

Formulario fisica tecnica

Mastrofini Alessandro

Volpato Rebecca

October 2021

Indice

1	Termodinamica	4
1.1	Introduzione	4
1.2	Misure	5
1.3	Frigoriferi ad effetto termoelettrico	5
1.4	Principio zero della termodinamica	5
1.5	Primo principio della termodinamica	5
1.6	Sistemi aperti	6
	Espansore	6
	Compressore	7
	Valvola di laminazione	7
	Tubo di efflusso	8
1.7	Calore	8
1.8	Secondo principio della termodinamica	8
	equivalenza dei principi	9
1.9	Equazioni del secondo principio	10
1.10	Entropia	10
	Energia interna in funzione dell'entropia	10
	Entalpia in funzione dell'entropia	10
	Teorema dell'aumento di Entropia	10
	Sorgenti di produzione entropica	11
	Lavoro meccanico in presenza di sorgenti entropiche (trasformazioni irreversibili)	11
1.11	Ciclo motore o ciclo diretto	11
	Macchina di Carnot	12
1.12	Ciclo inverso	12
	Ciclo frigorifero	13
	Pompa di calore	13
2	Tesine	14
3	Indici	15
	Elenco delle figure	15
	Elenco delle tabelle	16
	Elenco delle equazioni	17
	Indice analitico	18

Novità rispetto al programma:

- Al posto degli esercizi sulla trasmissione del calore verranno raccontate alcune esperienze.
- **Orale:** tre domande di teoria (termodinamica, termofluidodinamica, termocinetica o trasporto di massa)
- **Scritto:** due esercitazioni, una sulle miscele aria-vapore (studio del benessere ambientale, saper regolare ambienti in ambienti clinici), cicli frigoriferi, terza domanda semi teorica (raccontare una delle esercitazioni citate sopra).
- Esercitazioni sulla criochirurgia, sulla termoregolazione del corpo umano, sul trasporto di massa in aorta aneurismatica, sul trasporto di massa nel circolo di Willis e sull'acustica ovvero rumore provocato dalle valvole stenotiche.
- Non ci sono esercizi sulla trasmissione del calore e termofluidodinamica.
- Testo: Problematiche di fisica tecnica in ingegneria medica (9 capitoli, da Texmat). Risultati di lavori fatti da colleghi o in tesi di dottorato o nella tesi magistrale ecc.

1 Termodinamica

1.1 Introduzione

parliamo delle termodinamica classica \rightarrow Ottocentesca

La prima cosa che bisogna fare nella termodinamica classica è definire l'oggetto del nostro studio, cioè l'insieme dei corpi che vogliamo studiare e che chiameremo **sistema termodinamico** (insieme degli oggetti che vogliamo studiare), si decide quale sistema termodinamico si vuole studiare, ad esempio l'aria nella stanza. Nel momento in cui decidiamo il sistema, decidiamo anche il contorno fisico del nostro sistema termodinamico S scelto arbitrariamente; quello che c'è all'interno del nostro sistema è l'oggetto del nostro studio, tutto il resto è l'esterno E , mentre S è all'interno del contorno fisico. **Sistema termodinamico**: oggetto del nostro studio. Vogliamo relazionare il sistema termodinamico, cioè quello che c'è all'interno, con l'esterno e in particolare ci interessa la relazione, ovvero le interazioni tra l'interno e l'esterno, cioè ci interessa quello che succede NEL sistema.

Consideriamo tre tipologie di scambi:

- Scambi di massa (sistemi aperti)
- Scambi di lavoro (attraverso il contorno)
- Scambi di calore (attraverso il contorno)

Individuiamo quindi lo stato termodinamico del sistema univocamente con:

- M , composizione chimica
- p, v, T , variabili interne
- w, z , variabili esterne (velocità e quota)

Sono ipotesi lontane dalla realtà poiché la termodinamica classica studia solo stati di equilibrio.

Definizione fisica del **lavoro**: si parte dal sistema cilindro-pistone

$$l_i = \int_1^2 p_i dv \quad (1.1)$$

Lo so definisce a partire dal sistema cilindro-pistone al quale applichiamo una forza F .

Convenzione termodinamica: lavoro positivo se fatto dal sistema verso l'esterno.

Convenzione termodinamica: calore positivo se assorbito dal sistema (convezione opposta al lavoro).

Ricordiamo che siamo in uno stato di equilibrio, ovvero il caso limite.

Nell'esempio del palloncino affinché possa aumentare il volume dovremo essere nelle condizioni in cui il lavoro di dilatazione è trascurabile, $l_i = l_e + l_d$. Questo è possibile quando:

- c'è equilibrio termodinamico interno
- $p_i = p_e$, altrimenti la differenza di pressione dilata il materiale
- Assenza di attriti
- $T_i = T_e$

Queste condizioni non sono mai realizzabili, l'importanza della termodinamica però è che è una scienza che ragiona al limite; lo scopo dell'ingegneria è quello di dire vediamo di ridurre l'importanza di queste differenze di pressione tra interno ed esterno.

Temperatura: a partire dal *termoscopio* scegliamo una funzione che dipende da una delle variabili del sistema $\theta_A = f_0(x)$ e nel sistema internazionale scegliamo una funzione lineare: $f'(x) = ax = T_A$. Quindi si dimostra che la **temperatura empirica** θ_A è uguale alla **temperatura termodinamica** T_A . Fissando il punto triplo dell'acqua $T_T = 273.16\text{K}$ eliminiamo la costante incognita $\rightarrow T = 273.16 \frac{x}{x_T}$. Usando il punto fisso del ghiaccio e il punto fisso del vapore $\rightarrow T_v - T_g = a(x_v - x_g) \Rightarrow \frac{T}{T_v - T_g} = \frac{x}{x_v - x_g}$. Nel S.I.T $(^\circ\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15$

1.2 Misure

Grande intensive \rightarrow minuscole Grandezze intensive \rightarrow maiuscole

Misura della pressione

Il barometro misura la pressione assoluta $p_A = \rho gh$

Manometro differenziale: dislivello \Rightarrow differenza di pressione. Bilancio delle forze: $\rho S + \rho S \Delta z g = p_A S + \rho_m S \Delta z g$

Allora si ottiene che la pressione del fluido in esame rispetto la pressione atmosferica è $p - p_A = \rho_m \Delta z g$

1.3 Frigoriferi ad effetto termoelettrico

Permettono di misurare la temperatura.

Effetto Seebeck. Presi due metalli saldati alle estremità. Mettendo le due saldature a T diverse misuriamo una forza elettromotrice $\Delta E = f(T_A - T_B) = \alpha_{AB}(T_A - T_B)$ dove il coefficiente di Seebeck dipende dai materiali ed è definito come $\alpha_{AB} := \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta E}{\Delta T} = \frac{dE}{dT}$. Usato nei dispositivi di misura: termocoppie.

Effetto Peltier. Due metalli dove passa corrente. Alla giunzione si osserva una cessione di calore \dot{Q} proporzionale alla corrente per il coefficiente di Peltier: $\dot{Q} = \pi_{AB} I$. Legato anche al coefficiente di Seebeck: $\pi_{AB} = \alpha_{AB} T$.

Effetto Thompson Corrente in un conduttore metallico \Rightarrow differenza di temperatura. La quantità di calore che viene scambiata con l'esterno è in valore assoluto proporzionale alla corrente, alla differenza di temperatura e ad un coefficiente che è chiamato coefficiente di Thomson.

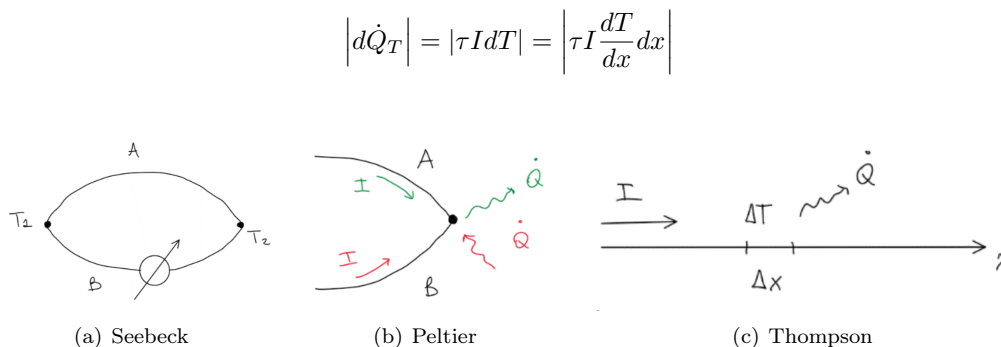


Figura 1: Frigoriferi a effetto termoelettrico

1.4 Principio zero della termodinamica

Principio zero della termodinamica o di Fowler. Presi due corpi A in equilibrio con C tramite una parete conduttrice. E il corpo B in equilibrio con lo stesso C. Allora, essendo entrambi in equilibrio con C, saranno A in equilibrio con B. \Rightarrow Possiamo usare C come termoscopio, per misurare se due corpi sono in equilibrio termico.

calore È l'interazione tra il sistema termodinamico e l'esterno, che avviene a causa di una differenza di temperatura, attraverso il contorno (tanto all'interno c'è equilibrio e non mi interessa). Questa definizione è generale, c'è anche quella operativa.

1.5 Primo principio della termodinamica

Il primo principio della termodinamica stabilisce che il lavoro scambiato in una trasformazione termodinamica **ciclica** in un sistema **chiuso** è uguale al calore totale scambiato:

$$L = Q \quad (1.2)$$

Ricorda Esperienza di Joule e il fatto che lavoro e calore sono negativi (lavoro assorbito e calore ceduto) $-|L| = -|Q|$

Generalizzando vale l'uguaglianza integrale e quindi $dQ - dL = dE$ nota come **energia totale** e si tratta di una funzione di stato infatti $\oint dE = 0$.

L'energia totale dipende da variabili interne e variabili esterne. $E = E_{interne} + E_{esterne}$ Tra le variabili esterne troviamo:

- velocità del baricentro
- quota del baricentro

Allora $\Delta E_e = \Delta E_c + \Delta E_p$ (energia cinetica e potenziale).

Tra le variabili interne troviamo:

- variabili termodinamiche (pressione, volume specifico, temperatura)
- componenti elettrochimiche (reazioni chimiche, fenomeni elettrici o termoelettrici)

Allora $\Delta E_i = \Delta u + \Delta u_x$ (energia interna termodinamica e energia interna di origine elettrochimica).

Primo principio della termodinamica per un sistema chiuso che compie trasformazioni aperte:

$$Q - L = \Delta u + \Delta E_c + \Delta E_p \quad (1.3)$$

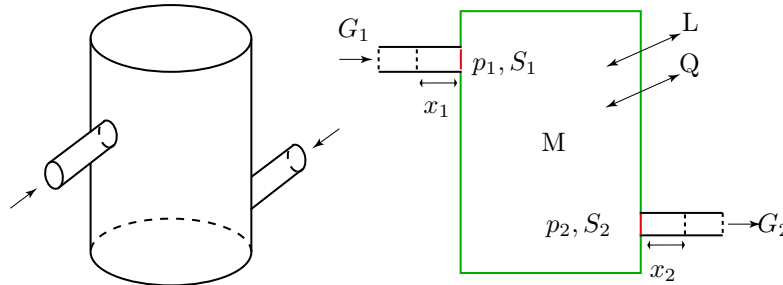
In termini differenziali:

$$dq - dl = du + du_x + \frac{dw^2}{2} + g dz \quad (1.4)$$



1.6 Sistemi aperti

Lavoriamo in ipotesi di regime stazionario, in cui vale il bilancio di massa. $M_t = M_{t+\Delta t}$



bilancio di energia $q - l_f - p_2 v_2 + p_1 v_1 = \Delta u + \frac{\Delta w^2}{2} + g \Delta z$

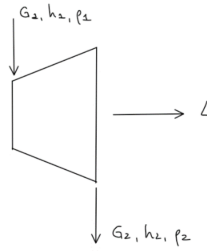
Dall'equazione del bilancio dell'energia entra in gioco una nuova grandezza funzione di stato: **Entalpia**: $h = u + pv$

$$q - l_f = \Delta h + \Delta e_c + \Delta e_p \quad (1.5)$$

Si definisce Entalpia come il calore scambiato in un sistema aperto dove non è presente lavoro e non ci sono variazioni di energia cinetica e di energia potenziale. $dq = dh$

Espansore

È un sistema aperto per produrre lavoro verso l'esterno. Il fluido si espande, diminuisce la pressione → lavoro positivo (vedi (1.16)).



Applichiamo il principio di conservazione della massa in regime stazionario e il principio di conservazione dell'energia (1° principio) nel caso in cui $q = 0$. Allora abbiamo

$$l_f = h_1 - h_2 > 0 \quad (1.6)$$

Il fluido esce con un'entalpia minore.

La potenza meccanica $P = l_f \cdot G_1 = G(h_2 - h_1) > 0$

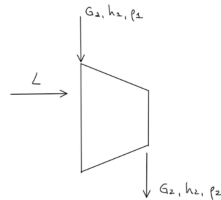
Il rendimento dell'espansore $\rho_e = \frac{l_{reale}}{l_{ideale}} = \frac{h_1 - h_2}{(h_1 - h_2)_s}$, ha come limite superiore 1 (reversibilità). Nel caso ideale ($q = 0$) consideriamo non ci siano cause di irreversibilità allora è una trasformazione adiabatica e reversibile \Rightarrow isoentropica.

Quindi: $\rho_e \leq 1 \begin{cases} = 1 & \text{per le trasformazioni reversibili} \\ < 1 & \text{per le trasformazioni irreversibili reali} \end{cases}$

Compressore

Con le stesse relazioni dell'espansore otteniamo un lavoro negativo (ceduto al sistema)

$$l_f = h_1 - h_2 < 0 \quad (1.7)$$

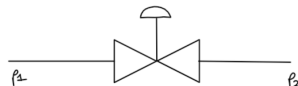


C'è un aumento di entalpia dovuto al fatto che viene fornito lavoro al fluido \Rightarrow aumento di pressione. $p_2 > p_1$.

Analogamente per la potenza e il rendimento del compressore è il reciproco del rendimento dell'espansore. Il limite superiore è sempre 1 e valgono le stesse considerazioni dell'espansore.

Valvola di laminazione

Non abbiamo scambi di calore ($q = 0$) e $T_1 = T_2$ e non c'è lavoro in quanto non c'è nessun organo meccanico che scambia lavoro.



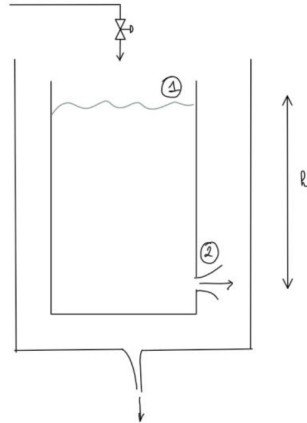
Allora dall'equazione del primo principio otteniamo

$$\Delta h = 0 \Rightarrow h_1 = h_2 \quad (1.8)$$

È una tipica trasformazione irreversibile poiché c'è un salto finito di pressione, cioè NON si parla di una trasformazione isoentalpica ma solo dell'uguglianza $h_1 = h_2$.

Tubo di efflusso

Riguarda la conversione dell'entalpia di un fluido in energia cinetica.



Esperienza di Torricelli $\frac{w^2}{2g} = h \rightarrow w = \sqrt{2gh}$.

Applicando il 1° principio (trascurando calore e lavoro) otteniamo $w_2^2 = 2g(z_1 - z_2) = 2gh$ da cui si torna al teorema di Torricelli.

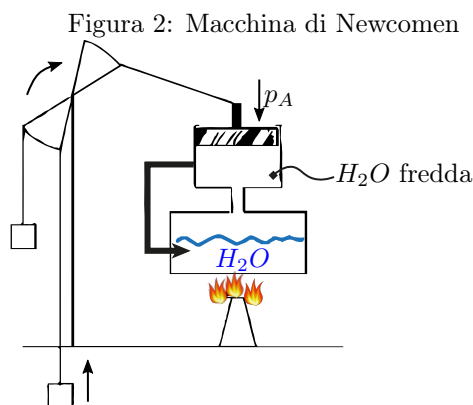
1.7 Calore

Definizione operativa: il calore si misura come il lavoro scambiato da un sistema in un'esperienza di Joule. Ovvero un sistema chiuso che compie una trasformazione ciclica.

1.8 Secondo principio della termodinamica

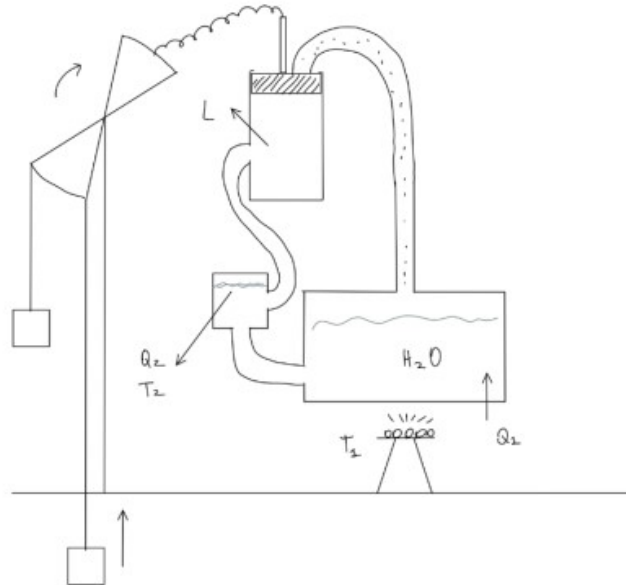
Formulazione di Plank: E' impossibile che l'unico risultato di una cessione di calore ad un sistema chiuso che compie trasformazioni cicliche sia la produzione di calore.

Formulazione di Clausius: E' impossibile che per un sistema chiuso che compie trasformazioni cicliche l'unico risultato sia la sottrazione di calore da una sorgente inferiore e la cessione di calore ad una sorgente superiore senza alcun effetto compensatorio.



Definiamo il rendimento come il rapporto tra ciò che si ottiene e ciò che si spende. Questo meccanismo venne migliorato dalla macchina di Watt;

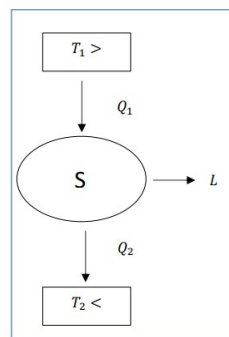
Figura 3: Macchina di Watt



Distinguiamo il calore Q_1 che è il calore ceduto dal braciere al sistema termodinamico, il lavoro L come il lavoro positivo esercitato dal sistema verso l'esterno e il calore Q_2 come il calore sottratto al sistema per ricondensare il vapore.

Per un sistema termodinamico chiuso che produce lavoro positivo grazie a scambi di calore il limite superiore del rendimento è il rendimento formulato da Carnot: $\eta_{max} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$

Figura 4: Macchina motrice termica



Carnot fece una similitudine tra il mulino d'acqua e la macchina di Watt;

- il lavoro L è lo stesso che produce in entrambi i casi una rotazione
- la quota coincide con la temperatura
- la portata coincide con il calore

il parallelismo errato era quello tra il calore e la portata perchè portava a scrivere $l = Q_1 - Q_2 = 0$
Ma sappiamo che per produrre lavoro positivo la macchina di Watt deve avere $Q_1 > Q_2$

Nei sistemi chiusi non si può invertire il segno del calore e del lavoro \rightarrow fenomeni sono **irreversibili**

equivalenza dei principi

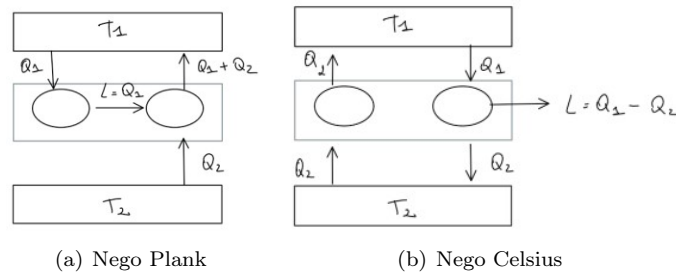


Figura 5: Uguaglianza delle formulazioni Planck, Clausius

1.9 Equazioni del secondo principio

$$\oint \frac{dQ}{T} \leq 0 \quad (1.9)$$

Questa viene chiamata **Disuguaglianza di Clausius**; dove T è la temperatura alla quale si scambia calore dQ . La disuguaglianza è:

- $= 0$ per trasformazioni reversibili
- < 0 per trasformazioni irreversibili

La disuguaglianza di Clausius cambiata di segno è la **Traccia termodinamica**

ciclo diretto $\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} \leq 0 \rightarrow \frac{Q_{ass}}{T_{ass}} \leq \frac{Q_{ced}}{T_{ced}}$

ciclo inverso $-\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} \leq 0 \rightarrow \frac{Q_{ass}}{T_{ass}} \leq \frac{Q_{ced}}{T_{ced}}$

Consideriamo la macchina negata della formulazione di Plank e verifichiamo che la disuguaglianza di Clausius sia negata; poichè il calore assorbito è positivo la disuguaglianza di Clausius risulta negata.

1.10 Entropia

per una trasformazione reversibile $\oint \frac{dQ}{T} = 0$ allora la grandezza $\frac{dQ}{T} = ds$: **Entropia**

se la trasformazione è irreversibile $\oint \frac{dQ}{T} < 0$ e quindi possiamo scrivere: $\frac{dQ}{T} = ds - ds_s$

definizione operativa di entropia $\Delta s = s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dq}{T}$

Essendo una funzione di stato è uguale se calcolata lungo trasformazioni reversibili e irreversibili.

Energia interna in funzione dell'entropia

$dq - dl = du + de_c + de_p$ $du = dq - dl - de_c - de_p$ sappiamo che $dq = Tds$ e $dl = pdv$

$$du = Tds - pdv \quad (1.10)$$

Entalpia in funzione dell'entropia

abbiamo definito $h = u + pv$, il differenziale è: $dh = du + pdv + vdp$ dove $du = Tds - pdv$ quindi:

$$dh = Tds + vdp \quad (1.11)$$

Teorema dell'aumento di Entropia

sistema termodinamico isolato con l'esterno, $dq = 0$, allora $ds = ds_s$, quindi quando abbiamo trasformazioni irreversibili il ds_s va ad aumentare l'entropia. $ds_s \rightarrow$ termine di produzione entropica

Sorgenti di produzione entropica

- sorgenti entropiche di prima specie: cause di irreversibilità di prima specie quali differenza di pressione, di temperatura e attriti.
- sorgenti entropiche di seconda specie: irreversibilità di prima specie dovute a fenomeni elettrochimici

$$ds_s = ds_{sI}(\Delta p, \Delta T, attriti) + ds_{sII}(x_i, l_{el}) \quad (1.12)$$

$$dS = dQ \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) = dS_{sI}(\Delta T) > 0$$

$$ds_{sI}(\Delta p) = -\frac{vdp}{T}$$

Per le cause di irreversibilità di seconda specie, consideriamo la variazione di energia interna elettrochimica $du_x = \left(\frac{\partial e_i}{\partial x} \right) dx = X dx$ cioè $du_x = -dl_{el} - Tds_{sII}$. La x rappresenta il grado di avanzamento della reazione chimica e dx la sua variazione.

Dissipata sotto forma di lavoro elettrico (il '·' per analogia con il 1° principio) o di irreversibilità (Tds_{sII}), il '·' in analogia al calore, noto come calore dissipato non utilizzato a causa delle irreversibilità).

Quindi la sorgente entropica di seconda specie è:

$$ds_{sII} = \frac{1}{T} (-du_x - dl_{el}) = -\frac{dl_{el}}{T} - \frac{X dx}{T} \text{ (sist. chiusi)} \quad (1.13)$$

Ragionando per i sist. aperti consideriamo la variazione di entalpia: $dh_t = dh + dh_x$ con un contributo termodinamico e uno della reazione elettrochimica. $\Rightarrow dh_x = \left(\frac{\partial h_t}{\partial x} \right) dx = X' dx$. Quindi consideriamo che la variazione può dar luogo a lavoro elettrochimico o sorgente entropica di seconda specie $dh_x = -dl_{el} - Tds_{sII}$.

In conclusione, la sorgente entropica di seconda specie:

$$ds_{sII} = -\frac{dl_{el}}{T} - \frac{x' dx}{T} \text{ (sist. aperti)} \quad (1.14)$$

Lavoro meccanico in presenza di sorgenti entropiche (trasformazioni irreversibili)

Sistemi chiusi Inseriamo le sorgenti entropiche nel 1° principio della termodinamica aggiungendo al lavoro il termine elettrico $dl_t = dl_m + dl_{el}$. Quindi dal 1° principio abbiamo che $du_t = dq - dl_t$ ma $du_t = du + du_x$ e per $dq = Tds - Tds_s$. Allora, sfruttando l'equazione $du_x = -dl_{el} - Tds_{sII}$ e (1.10) otteniamo:

$$dl_m = pdv - Tds_{sI} \quad (1.15)$$

Il lavoro meccanico è diminuito a causa delle irreversibilità di prima specie.

Sistemi aperti Partendo dal primo principio consideriamo il lavoro con anche i fenomeni elettrici. Abbiamo $dh_t = dq - dl_t$ e $dh_t = dh + dh_x$ e che $dq = Tds - Tds_s$. Sostituendo e ricordando che (1.11) e che $dh_x = -dl_{el} - Tds_{sII}$ otteniamo:

$$dl_m = -vdp - Tds_{sI} \quad (1.16)$$

Il lavoro meccanico reale è diminuito a causa delle irreversibilità di prima specie.

In caso di sistema aperto con trasformazione reversibile per ottenere lavoro positivo il fluido si deve espandere e quindi la pressione deve diminuire $dp > 0$.

1.11 Ciclo motore o ciclo diretto

Si intende un ciclo che produce lavoro positivo verso l'esterno. La rappresentazione schematica è il ciclo di Watt.

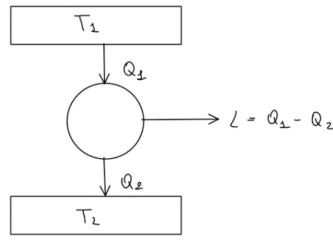


Figura 6: Ciclo motore

Otteniamo lavoro $L = Q_1 - Q_2$.

Mettendo in relazione la traccia termodinamica (inverso della disuguaglianza di Clausius) ed il rendimento $\eta = \frac{L}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$ otteniamo il rendimento del ciclo motore irreversibile

$$\eta = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) - \frac{\tau T_2}{Q_1} \quad (1.17)$$

Il primo termine corrisponde al rendimento massimo, ovvero quello di una macchina di Carnot (trasformazione reversibile, $\tau = 0$).

Macchina di Carnot

È reversibile ($p_1 = p_2, T_1 = T_2$, no attriti).

Iso terme tra 1-2 e 3-4 (calore è l'area sottesa).

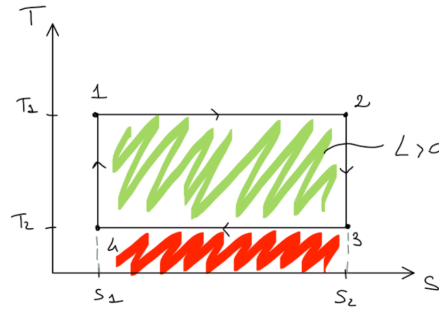


Figura 7: Ciclo motore

Quindi abbiamo $ds = \frac{dq}{T} + ds_S \Rightarrow ds = 0$ allora tra 2-3 e 4-1 sono **isoentropiche** (:=adiabatica reversibile).

È un ciclo motore particolare, infatti vale che il rendimento $\eta = \eta_c - f(\tau)$ N.B. Il rendimento di un ciclo termomeccanico massimo **non** è 1 ma $\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1}$

1.12 Ciclo inverso

- ciclo frigorifero, se lo scopo è sottrarre Q_2 alla sorgente inferiore
- pompa di calore, se lo scopo è cedere Q_1 alla sorgente superiore

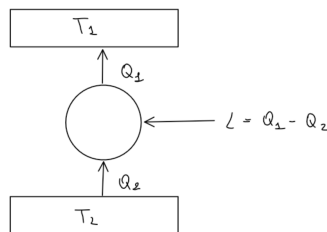


Figura 8: Ciclo inverso

Ciclo frigorifero

Il rendimento del ciclo frigorifero $\eta_F = \frac{Q_2}{L} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} - \frac{\tau}{L} \cdot \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2}$.

Il secondo termine contiene le irreversibilità. Il diagramma nel piano Ts è un rettangolo.

Pompa di calore

Il rendimento della pompa di calore $\eta_{PC} = \frac{Q_1}{L} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} - \frac{\tau}{L} \cdot \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2}$.

Il secondo termine contiene le irreversibilità, se la trasformazione è reversibile $\tau = 0$. Il diagramma Ts è lo stesso rettangolo del ciclo frigorifero.

2 Tesine

3 Indici

Elenco delle figure

1	Macchina di Newcomen	8
2	Macchina di Watt	9
3	Macchina motrice termica	9
4	Ciclo motore	12
5	Ciclo motore	12
6	Ciclo inverso	12

Elenco delle tabelle

Elenco delle equazioni

1.1	Lavoro	4
1.2	Primo principio della termodinamica	5
1.3	Primo principio	6
1.4	Primo principio in termini differenziali	6
1.5	Primo principio per sistemi aperti	6
1.6	Lavoro dell'espansore	7
1.7	Lavoro del compressore	7
1.8	Valvola di laminazione	7
1.9	Disuguaglianza di Clausius	10
1.10	Energia interna in funzione dell'entropia	10
1.11	Entalpia in funzione dell'entropia	10
1.12	Sorgenti entropichei	11
1.13	Sorgenti entropiche di seconda specie per i sistemi chiusi	11
1.14	Sorgenti entropiche di seconda specie per i sistemi aperti	11
1.15	Lavoro per sistemi aperti	11
1.16	Lavoro per sistemi chiusi	11

Indice analitico

- Calore, 7
- Ciclo inverso, 11
 - frigorifero, 12
 - pompa di calore, 12
- Ciclo motore, 10
 - macchina di Carnot, 11
- Entropia, 9
 - sorgenti entropiche, 10
 - teorema dell'aumento di entropia, 9
- Lavoro, 4
- Primo principio, 4
 - trasf aperte in un sistema chiuso, 5
- Secondo principio, 7
 - equazioni, 9
 - equivalenza, 8
- Termodinamica, 4