. evaporatore.



Basic components of a refrigeration system and typical operating conditions.



The objective of a refrigerator is to remove Q_L from the cooled space

Il refrigerante entra nel compressore allo stato di vapore (120 kPa; -20°C) e viene compresso tramite un compressore (800 kPa; 60°C). Dal compressore il vapore surriscaldato percorre la serpentina del condensatore e, tramite un processo isobarico, cede calore all'esterno. All'uscita del condensatore il refrigerante, allo stato liquido, (800 kPa; 30°C) attraversa una valvola di espansione e subisce un processo di laminazione²: si ha una caduta di pressione isoentalpica che porta il refrigerante in condizioni di miscela liquido-vapore (120kPa; -25°C). Tale miscela completa la sua vaporizzazione assorbendo calore dall'esterno e si porta alle condizioni iniziali (120 kPa; -20°C).

In un comune frigorifero domestico l'evaporatore è posizionato nello scomparto freezer, mentre la serpentina posizionata posteriormente al frigorifero funge da condensatore.

Coefficiente di prestazione (coefficient of performance)

² Le valvole a strozzamento (throttling valves – valvola di laminazione) sono dei dispositivi che causano una significativa caduta di pressione nel fluido che le attraversa. Quando un fluido attraversa una valvola di strozzamento è sottoposto ad un processo che in prima approssimazione può ritenersi adiabatico ($q = 0$); infatti non c'è tempo sufficiente né un'area di scambio adeguate a consentire un apprezzabile scambio termico. Inoltre possono essere trascurabili sia le variazioni di energia potenziale, sia le variazioni di energia cinetica. Con queste assunzioni è immediato riconoscere, dal primo principio delle termodinamica applicato ad un sistema aperto, che le entalpie del fluido a monte e valle della valvola devono essere approssimativamente uguali.

L'efficienza di una macchina frigorifera viene espressa come coefficiente di prestazione COP_R
 Il COP_R è il rapporto tra il calore Q_L sottratto dallo spazio refrigerato e il lavoro netto entrante $W_{net,in}$

$$COP_R \equiv \frac{Q_L}{W_{net,in}} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{Q_H/Q_L - 1} \quad (1.1)$$

Il valore di COP_R può assumere valori superiori all'unità: in tali situazioni il calore rimosso dallo spazio refrigerato è superiore al lavoro netto in ingresso, ma non significa che la macchina abbia un rendimento superiore a 1.

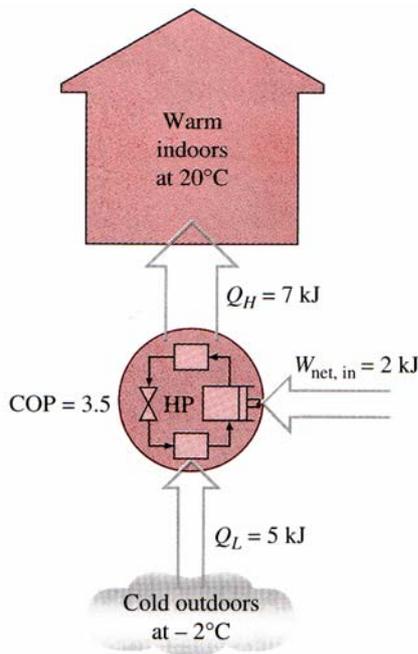
Pompe di calore

Le pompe di calore (HP) sono dispositivi che trasferiscono, come i frigoriferi, calore da una sorgente a bassa temperatura verso a una sorgente a temperatura più alta.

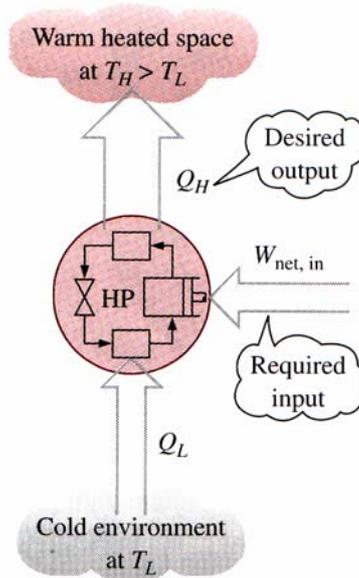
Le HP utilizzano lo stesso ciclo di lavoro dei frigoriferi, ma con obiettivi diversi.

Lo scopo dei frigoriferi è quello di mantenere uno spazio refrigerato (freezer) a bassa temperatura rimuovendo da esso calore. Il trasferimento di calore verso un ambiente a temperatura più alta (ambiente domestico) è una condizione indispensabile per il completamento del ciclo, ma non rientra negli scopi della macchina.

Le HP per contro hanno lo scopo di mantenere uno spazio ad alta temperatura trasferendo ad esso calore. Ciò si accompagna inevitabilmente ad un assorbimento di calore da un ambiente a bassa temperatura (acqua, aria fredda invernale).



The work supplied to a heat pump is used to extract energy from the cold outdoors and carry it into the warm indoors.



The objective of a heat pump is to supply heat Q_H into the warmer space.

E' evidente pertanto che un normale frigorifero nella stagione invernale, posizionato in corrispondenza di una finestra, e con lo sportello aperto rivolto verso l'esterno funzionerà come una HP in quanto cercherà di diminuire la temperatura dell'aria esterna assorbendone calore per trasferirlo nell'ambiente domestico.

Anche la prestazione di una HP è espressa come coefficiente di prestazione COP_{HP}

Il COP_{HP} è definito come il rapporto tra il calore introdotto nell'ambiente e il lavoro netto richiesto

$$COP_{HP} \equiv \frac{Q_H}{W_{net,in}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{1 - Q_L/Q_H} \quad (1.2)$$

Confrontando la (1.2) con la (1.1) si ricava

$$COP_{HP} = COP_R + 1 \quad (1.3)$$

Dalla (1.3) è immediato riconoscere che il COP_{HP} è sempre maggiore dell'unità dato che COP_R è una quantità sempre positiva.

Ciò significa che, almeno in linea teorica, al peggio una HP ha le prestazioni di una resistenza elettrica che, come sappiamo, trasferisce all'ambiente una energia termica pari all'energia elettrica consumata.

In realtà, tuttavia, parte del Q_H si disperde nell'ambiente esterno attraverso le tubazioni e altri dispositivi, e il COP_{HP} può scendere al di sotto del valore unitario quando la temperatura dell'aria esterna è particolarmente bassa.

Condizionatori d'aria

I condizionatori d'aria sono delle macchine frigorifere il cui spazio refrigerato è un ambiente domestico o industriale. Un condizionatore d'aria posizionato in corrispondenza di una finestra raffredda l'ambiente assorbendone calore e trasferendolo all'esterno. La stessa unità di condizionamento, in inverno, potrebbe teoricamente funzionare come HP se montato inversamente in modo cioè da prelevare calore dall'ambiente esterno freddo per riversarlo nell'ambiente da riscaldare.

Molti condizionatori d'aria sono equipaggiati con dispositivi di inversione in modo da operare come condizionatori veri e propri in estate e come HP in inverno

Ricordiamo che le prestazioni dei frigoriferi e dei condizionatori, negli Stati Uniti, sono espresse come Energy Efficiency Rating (EER), che è l'ammontare di calore prelevato dall'ambiente freddo, espresso in Btu, per ogni wattora di energia consumata.

Poiché $1 \text{ kWh} = 3142 \text{ Btu}$ e $1 \text{ Wh} = 3.142 \text{ Btu}$, una unità che rimuova 1 kWh di calore dall'ambiente freddo per ciascun kWh di energia consumata avrà un $COP = 1$ e un $EER = 3.142$

Tra EER e COP esiste pertanto la seguente relazione

$$EER = 3.142 \text{ COP}$$

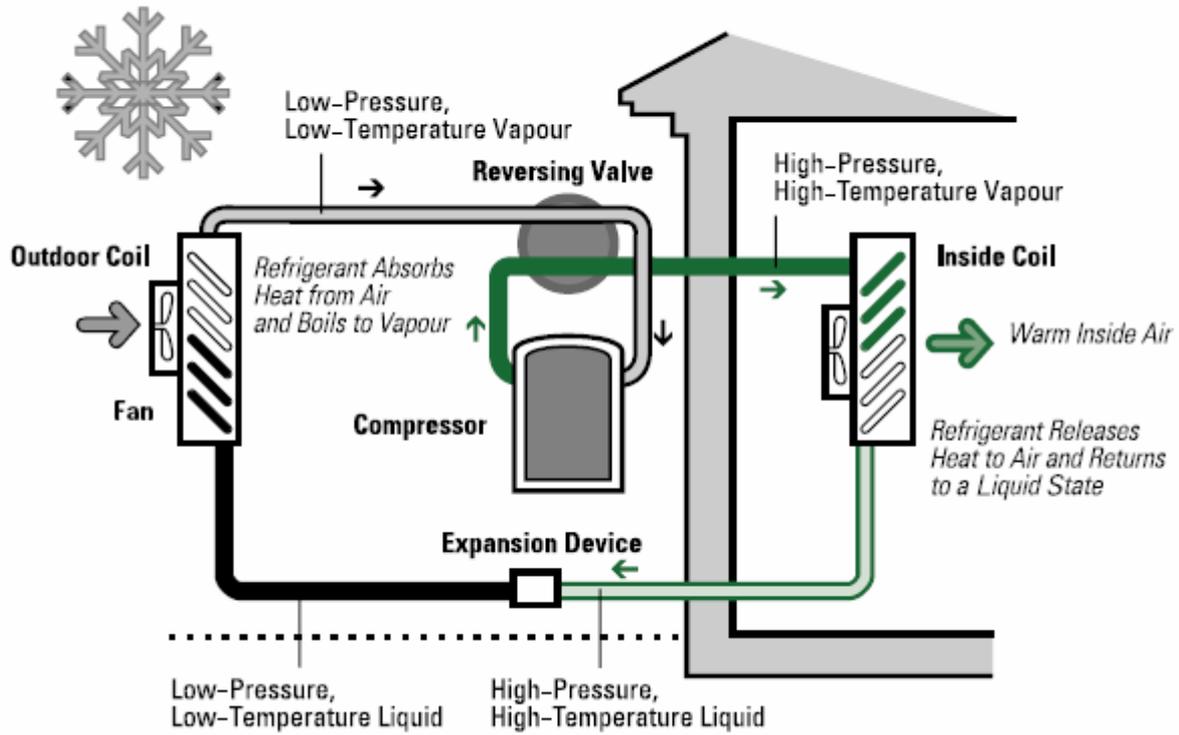
Sia l'EER, sia il COP diminuiscono al diminuire della temperatura di raffreddamento. Non è pertanto economico raffreddare a temperature inferiori alle reali necessità.

Ricordiamo che il COP di un frigorifero domestico è intorno a 2-3, mentre il COP di un congelatore è intorno a 1.2-1.5. Ecco perché molti frigoriferi domestici combinati adottano due sistemi di refrigerazione distinti: uno per mantenere a bassa temperatura i cibi, l'altro per conservare i surgelati.

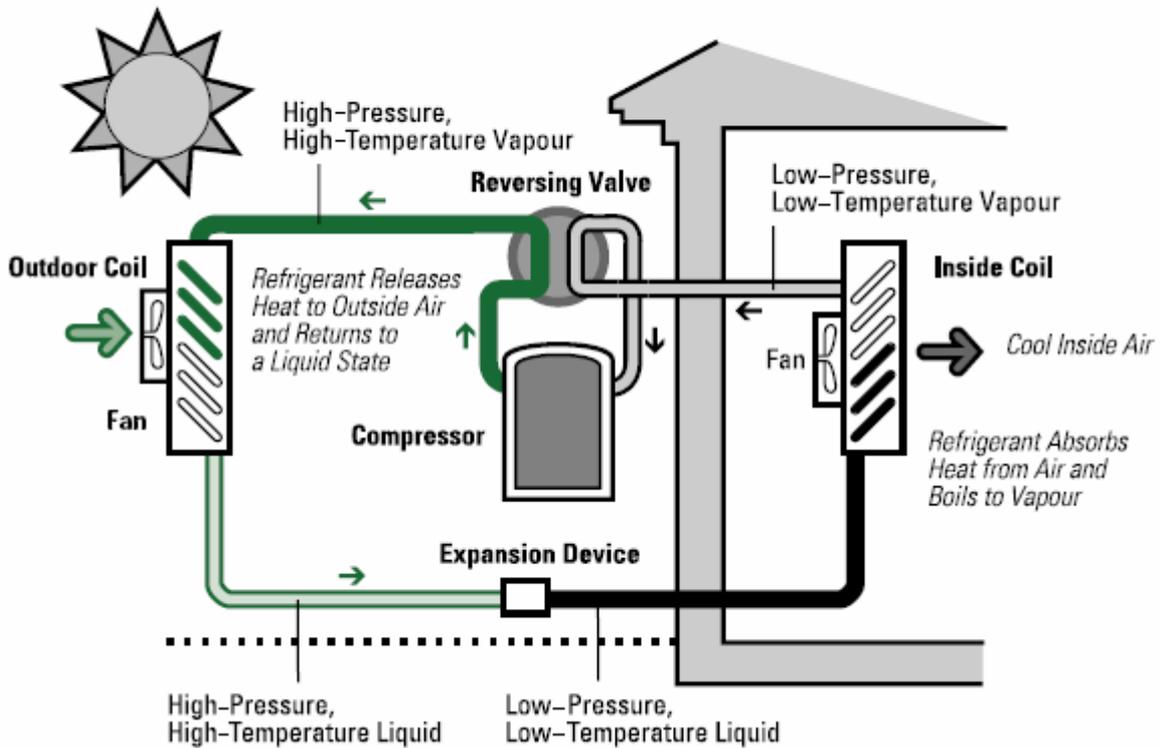


When installed backwards, an air conditioner will function as a heat pump.

Components of an Air-source Heat Pump (Heating Cycle)



Components of an Air-source Heat Pump (Cooling Cycle)



Esempio 1-3

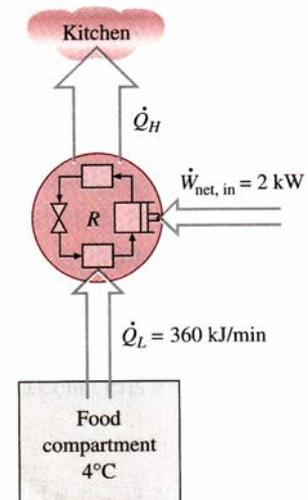
Il compartimento per gli alimenti di un frigorifero domestico viene mantenuto a 4°C rimuovendo da esso calore nella misura di 360 kJ/min. sapendo che la potenza assorbita dal frigorifero è 2 kW, determinare:

1. il COP del frigorifero
2. la quantità di calore riversata dal frigorifero all'ambiente domestico per ogni minuto

Si assume che il sistema in equilibrio

$$COP_R = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{net,in}} = \frac{360}{2 \cdot 60} = 3$$

$$\dot{Q}_H = \dot{Q}_L + \dot{W}_{net,in} = 360 + 2 \cdot 60 = 480 \text{ kJ/min}$$



Esempio 1-4

Una pompa di calore viene utilizzata per mantenere la temperatura dell'ambiente a 20°C. In una giornata con temperatura esterna pari a -2 °C si stima che le perdite di calore dall'ambiente verso l'esterno ammontino a 80000 kJ/h. Nell'ipotesi che la HP operante in queste condizioni abbia un COP pari a 2.5 determinare:

1. la potenza assorbita dalla HP;
2. il flusso di calore assorbito dall'ambiente freddo.

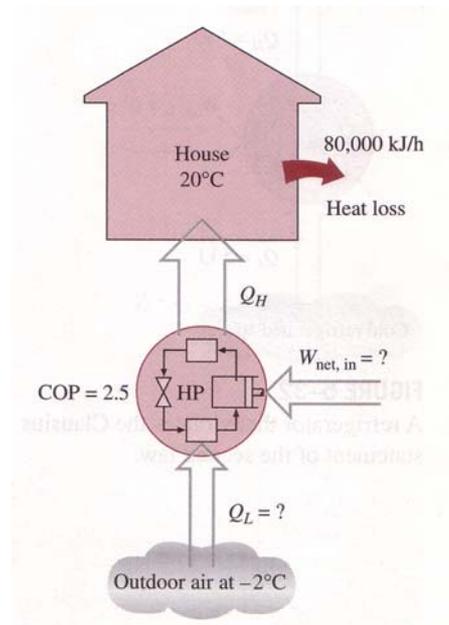
Si assume che il sistema sia in equilibrio

La potenza assorbita si ricava dalla (1.2)

$$\dot{W}_{net,in} = \frac{\dot{Q}_H}{COP_{HP}} = \frac{80000}{2.5} = 32000 \text{ kJ/h} = 8.9 \text{ kW}$$

L'ambiente riscaldato disperde verso l'esterno 80000 kJ/h. Per mantenere le condizioni di equilibrio la HP deve fornire all'ambiente lo stesso ammontare di calore. Allora la quantità di calore assorbita dall'esterno e trasferita all'interno vale:

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W}_{net,in} = 80000 - 32000 = 48000 \text{ kJ/h}$$



E' importante sottolineare che degli 80000 kJ/h trasferiti all'ambiente da riscaldare ben 48000 vengono estratti *gratuitamente* dall'esterno. Pertanto si dovrà *pagare* solo per i restanti 32000 kJ/h assorbiti dalla HP. Se invece per riscaldare l'ambiente avessimo usato una stufetta elettrica avremmo dovuto fornire tutti gli 80000 kJ/h mediante consumo di energia elettrica. In quest'ultimo caso, rispetto all'utilizzo di una HP, l'importo della bolletta elettrica risulterebbe pari a circa 2.5 volte.

Da queste semplici considerazioni risulta evidente come le HP, anche se con costi iniziali più elevati, risultano decisamente più convenienti dei riscaldatori elettrici convenzionali.

Il secondo principio della termodinamica

Formulazione secondo Clausius

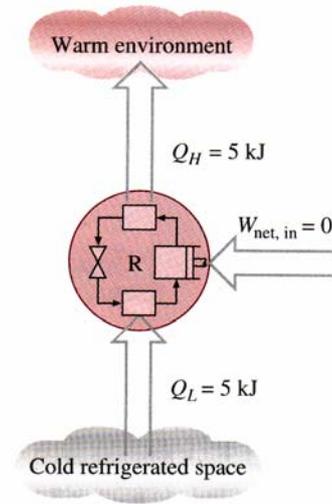
E' impossibile realizzare una macchina termica operante ciclicamente il cui unico risultato preveda il trasferimento di calore da una sorgente a bassa temperatura verso una sorgente a temperatura più elevata.

L'enunciato di Clausius non afferma che è impossibile realizzare una macchina frigorifera, bensì afferma che una macchina frigorifera non può operare a meno che non assorba una qualche forma di energia dall'esterno (energia elettrica assorbita dal motore collegato al compressore).

Sia l'enunciato di Kelvin-Planck, sia l'enunciato di Clausius sono enunciati negativi e come tali non possono essere dimostrati.

Come qualsiasi altra legge fisica il secondo principio della termodinamica è basata su osservazioni sperimentali .

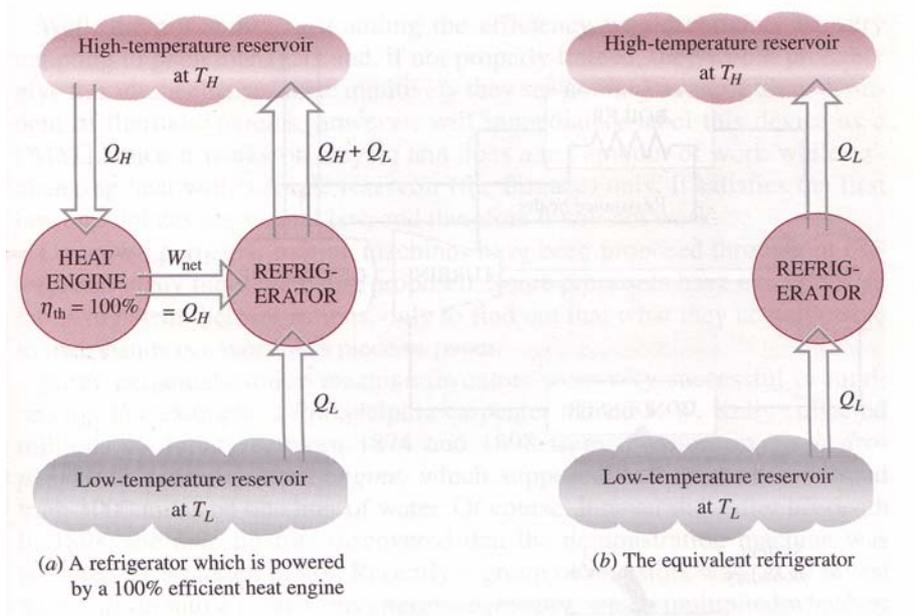
Allo stato attuale non è mai stato realizzato un esperimento in grado di contraddire la seconda legge della termodinamica e ciò fornisce sufficiente evidenza per la sua validità.



A refrigerator that violates the Clausius statement of the second law.

Equivalenza delle due formulazioni del secondo principio (Kelvin-Planck & Clausius)

Le due formulazioni del secondo principio (Kelvin-Planck & Clausius) che abbiamo analizzato in precedenza sono del tutto equivalenti. Ogni violazione dell'enunciato di Kelvin-Planck implica una violazione dell'enunciato di Clausius e viceversa.



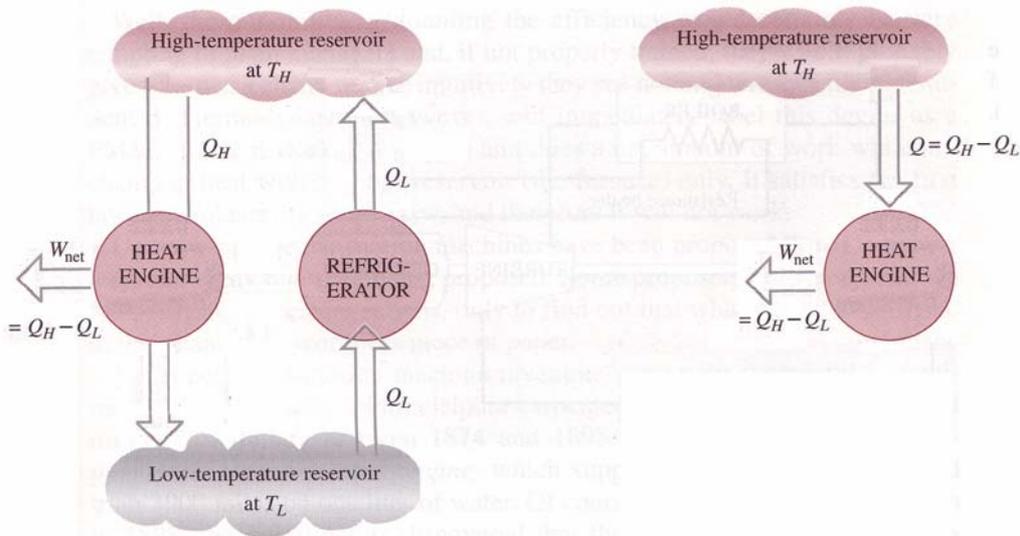
Consideriamo ad esempio un complesso costituito da una macchina termica classica e da un frigorifero operante tra le medesime sorgenti termiche. Supponiamo che la macchina termica abbia un'efficienza del 100%, con violazione del secondo principio secondo la formulazione di Kelvin-Planck, e che pertanto sia in grado di trasformare tutto il calore Q_H in lavoro W . Il lavoro W , così ottenuto, venga poi

utilizzato dal refrigeratore per rimuovere una quantità di calore Q_L dalla sorgente a bassa temperatura e trasferire una quantità di calore $Q_L + Q_H$ alla sorgente ad alta temperatura.

L'effetto dei due dispositivi combinati è il trasferimento, senza spesa di lavoro, di una quantità di calore Q_L dalla sorgente a bassa temperatura verso la sorgente ad alta temperatura in violazione dell'enunciato di Clausius.

Pertanto la negazione dell'enunciato di Kelvin-Planck implica la negazione dell'enunciato di Clausius.

Adesso dimostreremo come la negazione dell'enunciato di Clausius implichi la negazione dell'enunciato di Kelvin-Planck.



Accoppiamo un refrigeratore che violi l'enunciato di Clausius, trasferendo senza spesa di lavoro una quantità di calore Q_L dalla sorgente a bassa temperatura verso la sorgente ad alta temperatura, con una macchina termica operante tra le medesime sorgenti termiche. La macchina termica assorbirà una quantità di calore Q_H dalla sorgente ad alta temperatura e scaricherà una quantità di calore Q_L verso la sorgente a bassa temperatura producendo un lavoro netto pari a $Q_H - Q_L$.

L'effetto dei due dispositivi combinati è la trasformazione completa della quantità di calore $Q_H - Q_L$ in lavoro con conseguente violazione dell'enunciato di Kelvin-Planck.

Dato che la violazione dell'enunciato di Kelvin-Planck implica la violazione dell'enunciato di Clausius e che la violazione dell'enunciato di Clausius implica la violazione dell'enunciato di Kelvin-Planck i due enunciati risultano del tutto equivalenti.

Macchine a moto perpetuo

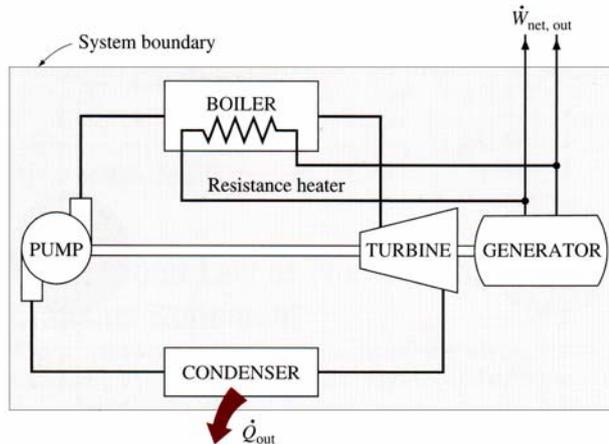
Abbiamo già sottolineato che qualsiasi macchina termica è in grado di funzionare se e solo se soddisfa sia il primo, sia il secondo principio della termodinamica.

Ogni dispositivo che violi uno dei due principi dà luogo a una macchina a moto perpetuo: a dispetto di molti tentativi messi in atto, allo stato attuale, tali macchine non sono mai state in grado di lavorare.

Un dispositivo che violi il primo principio *creando* energia viene definito *macchina a moto perpetuo di primo genere* (PMM1); e un dispositivo che violi il secondo principio della termodinamica viene definito *macchina a moto perpetuo di secondo genere* (PMM2)

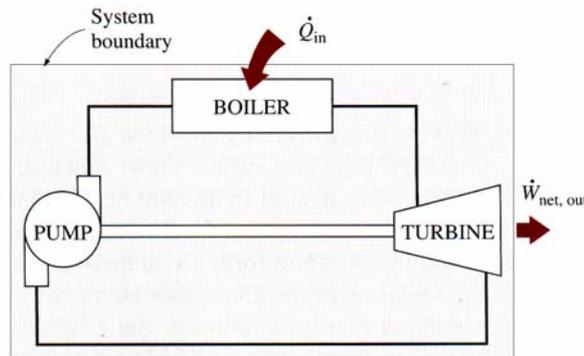
Il professor John Idiot ha proposto la macchina a moto perpetuo di seguito riportata. In questo impianto il riscaldamento dell'acqua in caldaia avviene a spese dell'energia elettrica inizialmente prelevata dell'esterno e poi successivamente prodotta dall'impianto stesso. Il prof. Idiot sostiene che l'impianto, una volta entrato a regime, si automantiene producendo energia termica ed elettrica senza alcuna spesa, risolvendo ogni problema di approvvigionamento energetico. Purtroppo la macchina proposta dal prof. Idiot viola il primo principio della termodinamica e pertanto sarà, per quanto detto in precedenza, irrealizzabile.

A perpetual-motion machine that violates the first law of thermodynamics (PMM1).



Il professor Joseph Mad, convinto in accordo con il primo principio della termodinamica che l'energia non può essere creata, ha recentemente suggerito una modifica dell'impianto proposto dal Prof. Idiot in modo da aumentare considerevolmente l'efficienza dell'impianto. Poiché circa la metà del calore fornito al vapore in caldaia viene scaricato tramite il condensatore nell'ambiente esterno il Prof. Mad di realizzare un impianto privo appunto di condensatore e che alimenti direttamente la pompa con il fluido uscente dalla turbina: in tal modo evitando scaricare calore all'esterno l'impianto avrà un'efficienza termica teorica del 100%, che per la presenza di attriti tra gli organi in movimento potrebbe infine attestarsi intorno ad un valore reale dell'80% ben al sopra del 40% che è una stima attendibile dell'efficienza dei migliori impianti a vapore attualmente in funzione.

A perpetual-motion machine that violates the second law of thermodynamics (PMM2).



Purtroppo la modifica proposta dal prof Mad porta l'impianto a violare il secondo principio della termodinamica secondo la formulazione di Kelvin-Planck. Infatti la macchina termica così modificata, in accordo con il primo principio, produce un lavoro $W_{net,out}$ pari a:

$$W_{net,in} = Q_{out}$$

La macchina termica quindi estrae calore da una singola sorgente e lo converte interamente il lavoro violando il secondo principio della termodinamica.

Anche il suggerimento del Prof. Mad dovrà essere pertanto cestinato!

Processi reversibili ed irreversibili

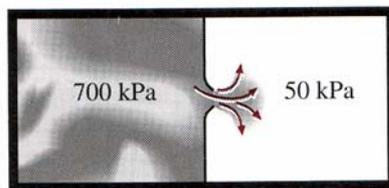
Il secondo principio della termodinamica è strettamente legato al concetto di *irreversibilità*. Processi che comportino la trasformazione di lavoro in calore o lo scambio termico da una temperatura superiore ad una inferiore senza produzione di lavoro risultano particolarmente critici da questo punto di vista, perché il processo inverso è sottoposto ai vincoli elencati dal secondo principio. Non tutto il calore ottenuto è infatti riconvertibile in lavoro, nel primo caso, mentre nel secondo non è possibile invertire lo scambio termico senza la spesa di lavoro esterno.

Per caratterizzare maggiormente la reversibilità o l'irreversibilità è opportuno generalizzare la definizione: un processo è reversibile quando è possibile ripristinare le condizioni originarie sia del sistema sia del resto dell'universo. La possibilità va intesa nei termini della compatibilità con i vincoli posti dai principi della termodinamica, in particolare del secondo. L'inverso di un processo non è una trasformazione qualsiasi che riporta il solo sistema dallo stato finale allo stato iniziale, ma quella particolare tra queste che ripristina anche lo stato originario del resto dell'universo. Pertanto: *Il processo inverso, quando esiste, è il solo a prevedere per il sistema il ritorno allo stato di partenza con lo scambio, uguali in modulo ma opposte in segno, delle stesse quantità di calore e di lavoro scambiate nel corrispondente processo diretto.*

In sostanza un processo è reversibile se, percorrendolo a ritroso, non ne resta traccia alcuna: si potrebbe dire che un processo reversibile è un processo "senza memoria".

Un processo che non è reversibile viene definito *irreversibile*. Chiameremo irreversibilità tutti quei fattori che fanno sì che un processo sia irreversibile.

Si consideri per esempio l'espansione adiabatica libera di un gas perfetto (esperimento di Joule): il processo avviene senza che venga compiuto lavoro, senza assorbimento di calore e senza variazioni di energia interna (in quanto la temperatura resta costante).

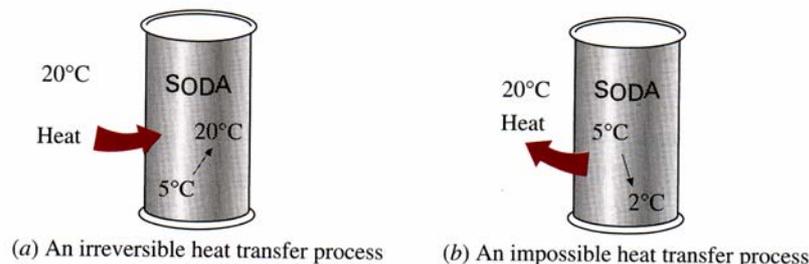


Irreversible expansion process

Unrestrained expansion

Vediamo ora se è possibile invertire questo processo. Per riportare il gas nello stato iniziale occorre comprimerlo, ma questo comporta un aumento di temperatura che può essere annullato solo cedendo una certa quantità di calore all'ambiente che contiene il gas; se ora fosse possibile riconvertire questo calore integralmente in lavoro in modo da recuperare il lavoro speso per comprimere il gas, il complesso *gas + ambiente* tornerebbe nello stato iniziale. Dovremmo far uso di una macchina in grado di violare l'enunciato di Kelvin-Planck: tale macchina non è mai stata realizzata pertanto il sistema *gas + ambiente* è dunque modificato in maniera definitiva: il processo non è reversibile.

Esaminiamo ora un altro fenomeno irreversibile molto familiare: il trasferimento di calore tra due ambienti con differente temperatura. Poniamo una lattina di bibita fresca, a 5°C, all'interno di una cucina isolata. Dopo un certo tempo sia la cucina sia la lattina di bibita raggiungeranno la medesima temperatura di 20°C.



(a) An irreversible heat transfer process

(b) An impossible heat transfer process

(a) Heat transfer through a temperature difference is irreversible, and (b) the reverse process is impossible.

L'unico modo per far ritornare la lattina alle condizioni iniziali sarebbe quello di raffreddarla in un frigorifero. Al termine del raffreddamento, la lattina sarà ritornata alle condizioni iniziali, ma non l'ambiente circostante. L'energia interna dell'ambiente circostante sarà aumentata di una quantità pari al lavoro assorbito dal frigorifero. Il ripristino delle condizioni iniziali dell'ambiente circostante può essere realizzato solo con l'uso di un dispositivo che converta l'eccesso di energia interna completamente in lavoro. Questo processo violerebbe il secondo principio della termodinamica ed è pertanto irrealizzabile.

Ricordiamo che una trasformazione per poter essere reversibile deve avvenire in assenza di qualunque forza dissipativa che produca calore e deve avvenire “*quasi-staticamente*”, nel senso che tutto il sistema deve essere in ogni istante in condizioni di equilibrio (in questo caso, e solo in questo, il processo è rappresentabile con una linea nel piano PV); questo richiede un tempo lunghissimo (in teoria infinito) perché i processi reversibili avvengano e inoltre richiede che le sorgenti di calore con cui il sistema viene posto eventualmente a contatto abbiano la stessa temperatura, o una vicinissima, a quella del sistema, cioè che gli scambi di calore avvengano isotermicamente. E' chiaro che, in pratica, nessun processo sarà rigorosamente reversibile: si tratta solo di un concetto limite, che però, come vedremo, risulta fondamentale per lo studio delle macchine termiche.

Si osserva ulteriormente che lungo i processi irreversibili si riduce la disponibilità di lavoro o la possibilità di ottenerne dal sistema. In tutti i processi irreversibili infatti sono sempre implicate la trasformazione in calore del lavoro (come nel lavoro di agitazione di un fluido o nel deflusso con attrito) o il mancato sfruttamento della possibilità di produrne (come nell'espansione libera o nello scambio termico che avviene tra differenze finite di temperatura).

Quali le cause dell'irreversibilità? Gli enunciati del secondo principio e gli esempi visti portano a dire che un processo risulta irreversibile quando:

1. è provocato da *squilibri non infinitesimi* di tipo termico, meccanico o chimico (differenze finite di temperatura, di pressione o di concentrazione/potenziale chimico). Questi squilibri possono essere:
 - a. interni al sistema, cioè legati a disomogeneità nelle condizioni interne (si parla in tal caso di *irreversibilità interna*)
 - b. esterni allo stesso (in caso di *irreversibilità esterna*)
2. si svolge in presenza di *fenomeni dissipativi* quali l'attrito, che comportano la conversione di lavoro in calore
 - a. si tratta di *irreversibilità interna* in quanto interessa il sistema in corrispondenza dei propri confini e all'interno degli stessi

Tutti i processi reali includono di fatto cause di irreversibilità, di una o di entrambe le categorie. Da un lato infatti l'attrito è difficilmente eliminabile, mentre dall'altro sono proprio le disomogeneità o gli squilibri a rendere spontanea una trasformazione e a consentirne il completamento in un tempo finito. I processi reversibili, invece, proprio perché richiedono condizioni di equilibrio infinitesimo di temperature, pressioni, concentrazioni/potenziale chimico e l'assenza di fenomeni di tipo dissipativo, sono spesso indicati come *quasi-statici* e senza attrito. In dipendenza della posizione delle cause di irreversibilità rispetto ai confini del sistema, cioè a seconda che la dissipazione di energia intesa come riduzione della capacità di fornire lavoro, avvenga all'interno o all'esterno del sistema stesso, si distinguono processi internamente o esternamente irreversibili a seconda che queste siano o meno interne ai confini del sistema.

Si possono in particolare distinguere condizioni di:

- a. *irreversibilità meccanica esterna*: si verificano quando il processo avviene sotto l'azione di forze esterne non equilibrate da quelle interne; si riscontrano ad esempio nei processi di agitazione di un fluido viscoso, di deformazione anelastica di un solido, di espansione rapida di un gas in un cilindro munito di pistone scorrevole, ecc.
- b. *irreversibilità meccanica interna*: lo squilibrio tra le forze (o le pressioni) è interno al sistema; si riscontrano ad esempio nei processi di espansione libera, di deflusso con attrito, ecc.
- c. *irreversibilità termica esterna*: si realizza quando esiste uno scambio termico tra il sistema e l'esterno in virtù di una differenza di temperatura finita.
- d. *irreversibilità termica interna*: lo scambio termico avviene all'interno del sistema tra porzioni che si trovano a temperature diverse.
- e. *irreversibilità chimica esterna*: il sistema è sottoposto a reazioni chimiche o a processi di diffusione con l'esterno sotto l'azione di differenze di potenziale chimico; si riscontrano ad esempio nei processi di soluzione di un solido in un liquido, di osmosi, di condensazione di un vapore surriscaldato, ecc.
- f. *irreversibilità chimica interna*: la reazione chimica descritta al punto precedente avviene tra porzioni distinte del sistema e non tra il sistema e l'esterno

Si possono in generale incontrare processi:

1. sia internamente che esternamente reversibili
2. internamente reversibili ma esternamente irreversibili
3. sia internamente che esternamente irreversibili

Il caso di irreversibilità interna ma non esterna, pur potendosi presentare, non riveste di fatto interesse pratico. Pertanto si assumerà che un processo che sia esternamente reversibile lo sia anche internamente.

La reversibilità interna anche se non accompagnata da quella esterna è una condizione sufficiente per poter definire puntualmente il valore delle grandezze di stato ed analizzare un processo. In realtà, la reversibilità o l'irreversibilità esterna del processo risulta in effetti assolutamente ininfluyente su quanto accade al sistema.

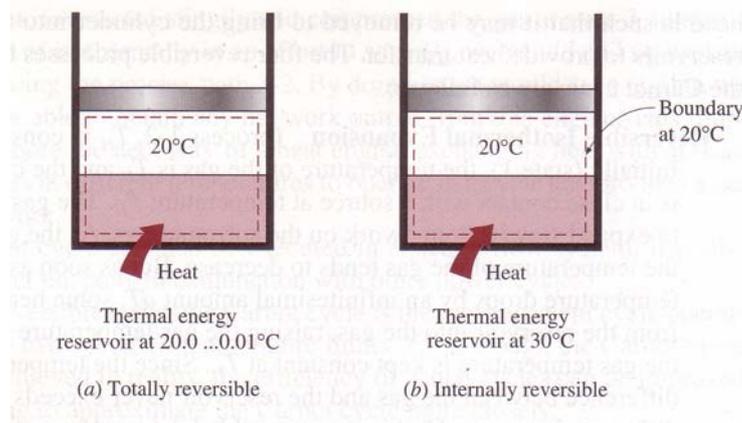
L'estensione dei concetti visti per i singoli processi ai cicli di processi è piuttosto semplice.

Un *ciclo* risulta reversibile se lo sono **tutti i singoli processi** che lo compongono. Viceversa, se uno dei processi del ciclo è irreversibile risulta irreversibile l'intero ciclo. Un ciclo reversibile ammette un ciclo inverso³. Il ciclo inverso è costituito dai processi inversi dei singoli processi che compongono il ciclo originario. Lungo il ciclo inverso gli scambi di calore e di lavoro sono uguali in modulo e opposti in segno alle rispettive quantità scambiate lungo il ciclo di origine.

Ai sensi del secondo principio, per produrre un effetto utile, un ciclo deve operare scambiando una quantità netta di calore con almeno due sorgenti esterne che siano caratterizzate da temperatura uniforme e costante nel tempo.

Esaminiamo ora due processi: uno totalmente reversibile e l'altro solo internamente reversibile.

Consideriamo il trasferimento di calore verso due sistemi all'interno dei quali una sostanza è sottoposta ad un cambiamento di fase a temperatura e a pressione costante. Entrambi i sistemi sono internamente reversibili perché, sottoposti ad un processo isotermico, attraversano esattamente i medesimi stati di equilibrio. Il processo (a) è anche esternamente reversibile dato che il trasferimento di calore avviene con differenze di temperature infinitesime dT . Il secondo processo (b) invece è esternamente irreversibile dato che il trasferimento di calore avviene attraverso una differenza di temperatura finita ΔT .



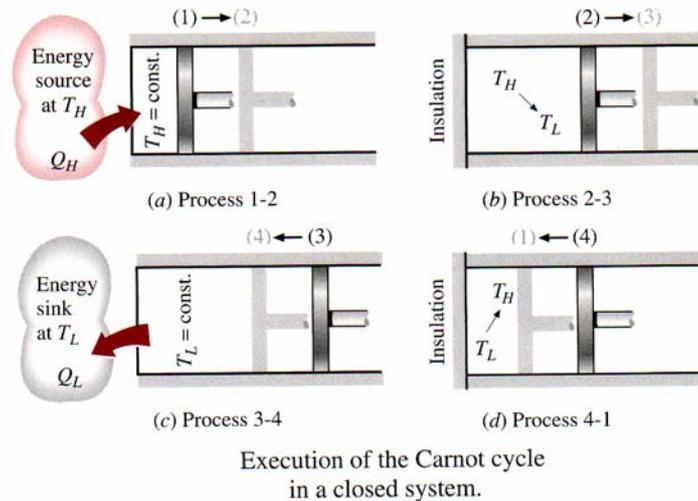
³ Non si deve confondere il concetto di ciclo inverso di un ciclo reversibile con quello di ciclo inverso contrapposto ad un ciclo diretto. In quest'ultima accezione un ciclo si dice diretto o inverso a seconda che lo scopo del ciclo sia la produzione netta di lavoro o il trasferimento di calore da una sorgente a temperatura inferiore ad una a temperatura superiore

IL CICLO DI CARNOT

I cicli reversibili anche se sono soltanto delle astrazioni, dato che le irreversibilità associate ai processi reali non possono mai essere completamente annullate, forniscono delle indicazioni utili per lo studio del comportamento dei cicli reali. Le macchine termiche o i frigoriferi che operano secondo cicli reversibili servono come modello con cui confrontare le prestazioni dei cicli reali.

Il ciclo reversibile più conosciuto ed utilizzato è senz'altro il ciclo di Carnot, proposto da Sadi Carnot nel 1824. La macchina teorica che opera secondo un ciclo di Carnot prende il nome di Macchina di Carnot.

Il ciclo di Carnot è composto da quattro processi reversibili: due isotermici e due adiabatici.



Processo 1-2

Allo stato iniziale (1) la temperatura del gas è T_H e la testa del cilindro è a contatto con la sorgente di calore anch'essa a temperatura T_H . Il gas è lasciato libero di espandersi compiendo lavoro sul pistone. Man mano che il gas si espande la sua temperatura tende a diminuire ($-dT$) ma nel medesimo istante la sorgente fornirà il calore necessario per riportare la temperatura a T_H . La temperatura del gas si mantiene perciò costante (processo isotermico) e poiché le differenze di temperatura tra gas e sorgente sono infinitesimi (dT) il trasferimento di calore dalla sorgente al fluido è da ritenersi reversibile.

Il calore trasferito al gas sia Q_H .

Processo 2-3

Al punto (2) la sorgente viene rimossa e anche la testa del cilindro viene isolata termicamente cosicché il sistema diventa adiabatico. Il gas continua la sua espansione, fino a che raggiunge la temperatura T_L , e compie lavoro sul pistone. Nell'ipotesi che non vi siano attriti e che il movimento del pistone sia estremamente lento, il processo oltre che adiabatico risulta reversibile.

Processo 3-4

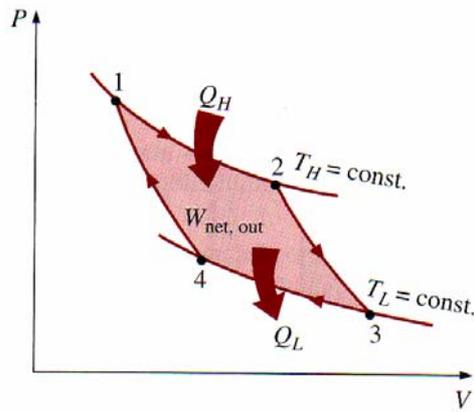
Al punto (3) l'isolamento della testa del cilindro viene rimossa e la testata viene messa a diretto contatto con una sorgente a bassa temperatura (T_L). Il pistone, tramite l'azione di una forza esterna, comprime molto lentamente il gas che aumenterà la sua temperatura di una quantità infinitesima (dT). A questo punto avverrà un trasferimento di calore dal gas alla sorgente a bassa temperatura in modo da realizzare un processo isotermico che porta il sistema al punto (4). Dato che le differenze di temperatura tra gas sorgente sono sempre infinitesime, anche in questo caso il processo è reversibile.

Il calore ceduto dal gas sia Q_L .

Processo 4-1

Al punto (4) la sorgente a T_L viene rimossa e la testata viene isolata. Il pistone, sempre tramite una forza esterna, comprime lentamente il gas fino al raggiungimento della T_H . Nell'ipotesi che non vi siano attriti e che il movimento del pistone sia estremamente lento, il processo oltre che adiabatico risulta reversibile.

Di seguito vediamo la rappresentazione del ciclo del piano P-V. L'area sottesa dalla curva 1-2-3 rappresenta il lavoro compiuto dal fluido, mentre l'area sottesa dalla curva 3-4-1 rappresenta il lavoro compiuto sul gas. La differenza tra queste due aree, ovvero l'area racchiusa dal ciclo, rappresenta il lavoro netto ottenuto durante il ciclo.

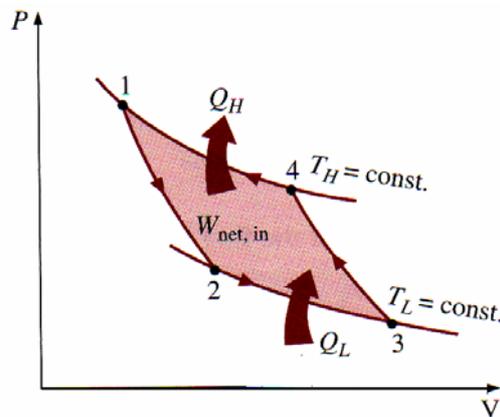


P-V diagram of the Carnot cycle.

Il ciclo di Carnot inverso

La macchina di Carnot descritta in precedenza utilizza un ciclo totalmente reversibile. Pertanto i processi possono essere percorsi in senso inverso: si parla in questo caso di ciclo frigorifero di Carnot.

Il ciclo è esattamente lo stesso soltanto viene percorso in senso inverso. Una quantità di calore Q_L viene assorbita dalla sorgente a bassa temperatura e una quantità di calore Q_H viene ceduta alla sorgente ad elevata temperatura. Per la realizzazione del ciclo occorre fornire un lavoro pari a $W_{net,in}$



P-V diagram of the reversed Carnot cycle.

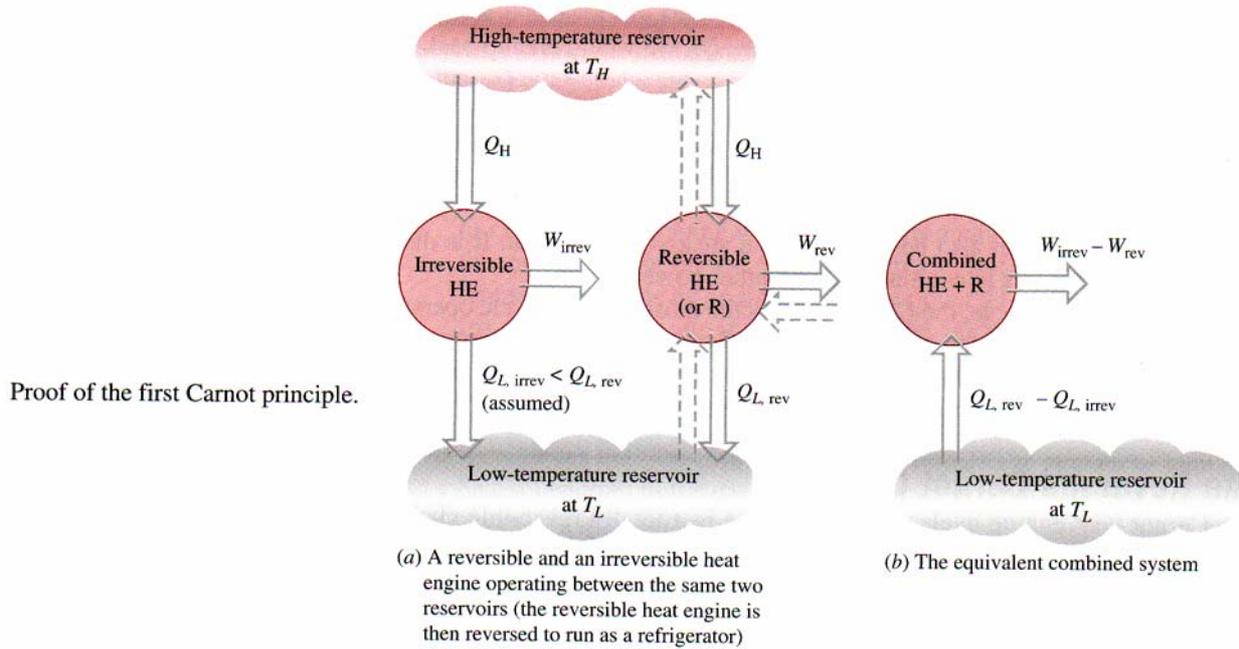
I Principi di Carnot

1. l'efficienza di una macchina irreversibile è sempre minore dell'efficienza di una macchina reversibile che operi tra le medesime sorgenti di calore;
2. tutte le macchine reversibili operanti tra le medesime sorgenti di calore hanno la stessa efficienza.

La validità di questi due enunciati si può dimostrare per assurdo ovvero verificando che la loro violazione implica necessariamente la violazione del secondo principio della termodinamica.

Dim. validità dell'enunciato 1

Consideriamo due macchine termiche operanti tra le medesime sorgenti di calore: una macchina sia reversibile e l'altra irreversibile.



Ciascuna macchina assorbe la stessa quantità di calore Q_H , mentre i lavori prodotti dalla macchina reversibile e da quella irreversibile siano rispettivamente W_{rev} e W_{irrev} . In violazione del primo principio di Carnot assumiamo che la macchina irreversibile sia più efficiente di quella reversibile $\eta_{th,irr} > \eta_{th,rev}$ e che pertanto sviluppi un maggior lavoro. Ora invertiamo il processo della macchina reversibile in modo che operi come un frigorifero. Tale frigorifero assorbirà un lavoro pari a W_{rev} e invierà una quantità di calore Q_H alla sorgente ad alta temperatura. Dato che il frigorifero invia la stessa quantità di calore Q_H che viene assorbita dalla macchina irreversibile, è possibile far a meno della sorgente ad alta temperatura e collegare direttamente macchina irreversibile e frigorifero. La macchina così assemblata produrrà un lavoro netto utilizzando una sola sorgente di temperatura violando, in tal modo, il secondo principio.

L'assunzione $\eta_{th,irr} > \eta_{th,rev}$ è pertanto falsa.

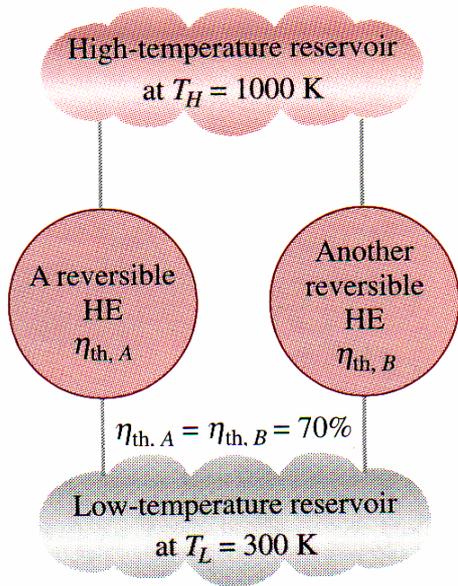
Risulterà quindi vera la seguente affermazione: $\eta_{th,rev} \geq \eta_{th,irr}$ c.v.d.

Dim. validità enunciato 2

Anche in questo caso si ragiona per assurdo. Supponiamo che la macchina B, reversibile, abbia un rendimento inferiore alla macchina A anch'essa reversibile. Invertiamo la macchina B, togliamo la sorgente a temperatura superiore, e colleghiamo direttamente le macchine A e B. Si ottiene una macchina che produce lavoro prelevando calore da una singola sorgente: anche in questo caso siamo di fronte ad una violazione del secondo principio della termodinamica. L'assunzione di partenza $\eta_B < \eta_A$ è falsa.

Allo stesso modo potremmo verificare che anche l'assunzione $\eta_A < \eta_B$ è falsa.

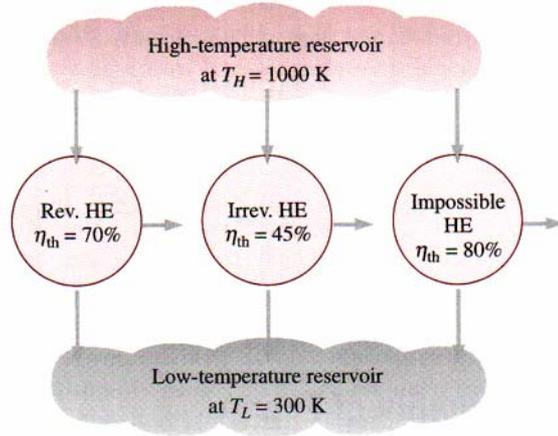
Deve essere pertanto $\eta_A = \eta_B$ c.v.d.



Si conclude quindi che nessuna macchina reversibile può essere più efficiente di un'altra macchina reversibile operante tra le medesime sorgenti di temperatura indipendentemente da come il ciclo viene realizzato e dal tipo di fluido di lavoro utilizzato.

Ribadiamo infine che nessuna macchina termica reale può avere un rendimento maggiore della corrispondente macchina di Carnot operante fra le stesse temperature. Nel migliore dei casi il rendimento può essere pari a quello della macchina di Carnot, ma allora è una macchina ideale. In ciò risiede l'importanza del ciclo ovvero della macchina di Carnot.

- $\eta_{th} < \eta_{th, rev}$ irreversible heat engine
- $\eta_{th} = \eta_{th, rev}$ reversible heat engine
- $\eta_{th} > \eta_{th, rev}$ impossible heat engine



No heat engine can have a higher efficiency than a reversible heat engine operating between the same high- and low-temperature reservoirs.

La scala termodinamica della temperatura

Il secondo principio di Carnot afferma che l'efficienza di una macchina termica reversibile è indipendente dal fluido elaborato o dalla modalità di effettuazione del ciclo, ma è solamente funzione delle temperature delle sorgenti entro cui il ciclo si svolge.

$$\eta_{th,rev} = g(T_H, T_L)$$

D'altra parte per ogni macchina termica, sia essa reversibile o irreversibile, si può scrivere:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

Allora anche il rapporto Q_L/Q_H è funzione delle sole temperature estreme del ciclo. Si avrà pertanto:

$$\frac{Q_L}{Q_H} = f(T_H, T_L) \tag{1.4}$$

Per stabilire la forma funzionale di $f(T_H, T_L)$ faremo uso di tre macchine termiche reversibili a fianco raffigurate.

Le macchine A e C prelevano la stessa quantità di calore Q_1 dalla sorgente a temperatura T_1 . La macchina C scarica una quantità di calore Q_3 alla sorgente a temperatura T_3 . La macchina B riceve una quantità di calore Q_2 , scaricata dal motore A a temperatura T_2 , e cede alla sorgente a bassa temperatura una quantità di calore Q_3

Applicando la (1.4) a tutte e tre le macchine separatamente si ha:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = f(T_1, T_2) \quad \frac{Q_2}{Q_3} = f(T_2, T_3) \quad \frac{Q_3}{Q_4} = f(T_3, T_4)$$

Ma ovviamente:

$$\frac{Q_1}{Q_3} = \frac{Q_1}{Q_2} \cdot \frac{Q_2}{Q_3}$$

a cui corrisponde la seguente identità:

$$\underbrace{f(T_1, T_3)}_{\text{non è funzione di } T_2} = \underbrace{f(T_1, T_2)}_{\text{non può essere funzione di } T_2} \cdot f(T_2, T_3)$$

Il prodotto a secondo membro deve essere indipendente da T_2 . Questa condizione è soddisfatta solamente se la funzione f ha può essere espressa come:

Quindi

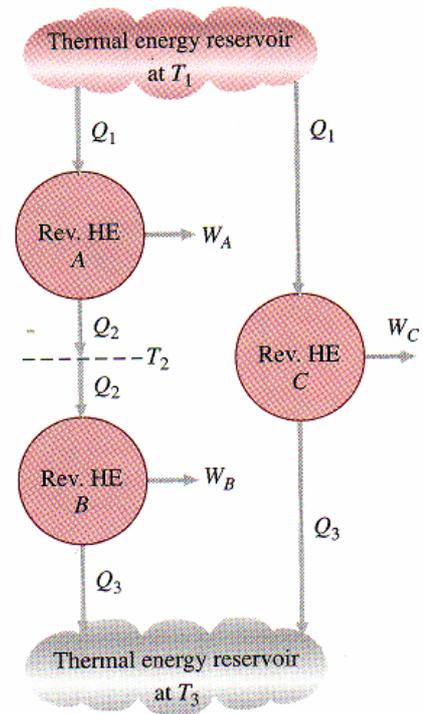
$$f(T_1, T_2) = \frac{\Phi(T_1)}{\Phi(T_2)} \tag{1.5}$$

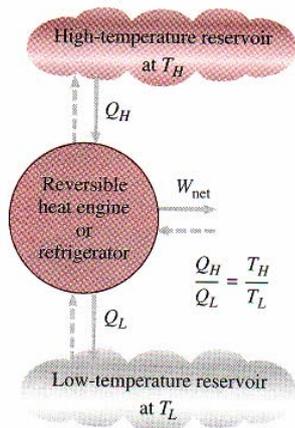
Qualunque funzione monotona di T è in grado di soddisfare la (1.5). La scelta più semplice è quella di porre:

$$\Phi(T) = T$$

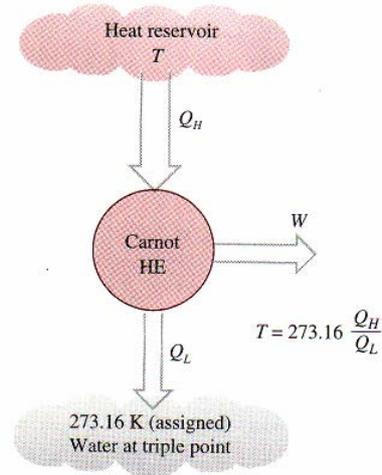
In tal modo possiamo definire una scala di temperatura come segue:

$$\left(\frac{Q_H}{Q_L} \right)_{rev} = \frac{T_H}{T_L} \tag{1.6}$$





For reversible cycles, the heat transfer ratio Q_H/Q_L can be replaced by the absolute temperature ratio T_H/T_L .



A conceptual experimental setup to determine thermodynamic temperatures on the Kelvin scale by measuring heat transfers Q_H and Q_L .

Questa scala di temperatura è detta *scala di Kelvin* e le temperature su questa scala sono dette *temperature assolute*. Sulla scala Kelvin i rapporti tra le temperature sono pari ai rapporti tra i calori scambiati da una macchina reversibile con le sorgenti e sono del tutto indipendenti dalle proprietà fisiche del fluido di lavoro. Su questa scala, le temperature variano da zero a infinito.

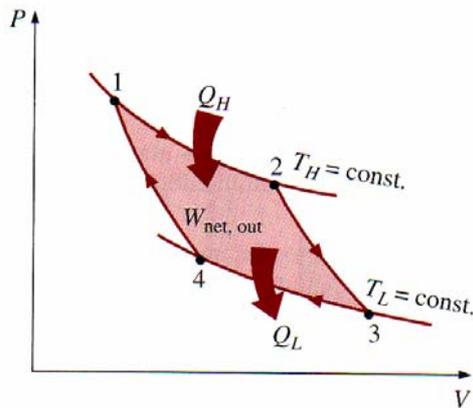
La (1.6) non definisce completamente la scala di temperatura, ma solo i rapporti tra le temperature assolute. Dobbiamo ancora definire l'ampiezza di un grado kelvin.

Nella Conferenza Internazionale dei Pesi e delle Misure tenuta nel 1954 è stato stabilito di assegnare al punto triplo dell'acqua il valore di 273.16 K. L'ampiezza di un kelvin è perciò definito come $1/273.16$ l'intervallo di temperatura tra il punto triplo dell'acqua e lo zero assoluto.

Anche se la scala di temperatura termodinamica è costruita con riferimento alle macchine termiche reversibili (macchine ideali), non è ipotizzabile, in pratica, far riferimento a tali macchine per determinare i valori numerici delle temperature assolute.

Le temperature assolute possono essere misurate in modo sufficientemente accurato tramite termometri a gas ideale e funzionanti a volume costante.

Rendimento del Ciclo di Carnot



P-V diagram of the Carnot cycle.

Per definizione di rendimento si ha:

$$\eta_{th} \equiv \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

Consideriamo ora un ciclo di Carnot che elabori una massa M di *gas perfetto*. Si ha quindi:

$$Q_H = W_{1-2} = M \int_1^2 p \cdot dv = M \cdot R \cdot T_H \cdot \log \frac{v_2}{v_1}$$

In modo analogo si calcola Q_L .

$$Q_L = M \cdot R \cdot T_L \cdot \log \frac{v_3}{v_4}$$

Il rendimento è quindi pari a:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_L \log(v_3/v_4)}{T_H \log(v_2/v_1)}$$

Le trasformazioni 2-3 e 3-4 sono adiabatiche quindi, nell'ipotesi di un gas perfetto, si ha:

$$p_2 v_2^k = p_3 v_3^k \quad p_4 v_4^k = p_1 v_1^k$$

Ricordando poi la relazione fondamentale $pv = RT$ si ha:

$$RT_H v_2^{k-1} = RT_L v_3^{k-1} \quad RT_L v_4^{k-1} = RT_H v_1^{k-1}$$

da cui:

$$\frac{v_3}{v_2} = \frac{T_L}{T_H} = \frac{v_4}{v_1} \Rightarrow \frac{v_1}{v_2} = \frac{v_3}{v_4}$$

Il rendimento del ciclo vale quindi:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_L \log(v_3/v_4)}{T_H \log(v_2/v_1)} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \tag{1.7}$$

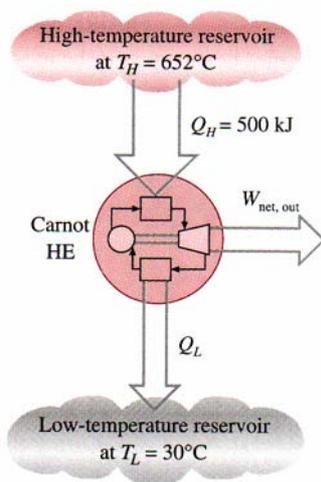
Il rendimento definito dalla (1.7) fa riferimento ad un gas perfetto e le temperature sono quelle misurate da un termometro a gas perfetto.

Dal teorema di Carnot sappiamo tuttavia che il rendimento di una macchina reversibile è indipendente dal fluido elaborato, pertanto la (1.7) è valida per tutte le macchine reversibili.

Notiamo infine che la (1.7) coincide con la (1.6) giustificando pertanto l'uso di termometri a gas ideali per la determinazione delle temperature termodinamiche.

Esempio 1-5

Analisi di una Macchina di Carnot



Una macchina di Carnot riceve 500 kJ di calore al ciclo dalla sorgente ad alta temperatura (652°C) e cede calore ad una sorgente a bassa temperatura a 30 °C. Determinare:

1. l'efficienza della macchina;
2. la quantità di calore ceduta alla sorgente fredda in ogni ciclo.

$$\eta_{th,C} = \eta_{th,rev} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \cong 1 - \frac{30 + 273}{652 + 273} = 0.672$$

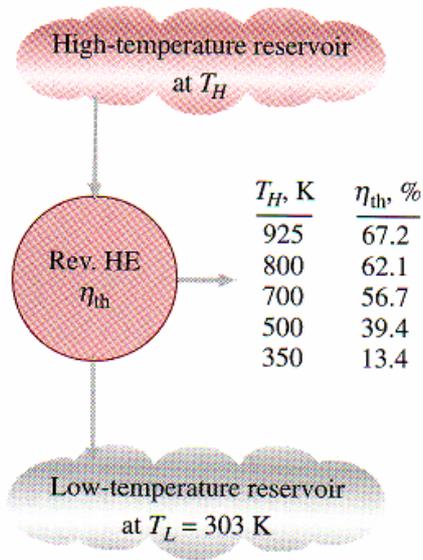
$$\left(\frac{Q_L}{Q_H} \right)_{rev} = \frac{T_L}{T_H} \rightarrow Q_L \cong 164 \text{ kJ}$$

La qualità dell'energia

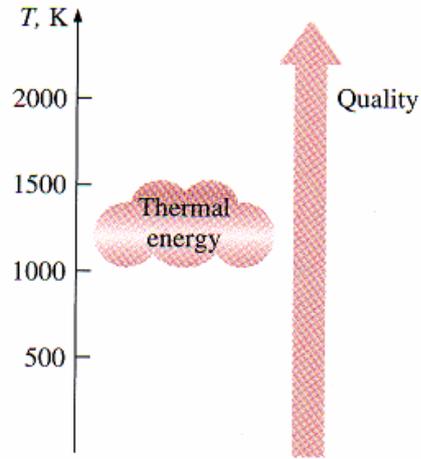
La macchina di Carnot dell'esempio precedente riceve calore dalla sorgente a 925 K e ne converte il 67.2 % in lavoro mentre il restante 32.8 % viene ceduto alla sorgente fredda a 303 K.

E' immediato notare che l'efficienza termica della macchina, tenuta costante la temperatura della sorgente fredda, aumenta all'aumentare della temperatura della sorgente calda. Ciò significa che all'aumentare della temperatura della sorgente calda aumenta la frazione di calore che può essere trasformata in lavoro.

Più è alta la temperatura, più è elevata la "qualità" dell'energia termica.



The fraction of heat that can be converted to work as a function of source temperature (for $T_L = 303$ K).



The higher the temperature of the thermal energy, the higher its quality.

Il frigorifero e la pompa di calore di Carnot

Un frigorifero e una pompa di calore che operino secondo un ciclo inverso di Carnot vengono chiamati rispettivamente frigorifero di Carnot e pompa di calore di Carnot.

Abbiamo già visto in precedenza dalle (1.1) e (1.2) che:

$$COP_R = \frac{1}{Q_H/Q_L - 1} \quad COP_{HP} = \frac{1}{1 - Q_L/Q_H}$$

Tenuta presente ora la (1.6) si ha:

$$COP_{R,rev} = \frac{1}{T_H/T_L - 1} \quad COP_{HP,rev} = \frac{1}{1 - T_L/T_H}$$

Questi sono i più alti coefficienti di prestazione rispettivamente di un frigorifero e di una pompa di calore operanti tra le temperature T_L e T_H .

Esempio 1-6

Una pompa di calore viene usata per riscaldare una casa durante l'inverno. Gli ambienti domestici sono mantenuti per tutto il periodo invernale a 21°C. Si stima che la casa, quando la temperatura esterna è pari a -5 °C, disperda 135000 kJ/h di calore verso l'esterno. Determinare la minima potenza richiesta per alimentare la pompa di calore in queste condizioni.

La pompa di calore deve, in condizioni stazionarie, fornire all'edificio una quantità di calore pari a 135000 kJ/h equivalente a 37.5 kW.

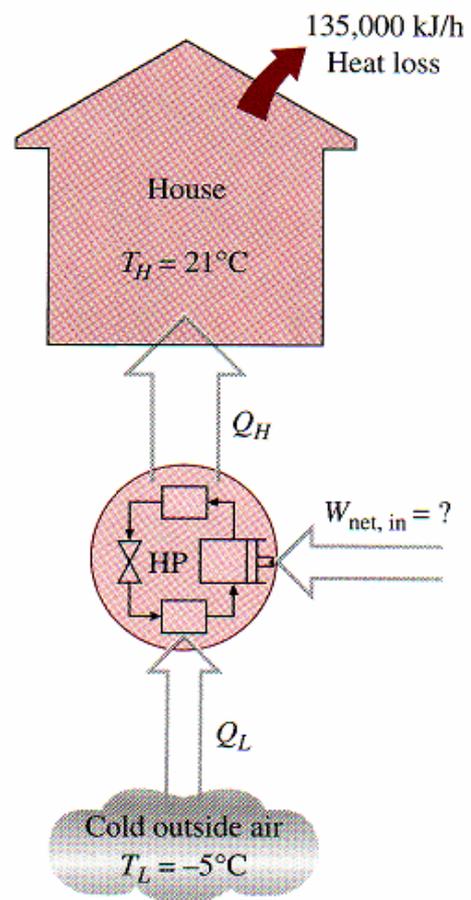
Ovviamente la potenza minima richiesta si riferisce ad una pompa di calore reversibile (ideale).

$$\begin{cases} COP_{HP} \equiv \frac{Q_H}{\dot{W}_{net,in}} \\ COP_{HP,rev} = \frac{1}{1 - T_L/T_H} = 11.3 \end{cases}$$

$$W_{net,in} = \frac{Q_H}{COP_{HP}} = 3.32 \text{ kW}$$

La pompa di calore assorbe, come minimo, 3.32 kW.

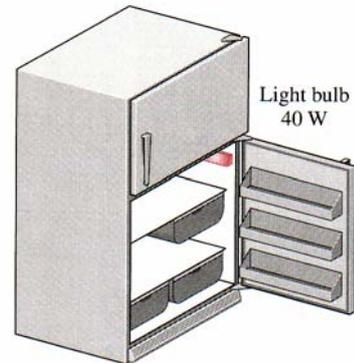
Si noti che una stufetta elettrica (ideale) in grado di riscaldare in modo analogo la casa assorbirebbe 37.5 kW con un consumo di energia 11.3 volte superiore a quello della pompa di calore!



Esempio 1-7

Il comparto interno di un refrigeratore è illuminato da una lampadina il cui interruttore viene automaticamente chiuso all'apertura dello sportello. Supponiamo che un refrigeratore con COP pari a 1.3 sia dotato di una lampadina da 40 W che rimane costantemente accesa per il malfunzionamento del suo interruttore.

Nell'ipotesi che il costo dell'energia elettrica si pari a 0.15 €/kWh determinare l'aumento di consumo di energia e il suo importo annuale in conseguenza della non riparazione dell'interruttore.



La lampadina, quando accesa, consuma 40 W e trasferisce questi 40 W come calore all'interno del refrigeratore. In tal modo il frigorifero dovrà assorbire una extra quota di potenza per aumentare la sua capacità raffreddante.

L'extra-quota di potenza assorbita per effetto del riscaldamento indotto dalla accensione continua della lampadina è pari a:

$$\dot{W}_{refr,lamp} = \frac{\dot{Q}_{lamp}}{COP_R} = \frac{40}{1.3} = 30.8 \text{ W}$$

Pertanto la potenza aggiuntiva assorbita dal frigorifero per effetto della continua accensione della lampadina è pari a:

$$\dot{W}_{surplus} = \dot{W}_{lamp} + \dot{W}_{refr,lamp} = 40 + 30.8 = 70.8 \text{ W}$$

Il numero di ore in un anno è:

$$\text{Ore anno} = 365 \cdot 24 = 8760 \text{ h/yr}$$

Si assuma che il frigorifero venga aperto 20 volte al giorno per un tempo di 30 s. Pertanto la lampadina, con interruttore integro, rimarrà normalmente accesa per:

$$\text{Ore normali accensione lampadina} = \frac{20 \cdot 30 \cdot 365}{3600} = 61 \text{ h/yr}$$

Pertanto, per effetto del malfunzionamento dell'interruttore, si consumerà all'anno una extra-quota di energia pari a:

$$\text{Extra-quota di energia} = \frac{70.8}{1000} (8760 - 61) = 616 \text{ kWh/yr}$$

Con un costo addizionale sulla bolletta pari a:

$$\text{Costo addizionale} = 616 \cdot 0.15 = 92.4 \text{ €/yr}$$

ESERCIZI

E1

Un impianto a vapore riceve calore dal bruciatore in misura di 280 GJ/h. Le perdite di calore verso l'esterno sono stimate pari a 8 GJ/h. Nell'ipotesi che l'impianto trasferisca calore all'acqua di raffreddamento nella misura di 145 GJ/h, determinare:

1. la potenza netta dell'impianto;
2. l'efficienza termica dell'impianto.

$$\dot{W}_{net} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{disp} - \dot{Q}_{out} = 280 - 8 - 145 = 127 \text{ GJ/h} = 1000 \frac{127}{3600} = 35.3 \text{ MW}$$

$$\eta_{th} \equiv \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{127}{280} = 45.3$$

E2

Un impianto a vapore con una potenza di 150 MW consuma 60 t/h di carbone. Nell'ipotesi che il potere calorifico del carbone sia pari a 30 MJ/kg determinare l'efficienza dell'impianto.

$$\dot{Q}_{in} = \frac{30 \cdot 60000}{3600} = 500 \text{ MW}$$

$$\eta_{th} \equiv \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{150}{500} = 0.3$$

E3

Un'automobile consuma 28 L/h di carburante e trasferisce una potenza di 60 kW alle ruote motrici. Nell'ipotesi che il carburante abbia un potere calorifico pari a 44 MJ/kg e una densità di 0.8 g/cm³, determinare l'efficienza del motore.

$$\eta_{th} \equiv \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{60}{(44 \cdot 1000 \cdot 28 \cdot 1000 \cdot 0.8) / (3600 \cdot 1000)} \cong 0.219$$

E4

Un condizionatore domestico, in condizioni stazionarie, rimuove calore dall'ambiente nella misura di 750 kJ/min e assorbe una potenza elettrica di 6 kW.

Determinare il COP del condizionatore e la quantità di calore trasferita all'esterno.

$$COP_R \equiv \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{net,in}} = \frac{750}{60 \cdot 6} \cong 2.08$$

$$COP_R \equiv \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{net,in}} = \frac{1}{\dot{Q}_H / \dot{Q}_L - 1} \rightarrow \dot{Q}_H = \left(\frac{1}{COP_R} - 1 \right) \dot{Q}_L \cong 1111 \text{ kJ/min}$$

E5

Un frigorifero domestico con COP pari a 1.5 rimuove calore dallo spazio refrigerato nella misura di 60 kJ/min. Determinare la potenza elettrica assorbita dal frigorifero e la quantità di calore riversata nell'ambiente esterno.

$$COP_R \equiv \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}_{net,in}} \rightarrow \dot{W}_{net,in} = \frac{60}{1.5} \cong 0.67 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_H = \left(\frac{1}{COP_R} + 1 \right) \dot{Q}_L = \left(\frac{1}{1.5} + 1 \right) \cdot 60 = 100 \text{ kJ/min}$$

E6

Un frigorifero domestico, che assorbe una potenza di 450 W con un COP pari a 2.5, deve raffreddare a 8°C 5 angurie ciascuna con una massa di 10 kg. Se le angurie hanno una temperatura iniziale di 20°C, determinare il tempo richiesto affinché la refrigerazione sia completata.

N.B.: le angurie possono essere trattate come acqua il cui calore specifico è 4.2 kJ/kgK

$$\dot{Q}_L = COP_R \cdot \dot{W}_{net,in} = \frac{450 \cdot 2.5}{1000} = 1.125 \text{ kJ/s}$$

Il calore estratto dalla angurie, a raffreddamento ultimato, è pari a:

$$Q_{estr} = c \cdot M \cdot \Delta T = 4.2 \cdot 50 \cdot 12 = 2520 \text{ kJ}$$

Il tempo necessario per completare il raffreddamento è quindi pari a:

$$t = \frac{Q_{estr}}{\dot{Q}_L} = 2240 \text{ s}$$

E7

Determinare il COP di una pompa di calore che trasferisce nell'ambiente interno 8000 kJ/h di calore per ogni kW di potenza elettrica assorbita. Quantificare inoltre il calore trasferito all'esterno.

$$COP_{HP} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}_{net,in}} = \frac{8000}{3600 \cdot 1} \cong 2.22$$

$$COP_{HP} = \frac{1}{1 - \dot{Q}_H / \dot{Q}_L} \rightarrow \dot{Q}_L = \left(1 - \frac{1}{COP_{HP}} \right) \dot{Q}_H = 4400 \text{ kJ/h}$$

E8

Una pompa di calore viene usata per mantenere la temperatura ambiente a 23°C. Si ipotizzi che l'ambiente, attraverso i muri e le finestre, disperda all'esterno una quantità di calore pari a 60000 kJ/h e che l'energia generata dalle persone, dalle lampade e dai vari elettrodomestici sia pari a 4000 kJ/h.

Determinare la potenza elettrica assorbita dalla pompa di calore nell'ipotesi che il suo COP sia 2.5.

$$COP_{HP} \equiv \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}_{net,in}} \rightarrow \dot{W}_{net,in} = \frac{\dot{Q}_H}{COP_{HP}} = \frac{56000}{3600 \cdot 2.5} \cong 6.2 \text{ kW}$$

E9

Una macchina di Carnot opera tra due sorgenti alla temperatura rispettivamente di 1000 K e 300 K. Nell'ipotesi che la macchina assorba calore dalla sorgente calda nella misura di 800 kJ/min, determinare l'efficienza termica della macchina e la sua potenza erogata.

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{300}{1000} = 0.7$$

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net,out}}{\dot{Q}_H} \rightarrow \dot{W}_{net,out} = \frac{800}{60} \cdot 0.7 \cong 9.33 \text{ kW}$$

E10

Un modo innovativo di ottenere energia consiste nell'utilizzazione dell'energia geotermica ovvero nello sfruttamento dell'energia dell'acqua calda che staziona nel sottosuolo. Si supponga che venga scoperto nel sottosuolo un bacino di acqua a 140°C. Determinare la massima efficienza di un impianto geotermico realizzato in un ambiente a 20°C.

$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \cong 0.29$$

E11

Un frigorifero rimuove calore dallo spazio refrigerato nella misura di 300 kJ/min per mantenere la temperatura a -8°C. Se l'ambiente circostante è a 25°C, determinare la minima potenza richiesta dal frigorifero.

$$\frac{T_L}{T_H} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_H} = 0.89 \rightarrow \dot{Q}_H = \frac{\dot{Q}_L}{0.89} \cong 337 \text{ kJ/min}$$

$$\dot{W}_{net,in} = \dot{Q}_L - \dot{Q}_H \cong 0.62 \text{ kW}$$

E12

Un condizionatore d'aria, operante secondo un ciclo inverso di Carnot, deve trasferire calore dall'ambiente nella misura di 750 kJ/min per mantenere la temperatura 20°C. Se la temperatura esterna è pari a 35°C, determinare la potenza richiesta per il funzionamento dell'impianto.

$$\frac{\dot{Q}_H}{\dot{Q}_L} = \frac{T_H}{T_L} \rightarrow \dot{Q}_H = \dot{Q}_L \frac{T_H}{T_L} \cong 778.4 \text{ kJ/min}$$

$$\dot{W}_{net,in} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L \cong 0.64 \text{ kW}$$

E13

Un refrigeratore di Carnot opera in un ambiente con temperatura di 25°C. Il refrigeratore assorbe una potenza di 500 W ed opera con un COP pari a 4.5.

Determinare il calore rimosso dallo spazio refrigerato e la temperatura del medesimo spazio.

$$\begin{cases} \frac{\dot{Q}_H}{\dot{Q}_L} = \frac{T_H}{T_L} \\ \dot{Q}_H - \dot{Q}_L = \dot{W}_{net,in} \end{cases} \rightarrow \dot{Q}_L = 135 \text{ kW}$$

E14

Una pompa di calore funzionante secondo un ciclo inverso di Carnot viene usata per *mantenere*, in inverno, la temperatura della casa a 20°C. In una giornata in cui la temperatura esterna è pari a 2°C, si stima che le perdite di calore verso l'esterno ammontino a 82000 kJ/h. Se la pompa di calore assorbe 8 kW di potenza, determinare:

1. per quanto tempo, durante tale giornata, la pompa rimane attiva;
2. il costo di energia elettrica consumata dalla pompa di calore (costo del kWh pari a 0.15 €);
3. il costo dell'energia elettrica consumata, nella stessa giornata, nell'ipotesi di utilizzare per il riscaldamento una stufa a resistenza.

$$\begin{cases} \dot{Q}_H - \dot{Q}_L = \dot{W}_{net,in} \\ \frac{\dot{Q}_H}{\dot{Q}_L} = \frac{T_H}{T_L} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \dot{Q}_H \cong 130.29 \text{ kW} \\ \dot{Q}_L \cong 122.29 \text{ kW} \end{cases}$$

Durante la giornata (24h) la quantità di calore dispersa verso l'esterno vale:

$$Q_{disp} = 82000 \cdot 24 = 1968 \text{ MJ}$$

In una giornata pertanto la pompa rimarrà attiva per un tempo t pari a:

$$t = \frac{Q_{disp}}{\dot{Q}_H} = \frac{1968000}{130.29 \cdot 60 \cdot 60} \cong 4.2 \text{ h}$$

Il costo dell'energia elettrica consumata dalla pompa di calore è pari a:

$$C_{en} = \dot{W}_{net,in} \cdot t \cdot c = 8 \cdot 4.2 \cdot 0.15 \cong 5 \text{ €}$$

Il costo dell'energia elettrica consumata dalla stufa a resistenza vale:

$$C_{en} = \dot{Q}_H \cdot t \cdot c \cong 82 \text{ €}$$

E15

Una macchina di Carnot riceve calore da una sorgente a 900 °C nella misura di 800 kJ/min e cede calore all'ambiente a 27°C. L'intero lavoro sviluppato dalla macchina viene utilizzato per azionare un refrigeratore, posizionato in un ambiente a 27°C, il cui spazio refrigerato è a -5°C. Determinare la massima quantità di calore rimossa dallo spazio refrigerato nonché il calore ceduto all'aria ambiente.

La quantità di calore ceduta dalla macchina di Carnot alla sorgente a bassa temperatura vale:

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_H \frac{T_L}{T_H} \cong 204.7 \text{ kJ/min}$$

La potenza sviluppata dalla macchina di Carnot vale:

$$\dot{W}_{net,out} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L \cong 595.3 \text{ kJ/min}$$

Sappiamo che il frigorifero opera tra 27 e -5°C ed assorbe una potenza di 595.3 kJ/min. Pertanto si ha:

$$\begin{cases} \frac{\dot{Q}_H}{\dot{Q}_L} = \frac{T_H}{T_L} \cong 1.12 \\ \dot{Q}_H - \dot{Q}_L = \dot{W}_{net,in} = 595.32 \text{ kJ/min} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \dot{Q}_H \cong 5587 \text{ kJ/min} \\ \dot{Q}_L \cong 4988 \text{ kJ/min} \end{cases}$$

E16

Si considerino due macchine di Carnot operanti in serie. La prima macchina riceve calore da una sorgente a 2400 K e cede calore ad una sorgente a temperatura T . La seconda macchina riceve questa energia ceduta dalla prima macchina, ne converte parte in lavoro e la rimanenza viene ceduta ad una sorgente a 300 K. Nell'ipotesi che entrambe le macchine abbiano la stessa efficienza termica, determinare il valore di T .

$$\begin{cases} \eta_A = 1 - \frac{T_{2400}}{T} \\ \eta_B = 1 - \frac{T}{T_{300}} \\ \eta_A = \eta_B \end{cases} \rightarrow T = \sqrt{T_{2400} \cdot T_{300}} \cong 848.5 \text{ K}$$

E17

Il COP di un frigorifero diminuisce man mano che la temperatura dell'ambiente refrigerato diminuisce. La rimozione di calore da un mezzo a temperatura molto bassa richiederà un lavoro molto elevato. Si determini il minimo lavoro richiesto per rimuovere 1 kJ di calore dall'elio liquido a 3 K, quando la temperatura esterna è pari a 300 K.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_H &= \dot{Q}_L \frac{T_H}{T_L} \cong 100 \text{ kJ} \\ \dot{W}_{net,in} &= \dot{Q}_H - \dot{Q}_L = 99 \text{ kJ} \end{aligned}$$

E18

Un condizionatore d'aria è utilizzato per *mantenere* la temperatura di una abitazione a 20°C . L'abitazione assorbe calore dall'esterno nella misura di 20000 kJ/h e il calore generato all'interno dalle persone, dalle lampade e dagli elettrodomestici in genere è pari a 8000 kJ/h. Determinare la potenza richiesta dall'impianto di condizionamento in corrispondenza di un COP pari a 2.5.

$$\begin{aligned} COP_R &= \frac{1}{\frac{\dot{Q}_H}{\dot{Q}_L} - 1} \rightarrow \dot{Q}_L = \frac{\dot{Q}_H}{\frac{1}{COP_R} + 1} \cong 20000 \text{ kJ/h} \\ \dot{W}_{net,in} &= \dot{Q}_H - \dot{Q}_L = 8000 \text{ kJ/h} \cong 2.22 \text{ kW} \end{aligned}$$