INDICE della lezione del 21/03/2014:

Lavoro di Espansione o Compressione

Quando il lavoro è di espansione, allora questo è positivo. Al contrario, invece, il lavoro di compressione è negativo.

Nel caso del lavoro di espansione fatto dal sistema contro una forza F per spostare un oggetto di una distanza Δx è definito dalla relazione $L = F \cdot \Delta x$. Come esempio di sistema viene considerato un gas contenuto in un cilindro. Se una parete del cilindro è un pistone di area A, di massa trascurabile e senza attrito, la pressione esterna p_{est} esercita sul gas una forza $F = p_{est} A$. Il lavoro fatto dal gas contro questa forza per spostare il pistone di Δx è dunque $F \cdot \Delta x = p_{est} \cdot A \cdot \Delta x = p_{est} \cdot \Delta V$.   (1)

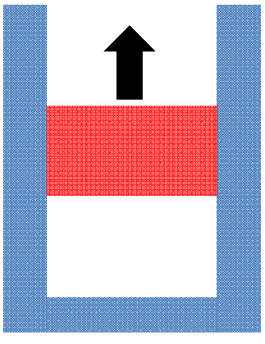


Fig. 1 – Lavoro di Espansione

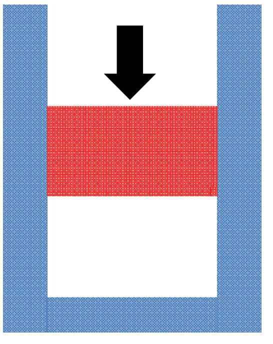


Fig. 2 – Lavoro di Compressione

$L = F \cdot \Delta x$ (2)
$F = p \cdot A$ (3)
A = area del pistone (costante)
Δx = corsa del pistone
F = aumenta all'aumentare della pressione
La pressione cresce in funzione dello schiacciamento del pistone

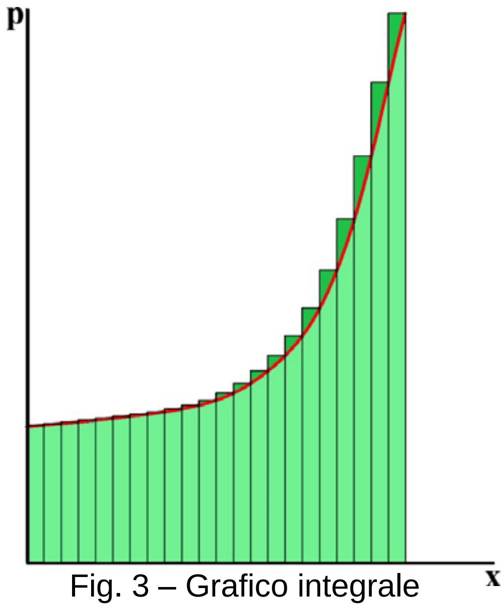


Fig. 3 – Grafico integrale

Calcolo con il metodo INTEGRALE: approssimo la curva con una scalinata sommatoria di tanti prodotti

$$L = F_1 \cdot dx_1 + F_2 \cdot dx_2 + [...] + F_n \cdot dx_n \qquad (4)$$

Ipotesi di campionamento uniforme: nell'integrale assumo che

$$dx_1 = dx_2 = dx_3 = [...] = dx_n \qquad (5)$$

e $dx_n \rightarrow 0$

$$L = \int_0^{x_{fin}} p \cdot dx = \int_0^{x_{fin}} p \cdot dx_2 = \int_0^{x_{fin}} p \cdot dV \qquad (6)$$

Il prodotto $A \cdot dx$ è il volume di una frazione infinitesima.

Equazione di bilancio di energia in termini infinitesimi:

$$dE = dQ - dL = dQ - p \cdot dV \qquad (7)$$

Corrisponde alla forma differenziale del I principio della termodinamica

dE = infinitesimo incremento di energia ricevuto dal sistema, che corrisponde a un infinitesimo apporto di calore dall'esterno + un'infinitesima erogazione di lavoro del sistema.

Equazione integrale del I principio della termodinamica:

$$E_2 - E_1 = Q - L \qquad (8)$$

<u>Energia Interna [U] – Entalpia [H]</u>

Sono forme di energia legate dall'equazione

$$H = U + p \cdot V \tag{9}$$

e si misurano entrambe in <u>Joule</u>.

L'**energia interna** corrisponde all'energia all'interno di un sistema chiuso. Il primo Principio della termodinamica è quindi espresso come

$$U_2 - U_1 = Q - L\,. \tag{10}$$

E' una funzione di stato che esprime l'energia totale posseduta da un sistema chiuso. È utile soprattutto quando si parla di trasformazioni a volume costante di un sistema chiuso.

Anche l'**entalpia** è una funzione di stato. A causa del fatto che non è possibile conoscere il valore assoluto dell'energia interna o dell'entalpia di un sistema o di una sostanza, durante una determinata trasformazione termodinamica si può misurare solo la variazione di entalpia e non il suo valore assoluto. È utile soprattutto quando si parla di trasformazioni a pressione costante di un sistema chiuso, oppure, come si vedrà in seguito, di sistemi aperti.

Supponendo che il fluido sia composto da aria e che il pistone sia in una condizione di equilibrio con l'ambiente esterno, in questo caso la pressione interna sarà uguale alla pressione esterna e viene ipotizzata come p = 1 bar. Il sistema viene riscaldato, fornendo calore. In questo modo il gas si espande, andando così a spingere sul pistone che si solleva modificando il volume iniziale, il quale aumenterà.

La pressione all'interno del sistema rimane invariata.

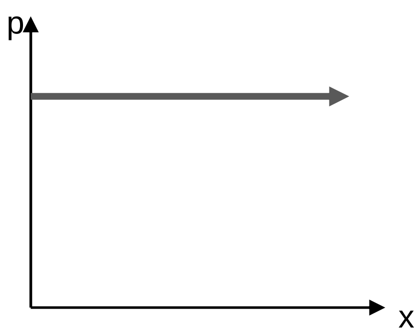


Fig. 4 – Grafico a pressione costante

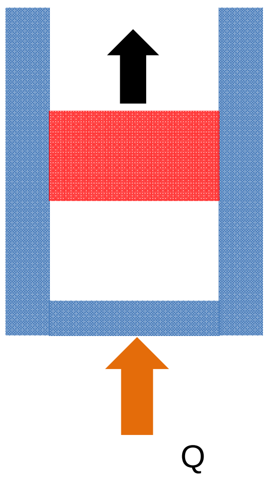


Fig. 5 – Sistema sottoposto a calore

$$L = F \cdot x = p \cdot A \cdot x = p \cdot (V_2 - V_1) \qquad (11)$$

$$dU = dQ \boxed{- p \cdot dV - V \cdot dp} + V \cdot dp \qquad (12)$$

Differenziale del prodotto $d(xy) = y \cdot dx + x \cdot dy$ (13)

$$dU = dQ - d(p \cdot V) = dQ + V \cdot dp \qquad (14)$$

$$d(U + p \cdot V) = dQ + V \cdot dp \qquad (15)$$

Forma <u>entalpica</u> del primo principio della termodinamica

$$dH = dQ + V \cdot dp \qquad (16)$$

$$H_2 - H_1 = Q + \int_{V_{in}}^{V_{fin}} V \cdot dp \qquad (17)$$

Esempi:
Pallone aerostatico: il calore fa aumentare il gas
la pressione rimane costante
non c'è lavoro $V \cdot dp = 0$ (18)

Abitazioni: non sono a tenuta stagna
Riscaldando una stanza aumenta il volume dell'aria, quella in eccesso sfiata dai buchi, lasciando così la pressione costante

Sistema a <u>volume costante</u>: la pressione aumenta

$$U_2 - U_1 = Q \qquad (19)$$

$$M \cdot c_v \cdot (T_2 - T_1) = Q \qquad (20)$$

Sistema a <u>pressione costante</u>: usiamo la forma entalpica

$$H_2 - H_1 = Q \qquad (21)$$

$$M \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1) = Q \qquad (22)$$

Il gas ha due capacità termiche specifiche:
c_p = a pressione costante (serve per l'entalpia)
c_v = a volume costante (serve per l'energia interna)

$c_{p_{ARIA}}$ = 1000 J/kg·K
$c_{v_{ARIA}}$ = 717 J/kg·K

Valutazione del costo energetico per il riscaldamento

Come fare a fornire all'edificio la potenza necessaria al suo riscaldamento invernale. Supponendo che si vogliano mantenere 20 °C all'interno dell'edificio, questo disperde una Potenza $\dot{Q}d$ (watt), la quale deve essere costantemente fornita. Il calore fornito è pari a $Q_1 = 10000\ W$

Si noti che sono le dispersioni a generare il consumo.

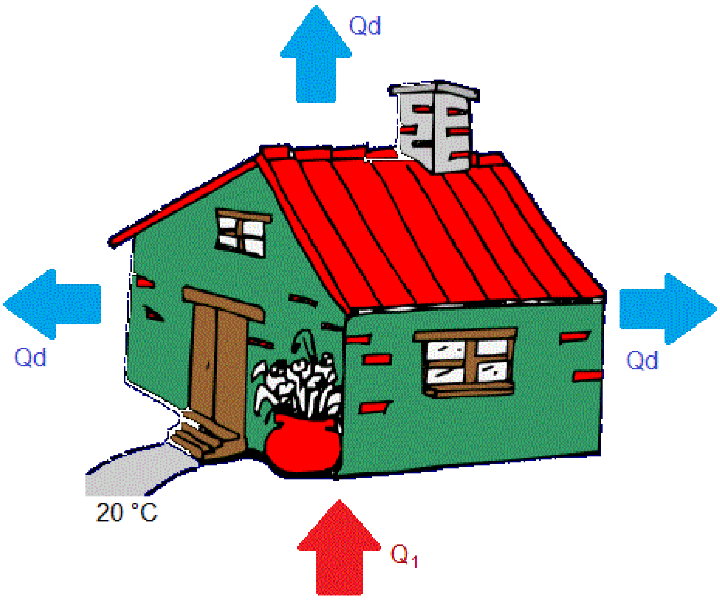
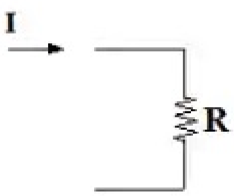


Fig. 6 – Dispersione di Potenza Termica

Esistono due sistemi di riscaldamento alimentati ad energia elettrica, certamente più sicuri rispetto ai sistemi a gas:

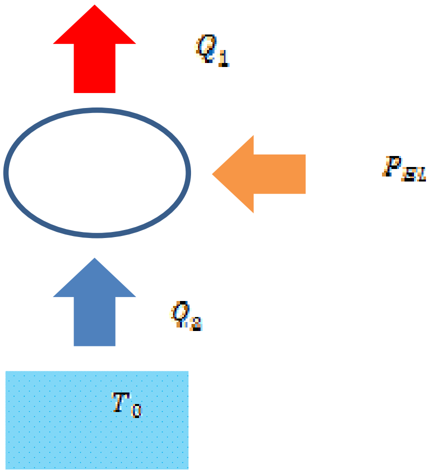
- <u>Resistenza elettrica</u>



$$P = R \cdot I^2 \qquad (23)$$

Il Rendimento è pressoché unitario, quindi la potenza elettrica consumata P è uguale alla quantità di calore richiesta dall'edificio, Q_1

- <u>Pompa di calore</u>



È più vantaggiosa dal punto di vista dei consumi, ma il costo di acquisto della macchina è maggiore rispetto alla resistenza elettrica. Fornendole una potenza elettrica ed essendo la PdC una macchina ciclica, questa assorbe dall'ambiente a temperatura T_0 = -5 °C una quantità di calore Q_2 ed eroga verso la casa una quantità di calore

$$Q_1 = P_{EL} + Q_2 \qquad (24)$$

il primo principio continua a valere…

Coefficiente economico:

$$\varepsilon = \frac{P_{EL}}{Q_1} \qquad (25)$$

$$\varepsilon = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_0}{T_1} \qquad (26)$$

L'ultima uguaglia ipotizza che la macchina operi reversibilmente, e dunque abbia lo stesso coeff. economico di una macchina di Carnot.

$$\varepsilon = 1 - \frac{268}{293} = 0{,}085324 \qquad (27)$$

$$P_{EL} = Q_1 \cdot \varepsilon = 853{,}24W \qquad (28)$$

Questo caso risulta però ipotetico, poiché se non c'è salto di temperatura, non c'è trasferimento di calore. Sarebbe necessario avere una differenza di temperatura maggiore, ad esempio $T_0 = -15\ °C$, $T_1 = 50\ °C$.

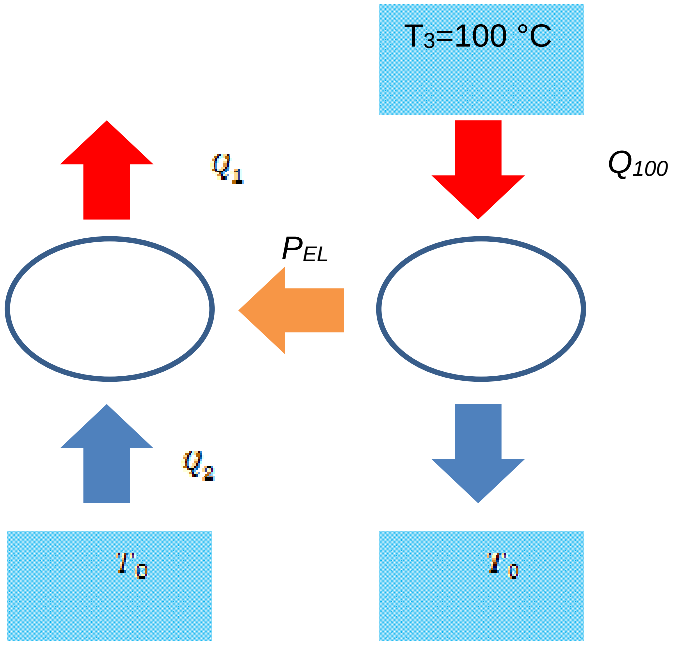
Con tali valori più realistici si ha:

$$\varepsilon = 1 - \frac{258}{323} = 0{,}201238 \qquad (27)$$

$$P_{EL} = Q_1 \cdot \varepsilon = 2012 \quad W \qquad (28)$$

La pompa di calore consuma comunque circa 1/5 dell'energia spesa con l'utilizzo delle stufette (resistenza elettrica)
In Italia la pompa di calore è sicuramente la tecnologia più efficiente.
Non è stato però considerato che è necessaria dell'energia elettrica per far funzionare tali pompe di calore. Questa deve essere prodotta da qualcuno e quindi è fondamentale tener conto la quantità di energia necessaria a produrre la P_{EL} richiesta.

Supponiamo di produrre la suddetta potenza tramite una macchina termica ciclica (ciclo di Carnot) che lavora alle temperature T_3=100°C, T_0=-5°C e con un coeff. economico "di produzione" ε_P:



$$\varepsilon_P = 1 - \frac{T_0}{T_3} = 1 - \frac{268}{373} = 0{,}2815 \qquad (31)$$

Quindi

$$Q_{100} = \frac{P_{EL}}{\varepsilon_c} = \frac{2012}{0{,}2815} = 7147 \quad W \qquad (32)$$

La quantità di calore richiesta è evidentemente maggiore rispetto ai 2010 W precedenti, ma comunque inferiore rispetto a quella richiesta dalla resistenza elettrica e quindi più conveniente.

Sfruttamento intelligente delle risorse

La città di Brescia ha optato per un sistema molto efficiente ed atto ad uno sfruttamento intelligente delle risorse, vietando innanzitutto l'uso dei combustibili fossili (gas, metano) per il riscaldamento delle abitazioni.
Fu costruita una centrale termoelettrica per la produzione di energia elettrica grazie alla quale rifornire tutta la città di acqua calda.

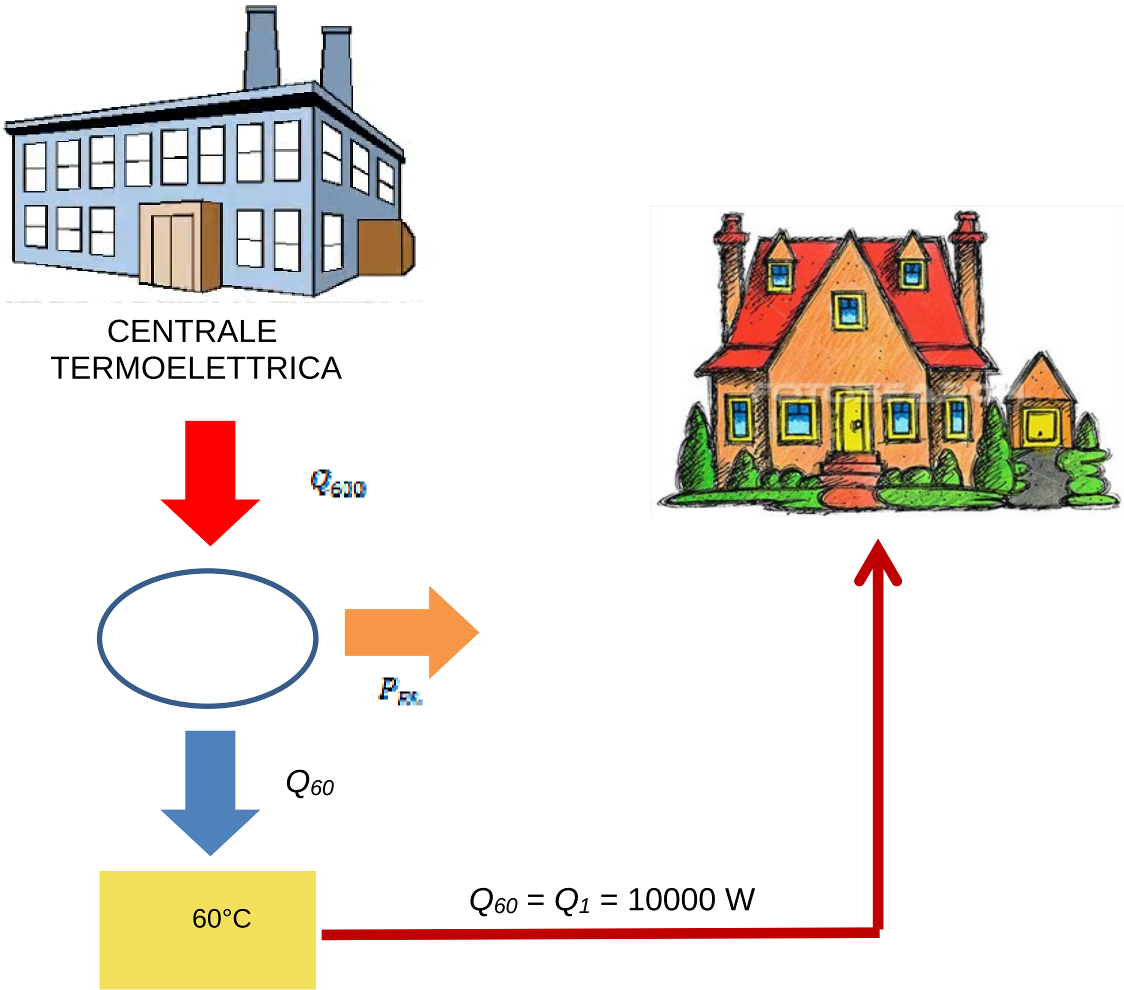


Fig. 7 – Fornitura acqua calda

Il calore che normalmente sarebbe disperso nell'ambiente viene invece usato direttamente per il riscaldamento delle case

$$\varepsilon_c = 1 - \frac{Q_{60}}{Q_{600}} = 1 - \frac{T_{60}}{T_{600}} = 1 - \frac{333}{873} = 0{,}618 \qquad (33)$$

$$\dot{Q}_{600} = P_{EL} + \dot{Q}_{60} \qquad (34)$$

$\dot{Q}_{60} = \dot{Q}_1$ rappresenta la Potenza utile per scaldare l'abitazione

$$\dot{Q}_{600} = \varepsilon_c \cdot \dot{Q}_{600} + \dot{Q}_{60} \qquad (36)$$

$$\dot{Q}_{600} = \frac{\dot{Q}_{60}}{1-\varepsilon_c} = \frac{10000}{1-0{,}618} = 26178 \quad W \qquad (37)$$

Ne risulta che per ottenere 10000 W è necessario bruciarne 26178 W. In questo modo potrebbe sembrare poco efficiente, ma è importante evidenziare che i 10000 W in realtà sono ANERGIA e che, oltre ad essa è stata anche ottenuta una notevole POTENZA ELETTRICA P_{EL}.

$$P_{EL} = \varepsilon_c \cdot \dot{Q}_{600} = 0{,}618 \cdot 26178 = 16178 W \qquad (38)$$

i quali saranno utilizzati per altri scopi e venduti a caro prezzo….

Possiamo concludere che il sistema utilizzato in questo caso è un buon sistema, poiché viene utilizzata tutta l'anergia prodotta, che normalmente sarebbe buttata via, e viene anche convertita in energia elettrica (pregiata e di elevato valore commerciale) la frazione exergetica dell'energia inizialmente disponibile.

Tale energia elettrica può poi venire usata per alimentare pompe di calore elettriche, come quelle viste in precedenza, per riscaldare le abitazioni poste a grande distanza dalla centrale di cogenerazione, ove sarebbe antieconomico portare i tubi dell'acqua calda…

Passando dai dati 2ideali" sopra esposti a quelli del mondo reale, avremo che nel teleriscaldamento va perso circa il 40% dell'anergia prodotta in centrale, causa le dispersioni di calore die lungi tubi che portano l'acqua nelle abitazioni. Quindi, mantenendo invariata la potenza "al focolare" della macchina termica installata in centrale, e pari a 26178 W, avremo che la "resa termica" effettivamente utile per le abitazioni sarà pari a 6000 W, anziché 10.000.

Inoltre, usando l'energia elettrica prodotta, pari a 16178 W, per alimentare pompe di calore che hanno un COP pari a 4 (anziché a 5, come ipotizzato in precedenza), otterremo un ulteriore apporto di calore per le abitazioni pari a 64712 W.

In conclusione, bruciando metano che fornisce una potenza "al focolare" di 26178 W, ne abbiamo ottenuti "alle abitazioni" circa 70.000, cioè circa 3 volte tanto!

Se tutte le città italiane utilizzassero il sistema in uso a Brescia, il fabbisogno di combustibile per il riscaldamento invernale, in Italia, potrebbe praticamente dimezzare, al limite arrivare a ridursi ad 1/3 di quello attuale. E lo stesso accadrebbe, ovviamente, per l'inquinamento dell'aria…