

## 1. Trasformazione dell'energia

### 1.1 Cenni storici

E' alla prima metà del secolo XIX che si può far risalire la nascita della termodinamica così come oggi la intendiamo. In realtà affonda le sue radici nell'antichità e soprattutto nelle ricerche, che intorno al calore, hanno tenuto occupati filosofi e fisici. Gli antichi avevano idee estremamente confuse sul calore: c'è chi come i filosofi ioni riteneva che il quarto elemento fosse il fuoco e confondeva fatalmente il fuoco con il calore, considerando quest'ultimo una sostanza; altre scuole invece ritenevano che il calore fosse uno stato dei corpi. Anche la distinzione tra caldo e freddo fu fonte di confusione: i filosofi peripatetici affermavano che caldo e freddo fossero proprietà intrinseche e distinte dai corpi e si dovrà arrivare al 1623 perché Galileo Galilei affermi nella sua opera "Il Saggiatore" che *il freddo non è una qualità positiva dei corpi, sebbene una privazione di caldo e che non è insito nella materia*. Parallelamente agli studi condotti sulla natura del calore nascono e proseguono quelli sul calore specifico e la temperatura. Ancora nel 1829 Biot afferma che l'origine del calore è ignota e gli stessi studi di Sadi Carnot, che aprono la via della termodinamica moderna, furono avviati quando l'autore ne sosteneva l'esattezza. Gli studi di Carnot si collocano in un periodo che vede il passaggio dagli studi del calore dal campo speculativo a quello pratico, con lo scopo di migliorare il funzionamento della macchina a vapore, soprattutto sotto l'aspetto del rendimento. La questione destò l'interesse di Carnot, ma la sua opera, inizialmente passata inosservata, solo dieci anni dopo richiamò l'attenzione di Clapeyron, che contemporaneamente annunciò l'equazione di stato dei gas perfetti. Le nuove idee tardarono ad affermarsi finché, intorno alla metà del secolo, un gruppo di studiosi, quasi indipendentemente l'uno dall'altro, enunciò il concetto di equivalenza tra calore e lavoro: è l'embrione del primo principio della termodinamica.

### 1.2 Primo Principio della Termodinamica

Un sistema è un insieme di corpi che possiamo immaginare avvolti in una superficie chiusa, ma permeabile alla materia e all'energia. L'ambiente è tutto ciò che si trova fuori da questa superficie. La termodinamica studia le leggi con cui i sistemi scambiano (cioè cedono e ricevono) energia con l'ambiente. Questi scambi di energia avvengono sotto forma di calore e di lavoro. Quando un sistema riceve energia dall'esterno, la sua energia interna aumenta; quando la cede all'esterno, la sua energia interna diminuisce.

Con il Primo Principio della Termodinamica si esprime la conservazione dell'energia: ***l'energia non si crea e non si distrugge, ma si trasforma.***

Secondo la definizione di R.J.E. Clausius il primo principio della termodinamica la variazione di **energia interna** di un corpo  $\Delta E$  ( $E_2 - E_1$ ) è pari all'energia scambiata all'esterno (calore o lavoro). L'energia non si crea, non si distrugge ma si conserva, manifestandosi in forme diverse e con diversa utilizzabilità da parte dell'uomo. Il lavoro (L) e il calore (Q) sono quindi due diverse modalità di trasferimento dell'energia da un corpo ad un altro. Il primo principio di termodinamica introduce nella fisica il concetto di energia

interna E. L'energia interna di un corpo è legata al movimento delle sue componenti (atomi e molecole) ed è strettamente legata alla temperatura e alla pressione. La variazione dell'energia interna di un corpo è pari alla somma algebrica del lavoro fatto verso l'esterno (L) e del calore assorbito dal sistema (Q).

$$E_2 - E_1 = Q - L$$

Con questo tipo di formula si enuncia il Primo Principio della termodinamica in maniera generale, ma ci possono essere diverse componenti da considerare relativamente al sistema. Vi possono essere apporti di energie differenti che si vanno a sommare all'interno del nostro sistema.

Esempio:  $E_2 - E_1 = Q - L + E_m + E_e + E_c + E_p$

$E_m$  = Energia Meccanica

$E_e$  = Energia Elettrica

$E_c$  = Energia Cinetica

$E_p$  = Energia Potenziale

In alcuni casi l'energia non viene sommata al sistema ma bensì sottratta, a causa della dispersione nell'ambiente.

Esempio:  $(E_2 - E_1) = Q - L - E_a - E_r$

$E_a$  = Energia Acustica

$E_r$  = Energia Radiante

### 1.3 Classificazione dell'energia

Nell'enunciato del primo principio della termodinamica le energie vengono trattate come fossero equivalenti. In realtà non tutte le energie sono uguali, ma può essere stabilita una vera e propria gerarchia:

- **Classe A (o di prima specie):** sono le forme di energia nobili, come lavoro meccanico, energia elettrica, potenziale, cinetica, elettromagnetica. Rientrano in questa categoria anche le forme di energia chimica che possono essere convertite con rendimenti alti in lavoro meccanico o elettrico mediante un processo elettrochimico (pile o batterie).
- **Classe B (o di seconda specie):** sono le forme di energia degradata, più povere, che hanno una bassa capacità di conversione, come calore ed energia chimica non convertibile in lavoro elettrico meccanico, ma trasformabile in calore mediante processi di combustione (**OSSIDAZIONE**), processo esotermico.

La **combustione** è una reazione chimica che comporta l'ossidazione di un combustibile da parte di un comburente (che in genere è rappresentato dall'ossigeno presente nell'aria), con sviluppo di calore e radiazioni elettromagnetiche, tra cui spesso anche radiazioni luminose. In termini più rigorosi la combustione è una ossidoriduzione esotermica in quanto un composto si ossida mentre un altro si riduce (nel caso degli idrocarburi, il carbonio si ossida, l'ossigeno si riduce) con rilascio di energia e formazione di nuovi composti, principalmente anidride carbonica e acqua.

E' evidente che mentre la trasformazione da energia di classe A a energia di classe B è sempre effettuabile, quella inversa, da B ad A, è impedita a meno di una grossa percentuale discreta e finita che rappresenta un limite invalicabile.



Figura 1. Trasformazione dell'energia

Questa limitazione si giustifica perché in tutti i fenomeni di trasformazioni energetiche, il calore si estrinseca come una forma per così dire degradata, tanto meno utilizzabile quanto minore è la temperatura media alla quale è disponibile.

## 2. Anergia ed Exergia

Esistono forme di energia che si possono trasformare in ogni altra forma di energia. Queste forme di energia, riassumibili nel concetto superiore di exergia, possono essere trasformate completamente l'una nell'altra mediante processi reversibili ed anche nelle forme di energia soggette a limitazioni di conversione, quali energia interna e calore, mediante processi reversibili o irreversibili. Invece è impossibile trasformare le forme di energia soggette a limitazioni di conversione totalmente in exergia. Qui il 2° principio stabilisce precisi limiti superiori, che non dipendono solo dal tipo di energia e dallo stato del sistema, ma anche dallo stato dell'ambiente.

Vale la definizione:

*In un ambiente prefissato, exergia è energia che si lascia trasformare in ogni altra forma di energia; anergia è energia non trasformabile in exergia.*

Quindi:

**Energia = Exergia + Anergia**

Il 1° principio formulato, quale principio di conservazione dell'energia, asserisce:

*In ogni trasformazione la somma dell'exergia e dell'anergia rimane costante.*

Ciò vale, come osservato, solo per la somma di exergia ed anergia (energia totale).

Riguardo al comportamento di exergia ed anergia nei processi reversibili ed irreversibili sussistono in più le seguenti asserzioni del 2° principio:

- 1) *In tutti i processi irreversibili si ha trasformazione di exergia in anergia;*
- 2) *Solo nei processi reversibili l'exergia si conserva;*
- 3) *E' impossibile trasformare anergia in exergia.*

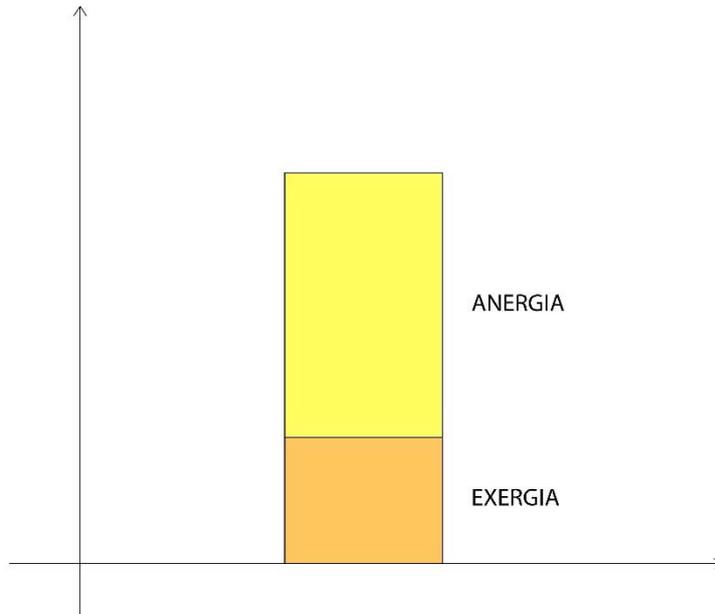


Figura 2. Energia: somma di Exergia ed Anergia

Come conclusione delle nostre riflessioni generali sui concetti di exergia ed anergia vogliamo brevemente accennare al *significato tecnico* di queste grandezze. Le procedure tecniche che rendono possibile la vita umana, quali riscaldare, refrigerare, produrre e lavorare materiali, trasportare carichi - tutte queste attività richiedono energia per la loro esecuzione. Tuttavia esse non richiedono semplicemente energia, bensì lavoro utile o energia elettrica, dunque exergia. Il compito di rendere disponibile tale energia spetta all'industria energetica, che preleva dalle fonti energetiche naturali tale exergia e la distribuisce prevalentemente sotto forma di energia elettrica ai "consumatori", ovvero alle suddette attività nelle quali l'exergia viene effettivamente largamente consumata, nel senso che viene trasformata in anergia. Le nostre fonti di energia sono dunque in realtà fonti di exergia, quali combustibili fossili e nucleari o energia idraulica, la cui energia è potenzialmente 100% exergia nei confronti dell'ambiente. Per contro non possiamo ricavare exergia dall'energia interna dell'ambiente, poiché questa è costituita di sola anergia. Il concetto tecnico di energia e della produzione di energia corrisponde dunque al concetto di exergia, non con quello di energia del 1° principio. "Consumo" di energia o "perdita" di energia sono concetti che contraddicono il 1° principio, poiché l'energia non può essere consumata né andare perduta.

ENERGIA	ANERGIA	EXERGIA
Energia Elettrica	1%	99%
Energia Chimica	10%-15%	85%-90%
Energia Termica	Funzione della Temperatura	Funzione della Temperatura
Energia Meccanica	0%	100%

Figura 3. Distinzione fra Anergia ed Exergia nelle diverse forme di energia

### 3. Teorema di Carnot

In termodinamica, il **teorema di Carnot** afferma che non è possibile realizzare una macchina termica operante tra due sorgenti che abbia un rendimento maggiore di quello della Macchina di Carnot operante tra le stesse sorgenti. Il teorema fu un passo essenziale per arrivare alla formulazione del secondo principio della termodinamica. Durante una trasformazione di energia termica in energia meccanica, l'efficienza termica (rendimento) del motore è la percentuale di energia che viene trasformata in lavoro.

Una **macchina di Carnot** è una macchina termica teorica, che opera con il ciclo di Carnot reversibile. Il concetto base fu sviluppato da Sadi Carnot nel 1824, quindi fu praticamente concepita da Benoit Paul Émile Clapeyron nel 1834 ed elaborata matematicamente da Rudolf Clausius tra il 1850 e il 1860.

La macchina di Carnot, come tutte le macchine termiche, serve per convertire calore (che è trasferito da una sorgente calda a una fredda) in lavoro.

Nel diagramma in figura, tratto da *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance (Riflessioni sulla potenza motrice del fuoco e sulle macchine adatte a sviluppare tale potenza)* di Carnot, i corpi A e B sono mantenuti ad una temperatura costante, in modo che A sia più caldo di B. Carnot aveva postulato che il fluido contenuto nel cilindro avrebbe potuto essere qualsiasi sostanza capace di espandersi, come il vapore acqueo, vapori di alcol, o di mercurio, un gas, o aria. Nonostante questo, negli anni la sorgente calda è stata realizzata come un bollitore, in cui l'acqua evapora, mentre la sorgente fredda un condensatore a contatto con l'ambiente esterno. Il lavoro è dato dal movimento del pistone che era utilizzato, per esempio, per svuotare le miniere dall'acqua. Carnot definiva il lavoro in termini della quantità peso che la macchina era in grado di sollevare a una certa altezza.

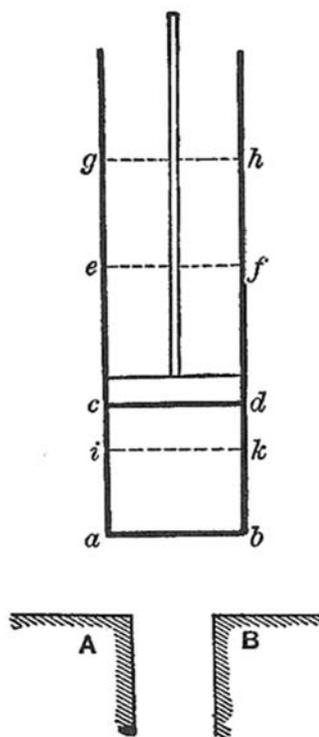


Figura 4. Diagramma originale del 1824 della macchina di Carnot

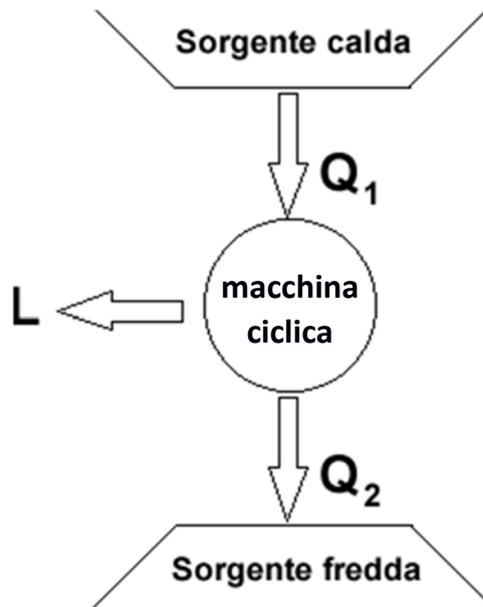


Figura 5. Schema della macchina a vapore

Trattandosi di una macchina ciclica, al compimento di un intero ciclo essa ritorna al punto di partenza, quindi la sua variazione di energia interna è nulla:

$$0 = Q - L \quad \text{ovvero} \quad 0 = Q_1 - Q_2 - L$$

Si dice **Coefficiente Economico**  $\varepsilon$  della macchina il rapporto tra il lavoro totale compiuto sull'ambiente esterno ( $L$ ) e il calore totale assorbito dalla macchina ciclica ( $Q_1$ ).

$$\varepsilon = L / Q_1$$

*Il teorema di Carnot afferma che tra tutte le macchine operanti tra due sorgenti assegnate, il valore massimo del coefficiente economico compete a quella che opera reversibilmente, e ciò indipendentemente dalla natura del corpo intermedio e dall'ampiezza del ciclo.*

**Coefficiente economico di Carnot**  $= L / Q_1 = (Q_1 - Q_2) / Q_1 = 1 - Q_2/Q_1 = 1 - T_2 / T_1$

$$\varepsilon_c = 1 - T_2 / T_1$$

→ Macchina perfettamente reversibile (importa solo la temperatura dei serbatoi).

*Esempio:*  $T_1 = 100 \text{ °C} = 373 \text{ K}$

$T_2 = 0 \text{ °C} = 273 \text{ K}$

$$\varepsilon_c = 1 - T_2 / T_1 = 1 - 273 / 373 = 0,268$$

→ Considerando l'inevitabile attrito,  $\varepsilon$  sarà circa 0,25, quindi non è una macchina del tutto reversibile.

#### 4. Macchine termiche

In termomeccanica una **macchina termica** è un dispositivo fisico che converte l'energia termica fornita dall'ambiente esterno (calore) in lavoro. Le macchine termiche sono

tipicamente cicliche e sono quindi descritte fisicamente da un ciclo termodinamico. Il nome di una macchina termica di solito è quello del ciclo termodinamico associato. Il lavoro è prodotto sfruttando la differenza di temperatura tra una sorgente calda e una sorgente fredda. Il calore è trasferito dalla sorgente calda a quella fredda di solito tramite un fluido.

#### 4.1 Pompa di calore

La **pompa di calore** è una macchina in grado di trasferire energia termica da una sorgente a temperatura più bassa ad una sorgente a temperatura più alta o viceversa, utilizzando differenti forme di energia, generalmente elettrica.

Quando si confrontano le prestazioni di pompe di calore, è meglio evitare il termine "rendimento", in quanto esso ha differenti significati, ed in generale è un numero  $\leq 1$ , ma conviene parlare di resa. La resa è espressa dal coefficiente di prestazione, **COP**, rapporto tra energia resa (alla sorgente di interesse) ed energia consumata (di solito elettrica), ed in generale può essere un numero ben maggiore di 1.

Un valore del COP pari a 3 indica che per ogni J di energia elettrica consumato, la pompa di calore fornisce calore pari a 3 J. La pompa di calore è solitamente più efficiente nel riscaldamento che nel raffreddamento, dato che il lavoro ricevuto dall'esterno andrà a sommarsi al calore sottratto al serbatoio freddo, e quindi al serbatoio caldo sarà disponibile una quantità di calore sistematicamente maggiore di quella sottratta al serbatoio freddo.

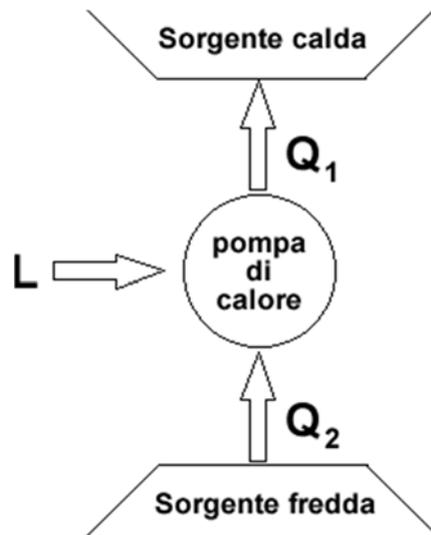


Figura 6. Schema della pompa di calore

Esempi comuni di macchine di questo tipo sono:

- refrigeratori;
- condizionatori d'aria;
- pompa di calore a compressione di gas;
- pompa di calore ad assorbimento;
- pompa di calore a cambiamento di fase;
- pompa di calore termoelettrica a effetto Peltier;
- pompa di calore a scambio geotermico;
- Vortex, detto anche tubo di Ranque-Hilsch.

Si noti che, nel campo di condizionamento dell'aria, il termine pompa di calore è specificamente riferito ad un condizionatore d'aria con valvola reversibile, che cambia la direzione di scorrimento del fluido refrigerante e permette così sia di apportare sia di estrarre calore da un locale di un edificio.

*Esempio:* Prendendo in esame il comportamento di una pompa di calore in relazione a quello di una comune stufetta elettrica si può notare:

Pompa di calore → Prima: 1 kJ Exergia - 0 kJ Anergia  
Dopo: 0.15 kJ Exergia – 2.85 kJ Anergia

Stufetta elettrica → Prima: 1 kJ Exergia - 0 kJ Anergia  
Dopo: 0,05 kJ Exergia – 0,95 kJ Anergia

Pertanto si può osservare che con a parità di energia iniziale con una pompa di calore avremo un rendimento nettamente maggiore rispetto a quello ottenuto dalla stufetta elettrica.

## 4.2 Totem

Il **TOTEM** acronimo di *Total Energy Module* è il primo esempio di cogeneratore ideato in Italia nel 1973 dall'ing. Mario Palazzetti, presso il Centro Ricerche Fiat. Scopo del progetto era quello di ottenere un apparato in grado di generare calore ed energia elettrica ottimizzando il rendimento. Utilizzava il motore di una 127, di 903 cm<sup>3</sup>, modificato per funzionare a gas o biogas. Il motore azionava un alternatore di 15 kW che forniva all'utenza l'energia elettrica. Il calore generato dal motore, solitamente disperso mediante i gas di scarico ed il corpo del motore stesso, veniva invece utilizzato per scaldare l'acqua usata poi per il riscaldamento degli ambienti e per usi sanitari. L'accurata progettazione consentiva un recupero del 90% dell'energia introdotta con il combustibile, e la sua modularità consentiva la installazione di molteplici unità controllate elettronicamente. Con 15 kW, la potenza elettrica generata da un singolo modulo poteva bastare a soddisfare il fabbisogno medio di 5-10 appartamenti, mentre con il calore di 33.500 chilocalorie/h sviluppato dal sistema si potevano riscaldare un paio di appartamenti.

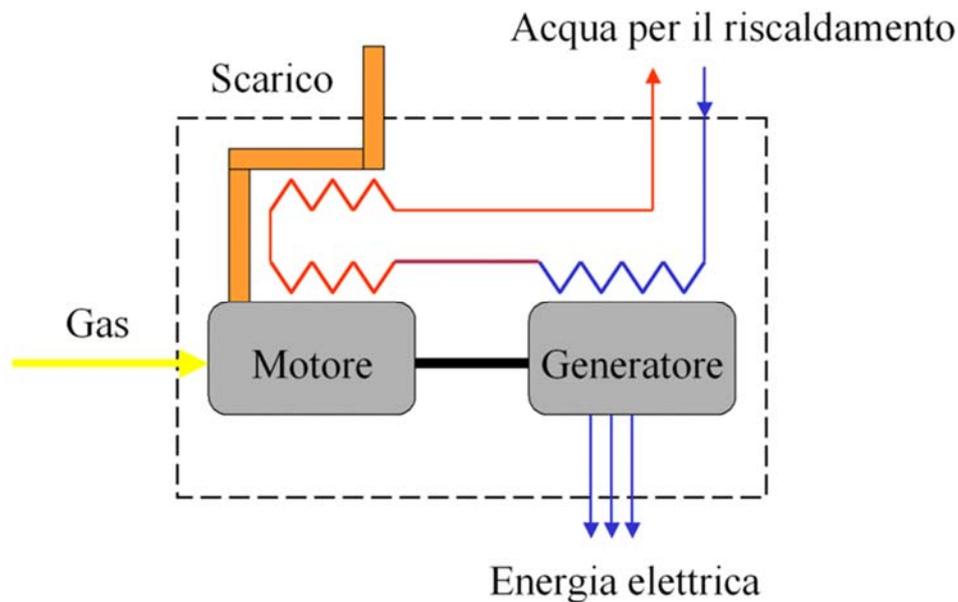


Figura 7. Schema di funzionamento del Totem

#### 4.3 Macchine frigorifere

Una **macchina frigorifera** è un tipo di macchina termica che trasforma un tipo di energia (generalmente energia meccanica) in energia termica al fine di ottenere e mantenere in un sistema una temperatura minore della temperatura dell'ambiente. L'energia meccanica può essere ottenuta a sua volta a partire da energia elettrica (che può essere trasportata e distribuita più facilmente ed efficacemente rispetto alle altre forme di energia), a mezzo di un motore elettrico.

Il trasferimento di calore avviene tramite un fluido refrigerante, che viene sottoposto (in fasi differenti del ciclo termico) a variazioni di pressione, temperatura e cambiamenti di fase (liquida o gassosa).

A seconda del tipo di ciclo frigorifero adottato e dei particolari accorgimenti tecnici impiegati per adattare la macchina alle esigenze dell'utenza, la macchina frigorifera può assumere configurazioni assai diverse.

Il tipo più comune di macchina frigorifera è quella a compressione. Una macchina frigorifera a compressione è composta, nella sua forma più semplice, dalle seguenti parti:

- **Compressore:** è l'elemento che somministra energia al sistema. Nel compressore il fluido refrigerante, sotto forma di gas, aumenta la propria pressione.
- **Condensatore:** il condensatore consiste in uno scambiatore di calore, nel quale il calore assorbito viene dissipato; nel condensatore si assiste al cambiamento di fase del refrigerante, che passa dallo stato gassoso allo stato liquido.
- **Espansore:** la pressione del liquido (e conseguentemente la sua temperatura) viene abbassata drasticamente in prossimità dell'espansore, che può essere costituito da una turbina od una valvola di espansione (o, meglio, valvola di laminazione).
- **Evaporatore:** il refrigerante in condizioni di bassa pressione e temperatura attraversa l'evaporatore, che è anch'esso (come il condensatore) uno scambiatore di calore, che assorbe il calore dall'ambiente. Il refrigerante liquido, attraversando l'evaporatore, assorbe calore dall'esterno e si trasforma in gas.

Nel condensatore e nell'evaporatore il calore viene scambiato sotto forma di calore latente di evaporazione.

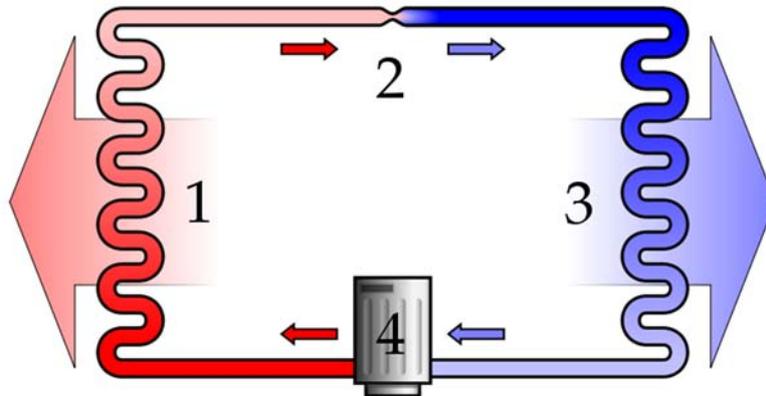


Figura 7. Schema di una macchina frigorifera

Efficienza frigorifera **K** (uso a macchina refrigerante):  $|Q_2| / |L|$

Coefficiente di prestazione **COP** (uso a macchina riscaldante):  $|Q_1| / |L|$

Calcoliamo K e COP con i dati dell'esempio precedente ( $T_1=373$  K,  $T_2=273$  K)

$$K = |Q_2| / |L| = Q_2 / (Q_1 - Q_2) = T_2 / (T_1 - T_2) = 273 / 100 = 2,73$$

$$COP = |Q_1| / |L| = Q_1 / (Q_1 - Q_2) = T_1 / (T_1 - T_2) = 373 / 100 = 3,73$$

Da cui si conclude che è sempre vero, in generale che: **COP = K + 1**