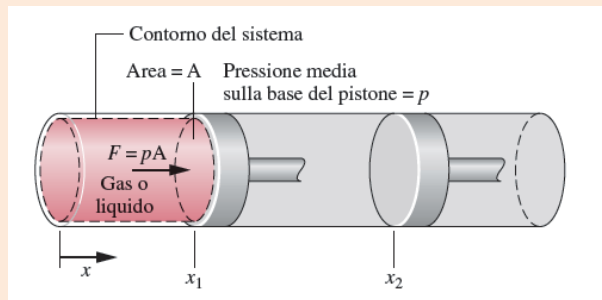


CONTROLLO TERMICO DEI SISTEMI DI CALCOLO – A.A. 2011/2012

U.02 – *Primo principio*



1/36

CONTROLLO TERMICO DEI SISTEMI DI CALCOLO – A.A. 2011/2012

ENERGIA DI UN SISTEMA TERMODINAMICO

U.02 – *Primo principio*

2/36

ENERGIA DI UN SISTEMA

- L'energia esiste sotto diverse forme: termica, meccanica, cinetica, potenziale, elettrica, magnetica, chimica, nucleare. La somma di tutti questi contributi costituisce l' **energia totale**, E del sistema.
- La Termodinamica si occupa solo delle **variazioni** dell'energia totale.
- **Forme macroscopiche di energia**: forme di energia che il sistema possiede come insieme, con riferimento ad una terna esterna di riferimento (esempi: energia cinetica e energia potenziale).
- **Forme microscopiche di energia**: forme correlate alla struttura molecolare della materia costituente il sistema e al grado di attività molecolare.
- **Energia interna**, U : somma di tutte le forme microscopiche di energia.
- **Unità di misura**: joule $1 \text{ J} = 1 \text{ N}\times\text{m} = 1 \text{ kg}\times\text{m}^2\times\text{s}^{-2}$
- **Formula dimensionale**: $[E] = [\text{ML}^2\text{t}^{-2}]$

ENERGIA DI UN SISTEMA

Energia cinetica E_c :

energia posseduta da un corpo di massa m che si muove alla velocità W :

$$E_c = \frac{1}{2} m W^2$$

Variazione di energia cinetica ΔE_c :

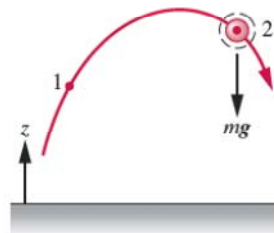
$$\Delta E_c = \frac{1}{2} m (W_2^2 - W_1^2)$$

ENERGIA DI UN SISTEMA

Energia potenziale E_p :

Energia posseduta da un corpo di massa m che si trova alla quota z ed è soggetto ad un campo gravitazionale di intensità g :

$$E_p = mgz$$



Variazione di energia potenziale ΔE_p :

$$\Delta E_p = mg(z_2 - z_1)$$

ENERGIA DI UN SISTEMA

Energia interna



FIGURA 3.5
 Varie forme di energia delle molecole che danno luogo all'energia interna sensibile.

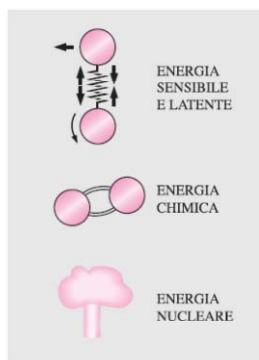


FIGURA 3.6
 L'energia interna di un sistema termodinamico è la somma di tutte le forme microscopiche di energia.

Energia sensibile: frazione dell'energia interna del sistema associata all'energia cinetica delle molecole

Energia latente: energia associata alle fasi costituenti il sistema

Energia chimica: energia associata ai legami atomici entro la molecola

Energia nucleare: energia associata ai legami forti all'interno del nucleo atomico

ENERGIA DI UN SISTEMA

Energia meccanica (E) =

energia cinetica (E_c) + energia potenziale (E_p) + energia interna (U)

$$E = E_c + E_p + U = \frac{mW^2}{2} + mgz + U \quad [J]$$

Valore totale $\Rightarrow E$ / Variazione $\Rightarrow \Delta E$

Valore specifico (cioè riferito all'unità di massa):

$$\frac{E}{m} = \frac{E_c}{m} + \frac{E_p}{m} + \frac{U}{m} \quad [J/kg]$$

$$e = e_c + e_p + u = \frac{W^2}{2} + gz + u \quad [J/kg]$$

Calore: quantità di energia termica scambiata fra un sistema e l'ambiente

Lavoro: quantità di energia meccanica scambiata fra un sistema e l'ambiente

LAVORO

Lavoro di una forza

Prodotto scalare della forza F per lo spostamento ds lungo la traiettoria

Lavoro elementare

$$\delta L = F ds$$

Lavoro integrale

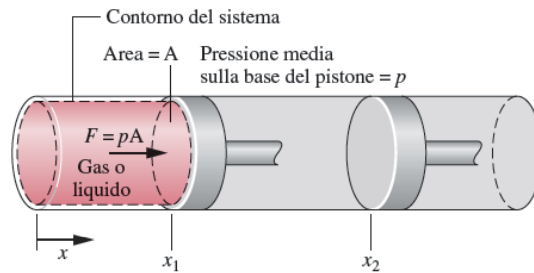
$$L = \int_1^2 \delta L = \int_1^2 F ds$$

Il valore del lavoro dipende sia dagli estremi del percorso che dal percorso stesso. Quindi il differenziale di L non è differenziale esatto.

- Sono positive le quantità di lavoro fornite dal sistema
 $L > 0$ lavoro compiuto dal sistema sull'ambiente
- Sono negative le quantità di lavoro ricevute dal sistema
 $L < 0$ lavoro compiuto dall'ambiente sul sistema

LAVORO

Lavoro eseguito da un sistema fluido alla pressione p mediante una variazione del volume ΔV del sistema



$$\delta L = pA dx = p dV$$

$$L = \int_1^2 \delta L = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

POTENZA MECCANICA

Potenza

Quantità di lavoro scambiata nell'unità di tempo:

$$\dot{L} = \frac{\delta L}{dt} \text{ (W)}$$

- **Unità di misura:** watt $1 \text{ W} = 1 \text{ J} \times \text{s}^{-1} = 1 \text{ kg} \times \text{m}^2 \times \text{s}^{-3}$
- **Formula dimensionale** $[\dot{L}] = [\text{ML}^2\text{t}^{-3}]$

Relazione Potenza meccanica/Lavoro

$$L = \int_{t_1}^{t_2} \dot{L} dt$$

CALORE

Interazione tipo Calore

L'energia è identificata come calore solo nel corso del passaggio (interazione) di energia attraverso il contorno del sistema

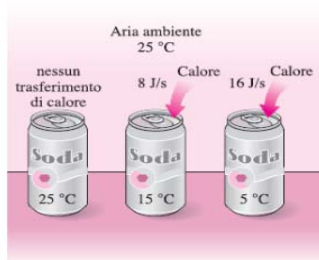


FIGURA 3.12
La differenza di temperatura è la «forza motrice» per il trasferimento di energia sotto forma di calore. Maggiore è la differenza di temperatura, maggiore è la quantità di calore trasferita nell'unità di tempo: potenza termica.

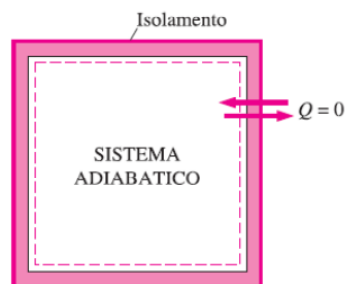


FIGURA 3.14
Durante una trasformazione adiabatica, un sistema non scambia calore con l'ambiente.

CALORE

Convenzione sul segno

- Sono positive le quantità di calore ricevute dal sistema
 $Q > 0$ calore ricevuto dal sistema
- Sono negative le quantità di calore cedute dal sistema
 $Q < 0$ calore ceduto dal sistema

Calore scambiato per unità di massa

$$q = \frac{Q}{m} \quad (\text{J/kg})$$

Differenziale del calore

La quantità di calore scambiata lungo un processo dipende sia dagli estremi del percorso che dal percorso stesso. Quindi il differenziale di Q non è differenziale esatto.

$$\int_1^2 \delta Q = Q$$

POTENZA TERMICA**Potenza**

Quantità di calore scambiata nell'unità di tempo:

$$\dot{Q} = \frac{\delta Q}{dt} \quad (\text{W})$$

- **Unità di misura:** watt $1 \text{ W} = 1 \text{ J} \times \text{s}^{-1} = 1 \text{ kg} \times \text{m}^2 \times \text{s}^{-3}$
- **Formula dimensionale** $[\dot{Q}] = [\text{ML}^2\text{t}^{-3}]$

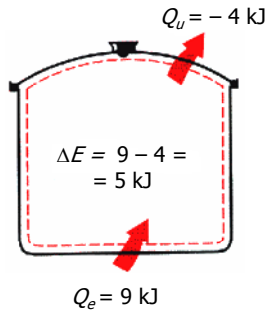
Relazione Potenza termica/Calore

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \dot{Q} dt$$

**PRIMO PRINCIPIO
PER I SISTEMI CHIUSI**

PRIMO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA

L'energia non può essere né creata né distrutta, ma solo cambiare forma



In assenza di lavoro scambiato, la quantità netta di calore scambiato con l'ambiente (calore entrante meno calore uscente)

$$Q = Q_e + Q_u$$

eguaglia la variazione dell'energia totale del sistema

$$Q = \Delta E$$

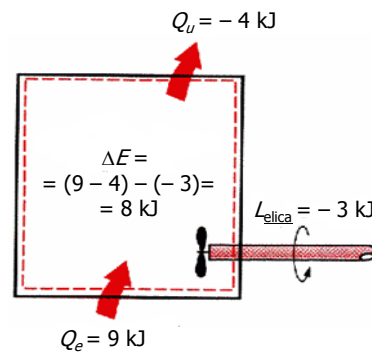
(N.B. nelle convenzioni termodinamiche il calore è positivo se assorbito dal sistema, negativo se erogato dal sistema)

PRIMO PRINCIPIO PER I SISTEMI CHIUSI (SC)

In un sistema chiuso: la quantità netta di energia termica e meccanica scambiate al contorno del sistema eguaglia la variazione dell'energia totale del sistema

$$Q - L = \Delta E$$

$$\Delta E = \Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U$$



(N.B. nelle convenzioni termodinamiche il lavoro è positivo se erogato dal sistema, negativo se assorbito dal sistema)

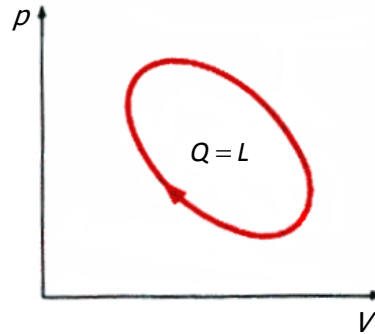
PRIMO PRINCIPIO PER I SISTEMI CHIUSI STAZIONARI

Per un sistema **chiuso stazionario** ($\Delta E_c = 0, \Delta E_p = 0$):

$$Q - L = \Delta U$$

Per un sistema chiuso stazionario e per **trasformazioni cicliche** ($\Delta U = 0$):

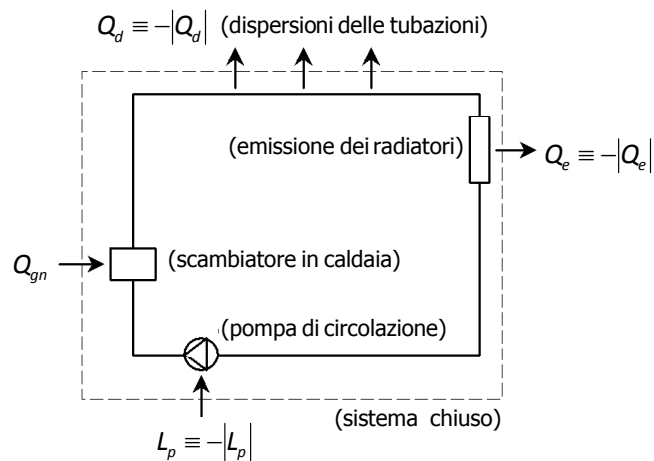
$$Q = L$$



Primo principio su base istantanea (bilancio di potenze):

$$\dot{Q} - \dot{L} = \frac{dE}{dt} \quad [\text{W}]$$

ESEMPIO (SC): CIRCUITO TERMOIDRAULICO



$$Q - L = (Q_{gn} + Q_e + Q_d) - L_p \equiv Q_{gn} - |Q_e| - |Q_d| + |L_p| = \Delta U$$

**CALORE
SPECIFICO****ENTALPIA**

Entalpia (totale e specifica): è particolarmente rilevante nello studio dei sistemi aperti ed è data dalla **somma dell'energia interna e dell'energia "di pulsione"** (pressione p per il volume V , o il volume specifico $v = V/m \equiv 1/\rho$)

$$H = U + pV \quad [\text{J}] \quad \Leftrightarrow \quad h \equiv \frac{H}{m} = u + pv \quad [\text{J/kg}]$$

CALORE SPECIFICO

Definizione:

quantità di calore necessaria per innalzare di 1°C la temperatura dell'unità di massa. Il valore del calore specifico dipende dal processo.

$$c = \frac{\delta q}{dT} \quad (\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}))$$

Calore specifico a volume costante $c_v = \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right|_v \quad (\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}))$

Calore specifico a pressione costante $c_p = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_p \quad (\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}))$

Rapporto tra i calori specifici $k = \frac{c_p}{c_v}$

CALORE SPECIFICO DI SOLIDI E LIQUIDI

Modello di sostanza incompressibile: si assume che la densità sia costante e l'energia interna sia funzione della sola temperatura

$$v = \frac{1}{\rho} = \text{cost} \quad u \approx u(T)$$

Conseguenze:

$$c_p = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_p = \left. \frac{\partial(u + pv)}{\partial T} \right|_p \approx \frac{du}{dt} + \left. \frac{\partial(pv)}{\partial T} \right|_p = \frac{du}{dt} = c_v$$

$$c_v(T) = c_p(T) = c(T)$$

$$u_2 - u_1 \approx c(T_2 - T_1)$$

$$h_2 - h_1 = c(T_2 - T_1) + v(p_2 - p_1) \approx c(T_2 - T_1)$$

$$\Delta h \approx \Delta u = c\Delta T \quad \Leftrightarrow \quad \Delta H \approx \Delta U = mc\Delta T$$

ESEMPIO (SC): AVVIAMENTO DI UN BOLLITORE

La durata Δt [s] del transitorio di riscaldamento di un boiler elettrico per acqua calda sanitaria (con nessun carico/scarico di acqua durante il transitorio) è influenzata dai seguenti parametri:

- m_{acs} massa di acqua da riscaldare (massa delle pareti trascurabile) [kg]
- c_{acs} calore specifico acqua [J/(kg·°C)]
- $T_{acs,i}$ temperatura iniziale dell'acqua (temperatura ambiente) [°C]
- $T_{acs,f}$ temperatura finale dell'acqua (temperatura alle utenze) [°C]
- \dot{Q}_e potenza termica entrante, fornita dall'elemento riscaldatore [W]
- $\dot{Q}_v \approx 0$ potenza termica uscente, dispersa (trascurata nel transitorio) [W]

$$Q - L = \Delta U \cong \Delta H \Leftrightarrow \dot{Q}_e \Delta t \approx m_{acs} c_{acs} (T_{acs,f} - T_{acs,i})$$

$$\Delta t \approx \frac{m_{acs} c_{acs} (T_{acs,f} - T_{acs,i})}{\dot{Q}_e}$$

L'approssimazione è valida per i liquidi e i solidi, ma non per i gas.

CALORE SPECIFICO DEI GAS IDEALI

Equazione di stato:

$$pV = nR_u T \Leftrightarrow pV = mRT \Leftrightarrow pv = RT$$

Pressione e temperatura sono quelle termodinamiche assolute

R è la costante di gas ideale della sostanza considerata, data dal rapporto tra la costante universale dei gas ideali R_u e la massa molare M della sostanza:

$$R = \frac{R_u}{M}$$

Modello di gas ideale: si assume che l'energia interna sia funzione della sola temperatura

$$u = u(T) \Rightarrow h = u + pv = u(T) + RT = h(T)$$

$$u = u(T) \Rightarrow h = u + pv = u(T) + RT = h(T)$$

CALORE SPECIFICO DEI GAS IDEALI

$$pV = mRT \Leftrightarrow pv = RT$$

$$u = u(T) \Rightarrow h = h(T)$$

Conseguenze:

$$c_v = \left. \frac{\partial u}{\partial T} \right|_v = \frac{du}{dT}$$

$$c_p = \left. \frac{\partial h}{\partial T} \right|_p = \frac{dh}{dT}$$

$$c_p = c_v + R$$

Variazione di energia interna ed entalpia

$$u_2 - u_1 = \int_1^2 c_v(T) dT$$

$$h_2 - h_1 = \int_1^2 c_p(T) dT$$

Ipotesi di calore specifico costante (indipendente da T)

$$u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1)$$

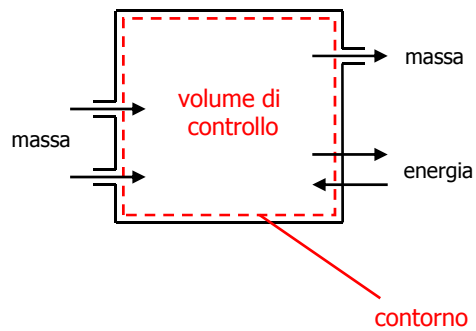
$$h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1)$$

**PRIMO PRINCIPIO
PER I SISTEMI APERTI**

SISTEMI APERTI (SA)

Sistema aperto (o volume di controllo):

regione di spazio delimitata da un contorno aperto



Esempi: scambiatore, radiatore, pompa, compressore, turbina, miscelatore, ecc.

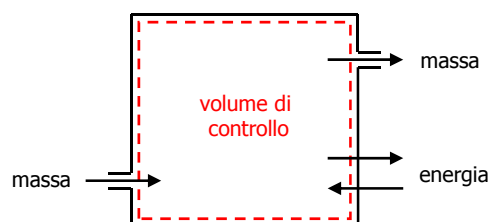
SISTEMI APERTI STAZIONARI

Sistema aperto a flusso stazionario:

- ⇒ Nessuna proprietà cambia nel SA
- ⇒ Nessuna proprietà cambia al contorno del SA
- ⇒ L'energia meccanica e termica scambiate al contorno del SA sono costanti
Ciò può valere anche per flussi pulsanti, ma mediamente stazionari.

Sistema aperto a flusso stazionario ad una corrente:

- ⇔ con una sola entrata ed una sola uscita



PORTATA IN MASSA E IN VOLUME

Portata in massa (o massica)

portata in volume (o volumetrica)

$$\dot{m} = \int_A \rho w dA \quad [\text{kg/s}]$$

$$\dot{V} = \int_A w dA \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

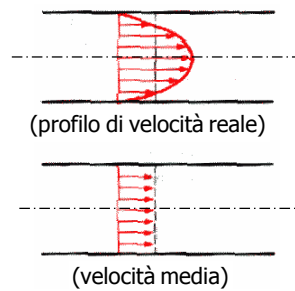
In caso di **flusso unidirezionale** (tubazioni, condotti aereulici, ecc.) si utilizza la **velocità media** W [m/s] sulla sezione di passaggio, di area A [m²]:

$$W = \frac{1}{A} \int_A w dA \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

$$\dot{V} = AW$$

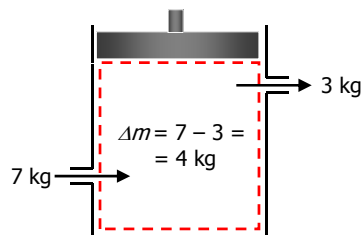
$$\dot{m} = \rho AW \equiv \rho \dot{V}$$

ove ρ [kg/m³] è la densità del fluido



PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE DELLA MASSA

*portata in massa entrante nel SA – portata in massa uscente dal SA =
= variazione della massa del SA per unità di tempo*



Processo qualunque: $\sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_u = \frac{dm}{dt}$

Processo a flusso stazionario ($dm/dt = 0$): $\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_u$

Processi a flusso stazionario ad una corrente: $\dot{m}_e = \dot{m}_u \equiv \dot{m}$

$$\rho_e \dot{V}_e = \rho_u \dot{V}_u$$

PRIMO PRINCIPIO PER I SISTEMI APERTI (SA)

potenza termica netta scambiata al contorno del SA
- potenza meccanica netta scambiata al contorno del SA =
= potenza entrante nel SA - potenza uscente dal SA +
+ variazione di energia nell'unità di tempo nel SA

$$\dot{Q} - \dot{L} = \sum \dot{m}_u \left(h_u + \frac{W_u^2}{2} + gz_u \right) - \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{W_e^2}{2} + gz_e \right) + \frac{dE}{dt} \quad [\text{W}]$$

Processi a **flusso stazionario** ($dE/dt = 0$):

$$\dot{Q} - \dot{L} = \sum \dot{m}_u \left(h_u + \frac{W_u^2}{2} + gz_u \right) - \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{W_e^2}{2} + gz_e \right)$$

Processi a **flusso stazionario ad una corrente**:

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{m} \left[h_u - h_e + \frac{W_u^2 - W_e^2}{2} + g(z_u - z_e) \right]$$

SISTEMI APERTI STAZIONARI A UNA CORRENTE

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{m} \left[h_u - h_e + \frac{W_u^2 - W_e^2}{2} + g(z_u - z_e) \right]$$

Poiché

$$\Delta h \equiv h_u - h_e = c_p (T_u - T_e)$$

si ottiene:

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{m} \left[c_p (T_u - T_e) + \frac{W_u^2 - W_e^2}{2} + g(z_u - z_e) \right]$$

Processi a **flusso stazionario ad una corrente con variazioni di energia cinetica e potenziale trascurabili** rispetto alle variazioni di entalpia

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{m} c_p (T_u - T_e)$$

Ad esempio, 102 m di dislivello o 45 m/s di variazione di velocità sono equivalenti, per l'aria ($c_p \approx 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$), all'energia associata alla variazione di temperatura di 1°C oppure, per l'acqua ($c_p \approx 4200 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$), di 0.24°C

ESEMPIO (SA): SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO AD ARIA

La potenza termica estratta dal sistema raffreddato ad aria è regolata dalla relazione:

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{m}c_p(T_u - T_e)$$

La potenza meccanica scambiata è trascurabile o addirittura nulla (per ventilatori assenti o in estrazione), o ancora assimilabile (per ventilatori in aspirazione) a potenza termica fornita in quanto trasformata pressoché integralmente in calore per effetto degli attriti viscosi in aria.

La portata in massa di aria è il prodotto della portata in volume per la densità dell'aria ρ [kg/m³]:

$$\dot{m} = \rho\dot{V}$$

In definitiva

$$\dot{Q} - \dot{L} = \rho\dot{V}c_p(T_u - T_e)$$

Ove per l'aria, tipicamente, $\rho c_p = 1200$ J/(m³·°C).

ESEMPIO (SA): SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO A LIQUIDO

Il prelievo di una potenza termica assegnata da un elemento da raffreddare tramite circolazione di un liquido, con temperature di estrazione (T_u) e di alimentazione (T_e) parimenti assegnate, è regolato dalla formula:

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{V}\rho c(T_u - T_e)$$

La potenza termica netta scambiata è quella prelevata \dot{Q}_{gn} più quella dispersa dalle tubazioni \dot{Q}_d (<0), trascurabile, in favore di sicurezza, per un problema di smaltimento del calore:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{gn} + \dot{Q}_d \equiv \dot{Q}_{gn} - |\dot{Q}_d| \approx \dot{Q}_{gn}$$

La potenza meccanica netta scambiata è quella di pompaggio (<0), generalmente trascurabile:

$$\dot{L} = \dot{L}_p = -|\dot{L}_p| \approx 0$$

In definitiva si ottiene

$$\dot{Q}_{gn} = \dot{V}\rho c(T_u - T_e)$$

da cui si può ricavare:

$$\dot{V} \approx \frac{\dot{Q}_{gn}}{\rho c(T_u - T_e)}$$

ESEMPIO (SA): CONTABILIZZATORI DI CALORE

La potenza termica \dot{Q}_z ceduta dall'impianto termoidraulico ad una zona termica può essere correlata alla caduta di temperatura ($T_u - T_e$) (<0) e alla portata del liquido \dot{V} che attraversa la rete di distribuzione di zona:

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{V}\rho c(T_u - T_e)$$

La potenza termica netta scambiata è quella Q_z ceduta alla zona termica (<0):

$$\dot{Q} = \dot{Q}_z \equiv -|\dot{Q}_z|$$

Le pompe di circolazione non sono incluse nel sistema di contabilizzazione:

$$\dot{L} = \dot{L}_p = 0$$

In definitiva si ottiene

$$-|\dot{Q}_z| = \dot{V}\rho c(T_u - T_e)$$

da cui si può ricavare l'energia Q_z [J] ceduta nell'intervallo temporale Δt :

$$|Q_z| = \int_{\Delta t} |\dot{Q}_z| dt \equiv [\dot{V}\rho c(T_e - T_u)]\Delta t$$

ESEMPIO (SA): SISTEMI A PIU' CORRENTI

Sistemi a flusso stazionario a più correnti:

$$\dot{Q} - \dot{L} = \sum \dot{m}_u \left(h_u + \frac{W_u^2}{2} + gz_u \right) - \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{W_e^2}{2} + gz_e \right)$$

Esempi:

camera di miscelazione e scambiatore di calore

$$\dot{Q} \approx 0, \dot{L} = 0$$

$$\frac{W_u^2}{2} \approx 0, \frac{W_e^2}{2} \approx 0$$

$$gz_u \approx 0, gz_e \approx 0$$

da cui

$$\sum \dot{m}_u h_u - \sum \dot{m}_e h_e \approx 0$$

ovvero

$$\sum \dot{V}_u \rho_u c T_u \approx \sum \dot{V}_e \rho_e c T_e$$

