NUMERO: 2049A - ANNO: 2016

A P P U N T I

STUDENTE: Summa Luciana

MATERIA: Fisica tecnica - Prof. Perino

ILLUMINOTECNICA

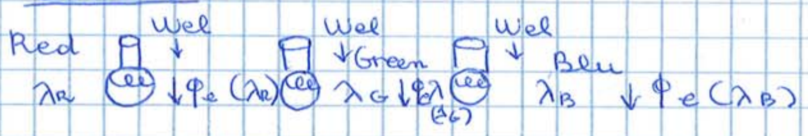
Luce: insieme delle radiazioni elettromagnetiche a cui è sensibile l'occhio umano ⇒ quello che percepiamo come SENSAZIONE VISIVA.

Campo del visibile → $0,38\ \mu m \leq \lambda \leq 0,78\ \mu m$

Luce monocromatica ⇒ luce emessa ad una sola e ben determinata lunghezza d'onda (λ)

* Ad ogni lunghezza d'onda corrisponde una sensazione visiva differente.

ESEMPIO



Supponiamo di alimentare le tre lampadine con la stessa POTENZA ELETTRICA

W_{el} = potenza elettrica [W]
λ = [μm]

flusso → $\Phi_e(G) = \Phi_e(\lambda_R) = \Phi_e(\lambda_B)$

Nel momento in cui mi chiedo qual è la lampadina più luminosa scopro che in realtà le tre le tre grandezze sono diverse, infatti:

$\Phi(\lambda_G) >> \Phi(\lambda_B) >> \Phi(\lambda_R)$ — varia secondo la lunghezza d'onda

Quindi l'occhio umano ha una sensibilità alla QUANTITÀ di luce diversa.

Solo una QUOTA del flusso energetico viene convertito in luce.

$$\begin{array}{ccccc} \Phi_e(\lambda_G) & = & \Phi_e(\lambda_R) & = & \Phi_e(\lambda_B) \\ \downarrow K' & & \downarrow K'' & & \downarrow K''' \\ \Phi(\lambda_G) & \neq & \Phi(\lambda_R) & \neq & \Phi(\lambda_B) \end{array}$$

In generale: $\Phi(\lambda) = K(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda)$

FLUSSO LUMINOSO (integrale):

Φ lumen [lm]

FLUSSO LUMINOSO MONOCROMATICO (o SPETTRALE)

$$\Phi(\lambda) = \frac{d\Phi}{d\lambda} \rightarrow \left[\frac{lm}{\mu m}\right]$$

$$\boxed{\Phi(\lambda) = K(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda)} \longrightarrow$$ relazione tra flusso luminoso e flusso energetico

$K(\lambda)$: costante di calibrazione che varia in base a λ = visibilità $\left[\frac{lm}{W}\right]$

↓

mi permette di trasformare il flusso energetico in luminoso

Visibilità relativa: $v(\lambda)$

↓

che varia da $0 \rightarrow 1$ $\quad v(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_{max}}$ [- : adimensionale]

$$\Phi(\lambda) = K_{max} \cdot v(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda)$$

sost. ↳ $\Phi = \int_0^\infty \Phi(\lambda)\, d\lambda$

$$\Phi_e = \int_0^\infty \Phi_e(\lambda)\, d\lambda$$

$\Rightarrow \Phi = \int_0^\infty K_{max} \cdot v(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda)\, d\lambda$ [lm] flusso luminoso

$\Phi_e, \Phi_e(\lambda) \Rightarrow$ Grandezze energetiche

$\Phi, \Phi(\lambda) \Rightarrow$ Grandezze fotometriche

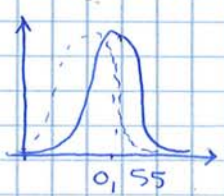
L'occhio umano ha la duplice possibilità di usare < coni / bastoncelli $\Rightarrow \lambda$ varia

bastoncelli ↓ più sensibili.

$v(\lambda)$ < visione notturna (scotopica) / visione diurna (fotopica)

Il picco della visione ~~fotopica~~ notturna si colloca nel momento in cui $\lambda K_{max} = 0{,}505\ \mu m$

Il picco della visione diurna invece $\lambda K_{max} = 0{,}555\ \mu m$



© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 5 di 136

Conoscendo una superficie emettente si può ricavare il flusso globale

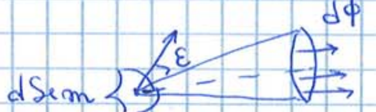
si introduce l'emettenza per indicare il flusso di una singola areola

M = emettenza

$M = \frac{d\phi}{dS_{em}}$ $\left[\frac{lm}{m^2} \text{ o lux sul bianco} \right]$

Può darsi che un'areola distribuisca il flusso luminoso nello spazio in maniera differente.

Si introduce così la LUMINANZA. L = luminanza



Considero una direzione generica e l'angolo solido attorno a questa direzione.

Questo flusso sarà un infinitesimo di secondo ordine.

$L = \frac{d^2\phi}{d\Omega \, dS_{em} \cos\varepsilon}$

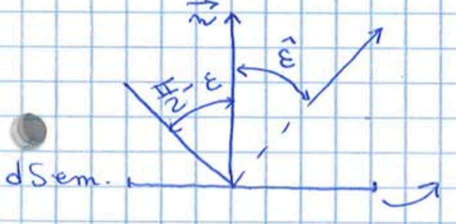
emettente

di Sem apparente

dove ε è l'angolo formato dalla superficie e la direzione considerata.

ε = angolo di emissione.

Quando si parla di luce viene considerata l'area apparente.



$dS_{app} = dS_{em.} \cdot \cos\varepsilon$

$L = \frac{d(d\phi)}{d\Omega \, dS_{em} \cos\varepsilon} = \frac{dI}{dS_{em.} \cos\varepsilon} = \frac{dM}{d\Omega \cos\varepsilon} = L \quad \left[\frac{cd}{m^2} \right] \text{ o } [\text{nit}]$

$d(d\phi) \rightarrow I$, $d\Omega \, dS_{em} \rightarrow M$

Per il principio di conservazione dell'energia

$$\boxed{\frac{\phi_r}{\phi_i} = \frac{\phi_a}{\phi_i} + \frac{\phi_r}{\phi_i} + \frac{\phi_t}{\phi_i}}$$

$$1 = \alpha + \rho + \tau$$

dove $\alpha = \frac{\phi_a}{\phi_i}$ = fattore di assorbimento

$\rho = \frac{\phi_r}{\phi_i}$ = coefficiente di riflessione

$\tau = \frac{\phi_t}{\phi_i}$ = coefficiente di trasmissione.

Il concetto di trasparente - opaco è relativo e dipende dal tipo di flusso che incide su un corpo.

α, ρ, τ quindi non solo sono funzioni del materiale, ma anche della lunghezza d'onda.

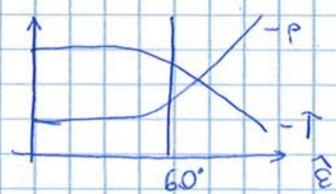
$$\boxed{\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1}$$

↳ valori spettrali emisferici (media rispetto alle ∞ direzioni)

Entra in gioco anche la dipendenza dall'angolo di incidenza ε.

$$\boxed{\alpha(\lambda, \hat{\varepsilon}) + \rho(\lambda, \hat{\varepsilon}) + \tau(\lambda, \hat{\varepsilon}) = 1}$$

↳ valori spettrali e angolari o valori integrali emisferici.



Quando S a 60°

vengono introdotti nel momento in cui la luce interagisce con una superficie.

$$\boxed{\alpha_\ell + \tau_\ell + \rho_\ell = 1}$$

valori emisferici medi tra $0{,}38 \leq \lambda \leq 0{,}78\ \mu m$
se c'è un pedice (ℓ) sono riferiti alla luce

Casi particolari

- Specchio o riflettore perfetto

  $\rho = 1 \quad \alpha = \tau = 0$

- Mezzo trasparente

  $\tau \neq 0 \quad \tau + \alpha + \rho = 1$

- Mezzo opaco

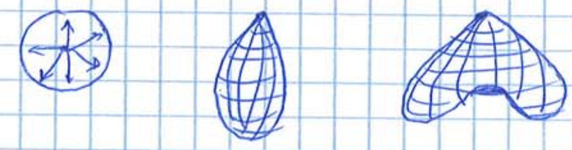
  $\tau = 0 \quad \rho + \alpha = 1$

- Corpo nero (ideale)
  ↳ proprietà di assorbire qualsiasi radiazione elettromagnetica

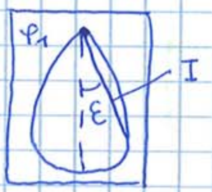
  modello che consente di creare un modello di calcolo per lo scambio termico radiattivo.

superficie fotometrica

Solido fotometrico ⇒ mi permette di sapere **QUANTA** luce viene emessa.



Per poter prendere delle misure ho bisogno di sezionare il solido fotometrico e il risultato sarà una CURVA che rappresenta punto per punto l'intensità luminosa e prende il nome di **INDICATORE di EMISSIONE**.



$\hat{\varepsilon}$ = angolo di emissione (rispetto all'angolo della lampada).

$I = f(\Omega) = f(\varepsilon, \varphi)$

↑ in funzione di un angolo solido

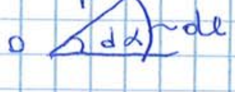
in funzione di due angoli piani

Nel caso più generale $I(\varepsilon, \varphi)$.

Ci sono casi in cui il solido fotometrico è un SOLIDO di ROTAZIONE, per cui l'intensità luminosa I sarà in funzione soltanto dell'angolo ε e non più da quello di ROTAZIONE.
↳ emissione.

PASSAGGIO DA UN ANGOLO SOLIDO A DUE ANGOLI PIANI

$\Omega \Rightarrow f(\varepsilon, \varphi)$

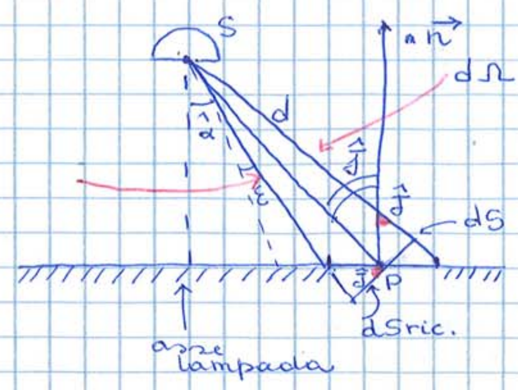


$d\alpha = \frac{dl}{r}$

$d\Omega = \frac{ds}{r^2}$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 11 di 136

ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE di ESTERNI (da sorgenti puntiformi)



$\hat{\alpha}$ = angolo di inclinazione dell'asse dell'apparecchio

$\hat{\varepsilon}$ = angolo di emissione

$\overline{SP} = d$
↳ distanza tra sorgente e punto illuminato

$\hat{J}$ = angolo di incidenza: angolo formato dalla direzione del raggio con la normale alla sup. nel punto P.

$d\Omega$ = angolo solido

Vale la relazione (angoli alterni interni)

$$\boxed{\hat{J} = \hat{\alpha} + \hat{\varepsilon}}$$

$$d\Omega = \frac{dS}{d^2}$$

$$dS = dS_{ric.} \cdot \cos J$$

quante luce arriva in un certo pto.

$$\boxed{d\Omega = \frac{dS_{ric.}}{d^2} \cdot \cos J}$$

$$E_p = \frac{d\Phi}{dS_{ric.}}$$

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \Rightarrow d\Phi = I \cdot d\Omega$$

quanto flusso luminoso viene emesso intorno all'angolo solido $d\Omega$

da qui: $E_p = \frac{I \cdot d\Omega}{dS_{ric.}} = \frac{I \cdot \cancel{dS_{ric.}} \cdot \cos J}{d^2 \cdot \cancel{dS_{ric.}}}$

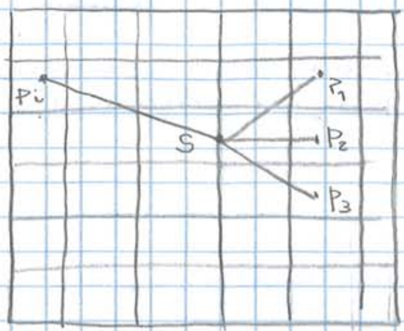
$$\Rightarrow \boxed{E_p = \frac{I \cdot \cos J}{d^2}}$$ → Illuminamento in un pto P dovuto ad una sorgente puntiforme.

$$\boxed{E_p = \frac{I(\varepsilon, \varphi) \cdot \cos \hat{J}}{d^2} \quad [Lx]}$$

Calcolo pratico ("progetto") dell'illuminazione di un esterno.

$S \rightarrow$ divisa in "n" areole ΔS

(pianta)



$$E_{Pi} = \frac{I(\varepsilon_i, \varphi_i) \cdot \cos \vartheta_i}{d_i^2}$$

Requisiti di progetto

1) $E_{pi} \geq E_{min}$ $\forall i$

minor dispendio en. possibile.

$E_{min} \rightarrow$ fissato da norme, leggi, prescrizioni

Nel caso di illuminazione stradale l'E_p è sostituito dalla luminanza L

$$\left(L = \frac{\rho_e E}{\pi} \quad \text{per sup. lambertiane} \right)$$

ρ_e = coeff. di riflessione luminosa della superficie (illuminata)

$\rho_e \uparrow$ (sale) se i rivestimenti sono chiari e lisci

$L_{pi} \geq L_{pmin}$

$\hookrightarrow$ fissato da norme

2) Uniformità di illuminamento (in tutti i pti) $\Rightarrow$ garanzia di una buona illuminazione della sup.

U_o = Fattore (o coeff.) di uniformità di illuminamento (generale)

$$\boxed{U_o = \frac{E_{min}}{\bar{E}} \quad [-]}$$

NOTA: $E_{min} = Min(E_{pi})$

$\hookrightarrow$ minimo tra tutti gli E_{pi}.

$\bar{E}$ = illuminamento medio sulla sup. illuminata

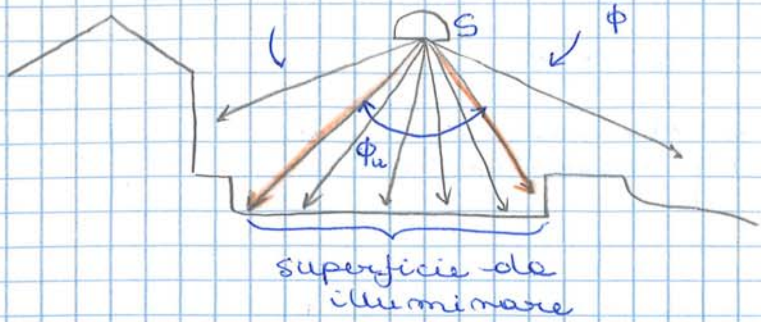
$$\boxed{\bar{E} = \frac{1}{S} \int_0^S E_{pi} \, dS}$$

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^{n} E_{pi} S_i}{S} \quad (n \text{ aree})$$

$$\bar{E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} E_{pi}$$

Caso particolare: se le areole ΔS_i sono tutte = allora

COEFFICIENTE DI UTILIZZAZIONE



ϕ_u - flusso utile (flusso che raggiunge la sup. da illuminare)
[lm]

ϕ = flusso luminoso globalmente emesso dalla lampada
[lm]

$$C_u = \frac{\phi_u}{\phi} \quad [-]$$

È possibile legare questo coeff. all'illuminamento e alla superficie.

$$E = \frac{d\phi}{dS} \Rightarrow \int d\phi = \int_{sup.\,utile} E \cdot dS = \phi_u$$

se integro sulla sup. utile ⇒ ottengo il flusso utile

$$\bar{E} = \frac{1}{S}\int E\,dS \Rightarrow \int E\,dS = S \cdot \bar{E}$$

$$\phi_u = \int d\phi = \int_{sup.\,utile} E\,dS = S \cdot \bar{E}$$

→ sostituisco in C_u → illuminamento medio sul piano utile

sup. del piano utile

$$\boxed{C_u = \frac{S \cdot \bar{E}}{\phi} \Rightarrow \phi = \frac{S\bar{E}}{C_u D M}}$$

$D = 0 \to 1$
$M = 0 \to 1$

D = coeff. di deprezzamento ⇒ si riferisce alla sorgente

M = coeff. di manutenzione ⇒ grandezza che influenza maggiormente

* D = 0,85 → 0,90
* M = 0,55 → 0,80

Occorre tener presente che il flusso ϕ può ridursi a causa del degrado luminoso delle lampade e dell'apparecchio illuminante, motivo per cui nella formula del coeff. di utilizzazione si aggiungono i coefficienti D e M.

Sostituendo le due relazioni in η ottengo:

$$\eta = \frac{K_{max} \int_0^\infty V(\lambda)\, \Phi_e(\lambda)\, d\lambda}{\int_0^\infty \Phi_e(\lambda)\, d\lambda}$$

$$\Rightarrow \eta_{MAX} \Leftrightarrow V(\lambda) = 1$$

$$\Downarrow$$

$$\eta_{MAX} = \frac{K_{max} \int_0^\infty 1 \cdot \cancel{\Phi_e(\lambda)\, d\lambda}}{\int_0^\infty \cancel{\Phi_e(\lambda)\, d\lambda}} \Rightarrow \boxed{\eta_{MAX} = K_{max} = 683 \frac{lm}{W}}$$

In realtà abbiamo a che fare con lampade la cui efficienza è molto minore rispetto al valore massimo dell'efficienza.

SORGENTI NATURALI

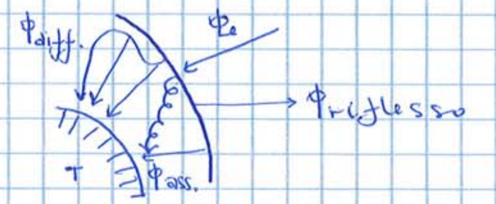
$I_S \simeq 1360 \frac{W}{m^2}$

$\downarrow$

irradianza solare diretta

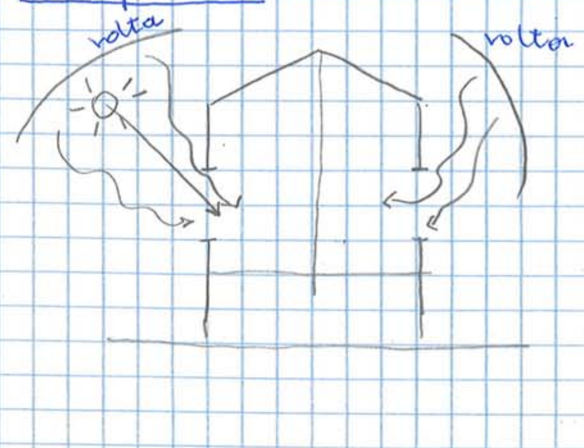
Quando un raggio di sole incontra ossigeno o azoto questo viene deviato (scattering).

Il flusso di energia elettromagnetica viene in parte diffuso, in parte riflesso o assorbito.



Questo porta a due fenomeni:
1) attenuazione dell'irradianza solare diretta;
2) nascita di una componente di irradianza solare diffusa dal cielo.

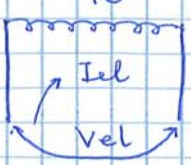
Caso pratico:



Spesso la luce della volta è più "comoda" rispetto a quella diretta in quanto non abbaglia.

SORGENTI ARTIFICIALI

Lampade a incandescenza



$\dot{Q} = R\, I_{el}^2$

$T_R \Rightarrow \dot{Q} \propto T^4$

Il funzionamento di queste lampade è basato sulla dissipazione di potenza per effetto Joule da parte di un filamento percorso da corrente.

A elevate temperature però il materiale surriscaldandosi "dava vita" a una reazione che portava alla bruciatura.

Funzioni:
- BULBO: mantenere il filamento in atmosfera rarefatta per evitare che si verifichi la combustione a contatto con l'ossigeno

LAMPADINA

filamento (a spirale poichè più è lungo più illumina ⇒ diminuirelo spazio)
(W)
↓
elemento (tav. periodica) il TUNGSTENO caratterizzato da una temp. altissima ⇒ utilizzandolo è possibile ottenere più luce

$T_{fusione} \simeq 3900°C$ (5800°C ebolliz.)

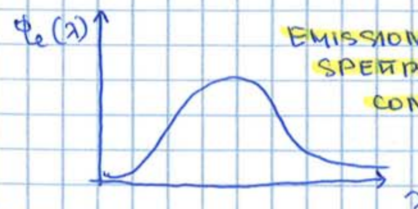
- ATTACCO: permette il collegamento elettrico tra lampada e rete elettrica
- FILAMENTO: dissipa per effetto Joule una potenza elettrica $Q = RI^2$

$T_{lavoro} \simeq 2300 \to 3000°C$
↓
massima (poichè tendevano a bruciarsi e cioè il filamento iniziava a rompersi)

↳ primo step evolutivo: si inserirono nel bulbo dei gas inerti come Ar, N_2 e Kr ⇒ ci fu comunque un difetto:
1) luce gialla
2) diminuzione di efficienza (sale se la temp. sale a sua volta)

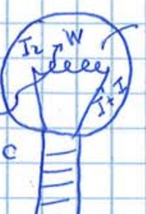
↳ seconda evoluzione ⇒ obiettivo: contrastare il fenomeno di evaporazione di tungsteno ⇒ introduzione dello iodio.

$\eta \uparrow$ se $T \uparrow$



EMISSIONE CON SPETTRO CONTINUO

$W + 2I \to WI_2$
$WI_2 \to W + 2I$



composto alogenato (I = iodio)

↳ quelle che si trovano vicino al filamento tendono a dissociarsi e una volta dissociate sono molto REATTIVE perciò reagendo con il tungsteno provoca la migrazione di quest'ultimo verso la faccia interna del bulbo formando WI_2

$\eta = 10/20 \frac{lm}{W}$ ~ 2800°C
↓
LAMPADE ALOGENE: scaldano tantissimo ⇒ importante proteggerla

Tubi al NEON → scopo di facilitare l'innescamento di accensione accelerandolo (alcuni decimi di sec. per far partire la scarica)

Per aumentare ulteriormente l'efficienza, si spalma sul vetro una sostanza luminescente, la quale se riceve raggi UV emette fotoni anche lei (es. sali di cadmio). Questo permette di riempire i buchi delle bande e proteggere dagli UV.
↳ LUCE BIANCA (sino a $\eta = 50\,lm/W$)

In base alle sostanze luminescente si può anche variare tra luce bianca calda (+ giallo) o freddola (+ blu).

LED

Da un punto di vista dei consumi energetici questi sono scesi tantissimo. Con la stessa quantità di luce si riduce a 1/3 la spesa di energia elettrica, ~~...~~

EVOLUZIONE: ottenere luce bianca

---> La luce a incandescenza è spostata verso il rosso a causa della frequenza relativamente bassa (2500°C). Più è calda maggiore luce fa, poiché è spostata sul giallo/blu/verde.

Temperatura di colore alta, temperatura filamento bassa.

Se prendo le lampade a scarico nei gas la luce emessa in quattro bande ⇒ luce giallo-verde (incroci) ⇒ AMBIENTE NON OTTIMALE

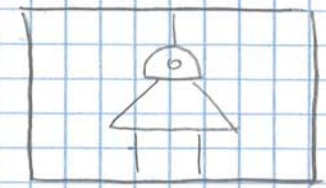
Parametri più utilizzati per caratterizzare la luce:

- TEMPERATURA di COLORE
- COLOUR RENDING INDEX (CRI): dà una percentuale della resa colorimetrica (100% luce bianca).

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 23 di 136

È possibile esprimere il $Cu = f$ (geometria del locale, tipo di illuminazione, coeff. di riflessione medio delle pareti e del soffitto).
i

Tipo di illuminazione



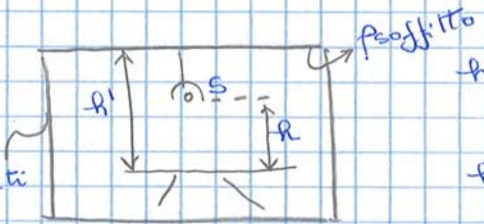
Illuminazione diretta ⇒ più del 90% del flusso luminoso è diretto verso il basso (piano utile)

$\Phi > 90\%$ sul piano utile

Illuminazione indiretta ⇒ caso in cui meno del 10% del flusso luminoso è rivolto verso il basso.

$\Phi < 10\%$ sul piano utile

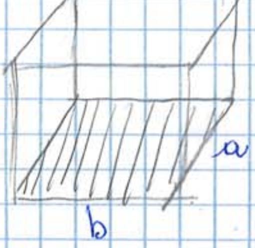
- Diretta 90% sul piano utile (verso il basso).
- Semidiretta 60% - 90%
- Mista 40% - 60%
- Semi indiretta 10% - 40%
- Indiretta 10%



* $\bar{\rho}_{pareti}$

h = distanza tra piano utile e sorgente

h' = distanza tra piano utile e soffitto



La geometria del locale viene tenuto in conto attraverso un parametro detto "Indice del locale": i.

$$\boxed{i = \frac{a \cdot b}{h(a+b)}}$$ → Nel caso di luce
- diretta
- semidiretta
- mista

$$\boxed{i = \frac{ab}{h'(a+b)}}$$ → Nel caso di luce
- Semi-indiretta
- indiretta.

pesata

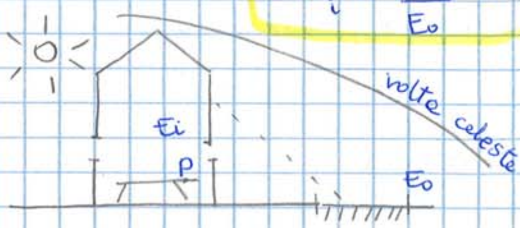
$$* \ \bar{\rho}_{pareti} = \frac{1}{S}\sum_{i=1}^{n} \rho_i S_i$$

Medie di coefficienti di riflessione sono sempre medie pesate per evitare che gli elementi considerati siano messi sullo stesso 'piano'.

FATTORE di LUCE DIURNA

In un punto i-esimo. è definito come rapporto tra illuminamento nel pto i e illuminamento esterno del piano orizzontale.

$$\boxed{FLD_i = \frac{E_i}{E_0} \ [-]} \quad 0 \to 1$$



NOTA: FLD non dipende da Eo

$$\parallel$$
$$\frac{f(E_0)}{E_0}$$

mi dice quanto "bene" utilizzo la luce esterna
↓
uso un parametro che dipende solo dalle condizioni atmosferiche e non da Eo.

Eo = illuminamento esterno sul piano orizzontale in assenza di radiazione solare diretta (e in assenza di ostruzioni) [lx]

FLD ⩾ FLD minimo ?

FLDi dipende dal punto in cui effettuo i calcoli, in quanto può variare a seconda della posizione.

Si introduce infatti un coefficiente dato da:

$$\boxed{FLD_m = \frac{\overline{E}}{E_0}}$$ ⇒ FATTORE di LUCE DIURNA MEDIO

$\overline{E}$ = illuminamento medio all'interno dell'ambiente (su tutte le superfici) [lx].

Nei quartieri residenziali $\overline{E}$ = 2% (almeno)

È possibile utilizzare FLDm secondo una procedura di calcolo che ci permette di quantificarla

$$\boxed{FLD_m = \frac{\overset{\text{vetro}}{T_v} \cdot A_v \cdot F}{(1-\overline{\rho}_e) \cdot S} \ [-]} \to \%$$

T_v = Fattore (coeff.) di trasmissione luminosa della superficie trasparente

A_v = area della superficie trasparente [m²]

S = superf. totale (inviluppo) dell'ambiente

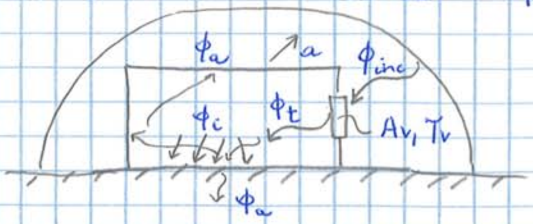
$$S = \underbrace{2 \cdot a \cdot b}_{A_{soff.} + A_{pavim.}} + \underbrace{(a+b) \cdot 2 + c}_{A_{pareti}}$$

$\overline{\rho_e}$ = coeff. di riflessione medio delle sup. interne

$$\overline{\rho_e} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \rho_i S_i}{S}$$

F = fattore finestra → frazione di volta celeste vista dalla superf. trasparente. [-].

Perché FLDm si calcola in questo modo?



ϕ_{inc} = flusso luminoso incidente sull'esterno della finestra

ϕ_t = flusso luminoso trasmesso

Una parte del flusso viene trasmesso, la maggior parte assorbita
⇒ tanto flusso entra, tanto flusso viene assorbito o trasmesso

Quindi per il principio di conservazione dell'energia:

$$\boxed{\phi_t = \phi'_a}$$

ϕ'_a = flusso uscente dall'ambiente (assorbito o trasmesso)

$\phi_t = \tau_v \cdot \phi_{inc.}$

$\phi_{inc} = \underbrace{\bar{E}_F}_{\text{illumin. medio sulla finestra}} \cdot A_v$ $\qquad \bar{E} = \frac{\phi}{S} \Rightarrow \phi = \bar{E} \cdot S$

$\phi_{inc} = F \cdot E_o \cdot A_v$ $\qquad F = \frac{\bar{E}_F}{E_o}$ ⇝ in funzione soltanto della geometria.

F = fattore geometrico

Sostituisco in ϕ_t $\Rightarrow$ $\boxed{\phi_t = \tau_v \cdot F \cdot E_o \cdot A_v}$

ϕ_i = flusso incidente su tutte le superfici interne dell'ambiente

$\phi'_a = (\bar{\tau}' + \bar{\alpha}') \cdot \phi_i$ → per considerare più pareti e più finestre.

poiché $1 = \rho + \tau + \alpha \Rightarrow \tau + \alpha = 1 - \rho$

Sostituisco in ϕ'_a $\Rightarrow (1-\bar{\rho}) \cdot \phi_i = \boxed{(1-\bar{\rho}) \cdot \bar{E} \cdot S = \phi'_a}$

$$\frac{\tau_v \cdot F \cdot \cancel{E_o} \cdot A_v}{(1-\bar{\rho}) \cdot S} = \cancel{(1-\bar{\rho})} \cdot \frac{\bar{E}}{E_o} \cdot \cancel{S}$$

$\frac{\bar{E}}{E_o}$ ↓ FLDm

$$\Rightarrow FLDm = \frac{\tau_v \cdot F \cdot A_v}{(1-\bar{\rho}) \cdot S}$$

⇓

deducibile dunque dal principio di conservazione dell'energia.

Pressione $p = \frac{dF}{d\vec{S}}$ ⇝ forza elementare dF esercitata sulla superficie elementare $d\vec{S}$.

$Pa = 1 \frac{N}{m^2}$

Perchè non usiamo il Pascal nella vita quotidiana?
Pa ⇒ poco pratico poichè numeri troppo grandi.
atm ⇒ percezione migliore della pressione.

La pressione di un Pascal è la pressione che si trova a $\frac{1}{10}$ mm di colonna d'acqua

$$p = \rho g h = 1000 \cdot 10 \cdot h = 1 Pa$$

$$h = \frac{1}{10'000} m = \frac{1}{10} mm.$$

oltre a una perturbazione di pressione è importante notare la presenza di una velocità di oscillazione.

- di velocità di oscillazione: velocità con cui oscillano le particelle nell'aria.

$u(t)$ [m/s]

Le particelle oscillano intorno alla sua posizione di equilibrio. Moto = 0.

La velocità con cui propaga l'onda di velocità di oscillazione viene chiamata VELOCITÀ di PROPAGAZIONE dell'ONDA
⇓ per fenomeni acustici
VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE del SUONO, C

Affinchè le onde si propaghino e generino è necessario un mezzo materiale elastico ⇒ il suono non si propaga nel vuoto.
↳ ARIA

NOTA: al contrario della luce che si propaga nel vuoto.

Applicando la teoria delle mezze oscillazioni applicato a un corpo, la velocità di propagazione dipende da:

- K: modulo di elasticità a compressione del materiale [N/m²] o [Pa]

- ρ: densità del mezzo [Kg/m³]

$$\boxed{C = \sqrt{\frac{K}{\rho}}}$$

Nei gas perfetti (buona approssimazione dell'aria)

$$\boxed{C = \sqrt{\frac{p\gamma}{\rho}} = \sqrt{\gamma R^* T}}$$ → temperatura assoluta [K]

p → pressione; ρ → densità

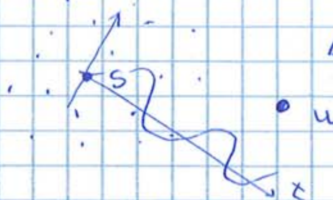
Equazioni differenziali delle onde elastiche

t = tempo

$$\nabla^2(\Delta p(t)) = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2(\Delta p(t))}{\partial t^2} \rightarrow \Delta p(x,y,z,t) \qquad \boxed{\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}}$$

$$\nabla^2 u(t) = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u(t)}{\partial t^2} \rightarrow u(x,y,z,t)$$

Campo sonoro



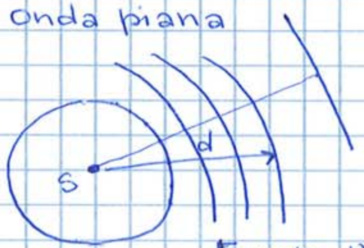
$\Delta p(x,y,z,t)$

$u(x,y,z,t)$

Siccome è molto difficile arrivare ad una soluzione analitica è necessario effettuare calcoli per arrivare a soluzioni numeriche oppure esaminare casi semplici per poi applicarli a quelli complessi

Caso particolare

1) Onda piana



d = distanza dalla sorgente

piano

Fronte d'onda = SFERICO

2) assenza di onde riflesse (solo onde dirette)

campo libero: attorno alla mia sorgente non c'è alcun ostacolo che la riflette
↓
solo contributo dell'onda diretta

3) Suono puro ⇒ caratterizzato da una sola frequenza f
↓
dal p.to di vista percettivo è il suono di un fischio

$$\boxed{\begin{aligned} \Delta p(t) &= \Delta p_{max} \cdot \cos\left[w\left(t - \frac{x}{c}\right)\right] \\ u(t) &= \frac{\Delta p_{max}}{\rho_0 \cdot c} \cdot \cos\left[w\left(t - \frac{x}{c}\right)\right] \end{aligned}}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 33 di 136

Da $I = \frac{dW}{dS}$

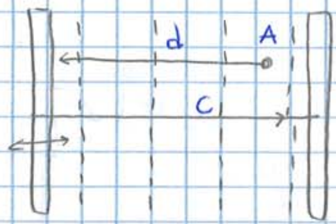
$W = \int_S I \, dS$

Se sommiamo tutte le intensità sonore sul fronte d'onda otterremo la potenza sonora in Watt.

S = superficie del fronte d'onda

Casi tipici

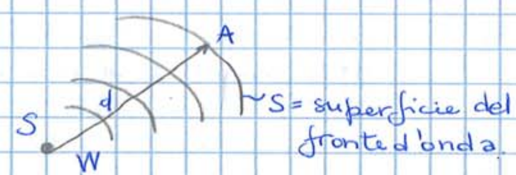
a) Fronte d'onda piano



$I = \frac{W}{S}$

(!!!) I non dipende dalla distanza dell'ascoltatore dalla sorgente

b) Fronte d'onda sferico



$I = \frac{W}{S} = \frac{W}{4\pi d^2}$

d → raggio della sfera.

In campo sonoro sferico la I decresce con la distanza secondo una legge del tipo:

$I \propto 1/d^2$

DENSITÀ di ENERGIA SONORA, U

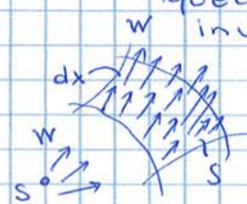
$\boxed{U = \frac{dE}{dV}}$ dE → energia sonora, dV → volume $\left[\frac{J}{m^3}\right]$

Quantità di energia sonora infinitesima contenuta nel volume elementare dV

$E \Leftrightarrow W \qquad W = \frac{E}{t}$

$dE = W\,dt$

Posso vedere l'energia sonora come quella di una potenza sonora applicata in un intervallo di tempo dt.



Fronte d'onda "spazza" un pezzetto di superficie // dV

$dx = c \cdot dt$

$dV = S \cdot dx$

$dV = S\,dx = S \cdot c \cdot dt$

$U = \frac{dE}{dV} = \frac{W \cdot dt}{S \cdot c \cdot dt} = \frac{I}{c}$ ($\frac{W}{S} = I$)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 35 di 136

ACUSTICA FISIOLOGICA ⇒ come percepiamo il segnale sonoro

Come funziona la relazione tra percezione di suoni e "progetto"

a) 20 Hz → 20'000 Hz ⇒ gamma udibile

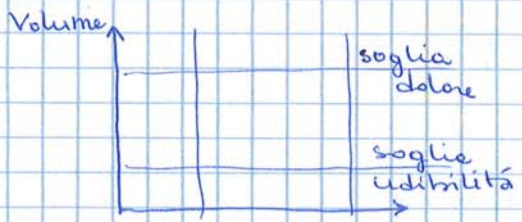
b) 1000 Hz la minima pressione che può essere percepita è:

$$p_0 = 20 \cdot 10^{-6}\ Pa \simeq 20\,\mu Pa$$

La pressione a cui la sensazione sonora diventa di dolore è di 20 Pa

La minima soglia a cui si percepisce un suono è detta SOGLIA DI UDIBILITÀ
(⇒ 20 μPa ≡ soglia di udibilità a 1000 Hz)

L'estremo opposto è detta SOGLIA del DOLORE



Gamma dell'udibile delimitata a dx e sx dalla freq., mentre in alto e in basso rispettivamente dalla soglia di dolore e quella di udibilità.

c) legge Weber - Fechner ⇒ la variazione di sensazione sonora non è proporzionale alla intensità sonora.

$$\Delta S \not\propto \Delta I$$

A pari salto di sensazione sonora, l'intensità sonora è diversa.

La variazione di sensazione sonora dunque, si è scoperto, è proporzionale al rapporto tra variazione di intensità sonora e intensità sonora:

$$\Delta S \propto \frac{\Delta I}{I}$$

$$\boxed{dS = k \frac{\Delta I}{I}}$$

$$\int_{S_0}^{S} dS = \int_{I_0}^{I} k \frac{dI}{I}$$

$$\boxed{\underbrace{S - S_0}_{\text{grandezze soggettive (basate su valori medi)}} = k \ln \frac{I}{I_0}}$$

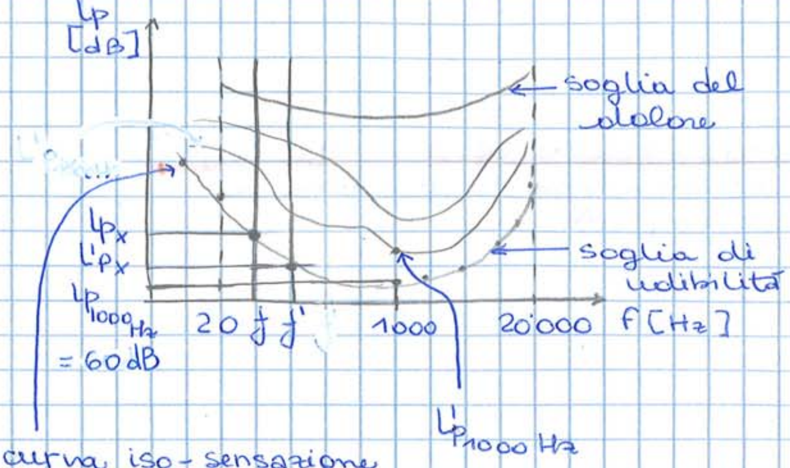
La sensazione varia dunque in base ai valori dell'intensità sonora.

$$= k' \log \frac{I}{I_0}$$

per poter utilizzare il log al posto di ln ⇒ cambio la costante.

AUDIOGRAMMA NORMALE

Fletche e Munson

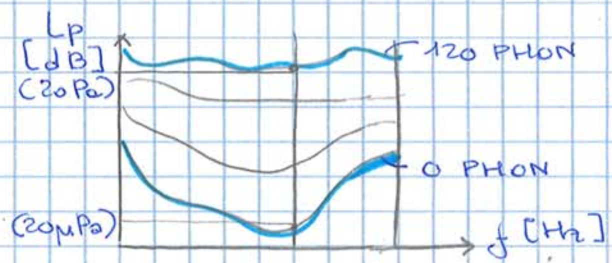


curva iso-sensazione sonora ⇓

ISO-PHON

- suono di riferimento a 1000 Hz (valore comodo)
- il valore viene fatto sentire ad un certo livello → Lp_{1000Hz} (per es. 60 dB) *S
- prendo un suono di prova a frequenza f.
- vario il volume del suono di prova fino a quando il suono generi la stessa sensazione S precedente
- leggo il Lp e lo riporto sul grafico.

La curva mi dà la SENSAZIONE misurata in phon.



$$Lp = 20 \log \frac{P}{P_0} = 20 \log \frac{20\mu Pa}{20\mu Pa} = 0 \text{ dB}$$

$$Lp = 20 \log \frac{20}{2 \cdot 10^{-5}} = 20 \log 10^6 = 120 \text{ dB}$$

L'orecchio si è evoluto man mano in base alla frequenza della voce ⇒ sentiamo bene a frequenze basse.

Le curve tendono ad appiattirsi verso la soglia del dolore ⇒ udito meno 'Fino'.

Lo stesso suono a 60 dB cambia a seconda della frequenza
- 1000 Hz = 60 phon
- $\underbrace{100 \text{ Hz}}_{\text{disturba di meno}}$ = 40 phon

$L_{I_1} = 10 \log \frac{I}{I_0}$ $\quad$ $L_{I_2} = 10 \log \frac{2I}{I_0}$

Applicazione al problema mostrato in precedenza $I \rightarrow 2I$.

$$L_{I_2} - L_{I_1} = 10 \log \frac{2I}{I_0} - 10 \log \frac{I}{I_0}$$

$$\Delta L = 10 \log \frac{2I / \cancel{I_0}}{I / \cancel{I_0}} = 10 \log 2 \cong 3{,}01\,dB \cong 3\,dB$$

NOTA: a cifre piccole di livelli corrispondono a variazioni di grandezze molto grandi $\Rightarrow$ attenzione ai dB

INTERAZIONE SUONO - SUPERFICI

Per la conservazione dell'energia

$$\frac{W_i}{W_i} = \frac{W_r + W_t + W_{a'}}{W_i}$$

$$\boxed{1 = r + t + a'}$$

$r = \frac{W_r}{W_i}$, $t = \frac{W_t}{W_i}$, $a' = \frac{W_{a'}}{W_i}$

- r = coeff. di riflessione sonora [-]
- t = " " trasmissione sonora [-]
- a' = " " assorbimento sonoro [-]

$\Sigma = a$

sono funzione della frequenza del suono incidente.

1) Garantire un'acustica eccellente
2) Evitare che il suono si propaghi

Es. Suonando il pianoforte per me è musica, per il vicino è rumore.

$$\boxed{r = 1 - t - a' = 1 - \underbrace{(t + a')}_{a}}$$

a: coeff. di assorbimento apparente!

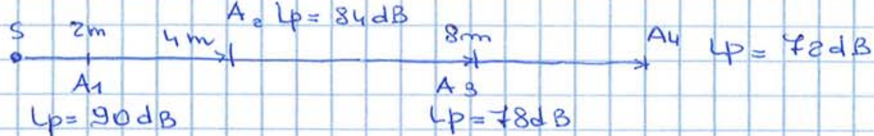
Siccome ci interessa l'effetto sinergico $\Rightarrow$ considero la somma di t e a'.

A seconda delle superfici (materiale) il suono è maggiormente assorbito o trasmesso

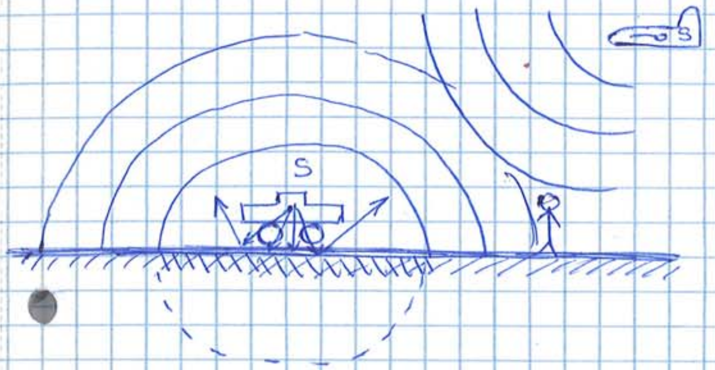
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 41 di 136

$$= 10 \log \left(\frac{W/4\pi d^2}{I_0} \cdot \frac{I_0}{\frac{W}{4\pi 4 d^2}} \right) = 10 \log 4 = 6{,}02\,dB \simeq 6\,dB$$

Esempio



Campo libero semisferico

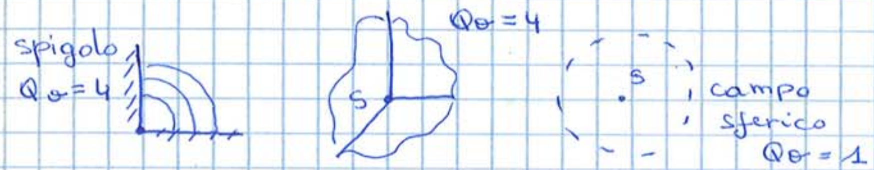


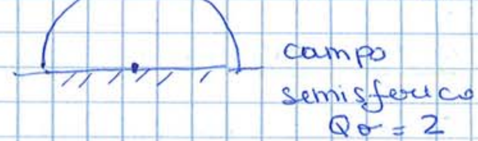
Tutta la potenza si distribuisce soltanto lungo una semisfera.

In questo caso l'intensità è:

$$\boxed{I = \frac{W}{2\pi d^2}}$$

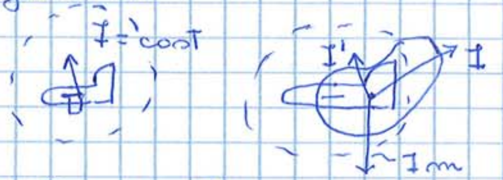
dunque $L_p = L_I = 10 \log \dfrac{\frac{W}{2\pi d^2}}{I_0}$





FATTORE di DIRETTIVITÀ: Q_θ

Tiene conto di una possibile emissione sonora non uniforme della sorgente S.



Possiamo eseguire conti più complicati.

$$Q_\theta = \underbrace{\frac{I}{I_m}}_{I\ \text{media}} = \frac{I}{W/4\pi d^2}$$

$$\boxed{I = \frac{W \cdot Q_\theta}{4\pi d^2}}$$

→ tiene conto di tutte le geometrie

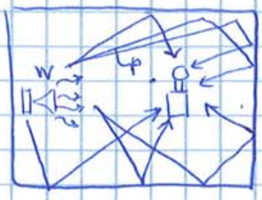
$$L_p = L_I = 10 \log \frac{W\,Q_\theta}{4\pi d^2} \Big/ I_0 =$$

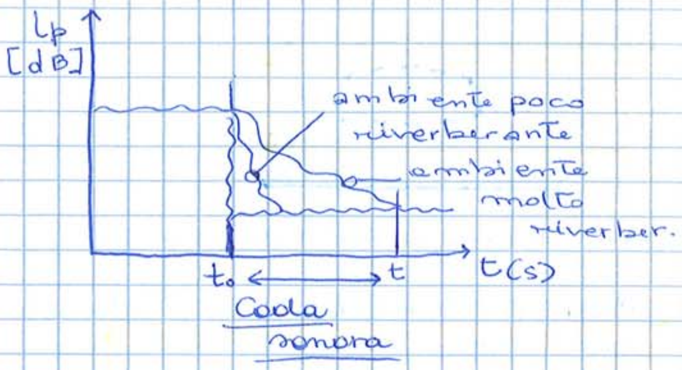
$$= 10 \log \left(\frac{W}{I_0}\right) + 10 \log \left(\frac{Q_\theta}{4\pi d^2}\right)$$

↳ W/W_0

$$\boxed{L_p = L_W - 10 \log \frac{4\pi}{Q_\theta} - 20 \log d}$$

formula generale che permette di calcolarmi L_p e L_I (poiché uguali)





Accendo il mio apparecchio affinché W si diffonda

a $t=0 \Rightarrow W=0$

Scopro che il livello non scende immediatamente a 0, ma scende lentamente o velocemente a seconda dell'ambiente $\Rightarrow$ a causa delle ONDE RIFLESSE → rafforzano il segnale acustico.

$\Downarrow$

il nostro orecchio nell'istante $W=0$ ~~perp~~ percepisce ancora delle onde fino a quando l'ultima onda non si ferma.

$\Downarrow$

CODA SONORA: ~~determina~~ le caratteristiche acustiche di un apparecchio.

- troppo corta $\Downarrow$ ambiente sordo
- troppo lunga $\Downarrow$ il suono rimbomba

Grazie alla componente riflessa c'è una concatenazione di suoni uno dopo l'altro poiché sono tardive $\Rightarrow$ MIGLIOR PERCEZIONE dei SUONI

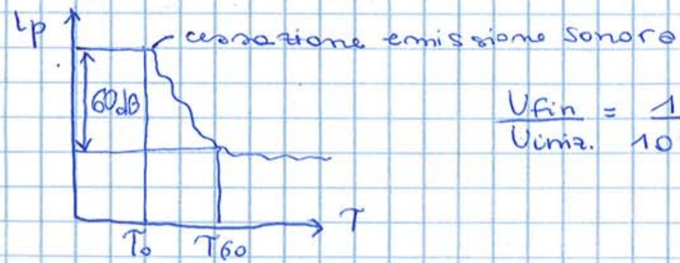
IMPORTANTE!! In termini pratici la coda sonora non deve essere eccessiva $\Rightarrow$ rischio di sentire suoni anche dopo altri.

lunghezza ADEGUATA.

Tempo convenzionale di riverberazione o T_{60}

Introduco questo concetto per permettere una misurazione convenzionale della coda sonora.

Tempo necessario affinché il Lp decresca di 60 dB oppure affinché la densità di en. sonora si riduca di un milione di volte dal momento in cui cessa l'emissione sonora della sorgente.

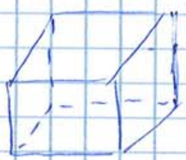


$$\frac{V_{fin}}{V_{iniz.}} = \frac{1}{10^6}$$

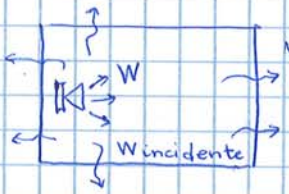
In campo libero $U = \frac{I}{c}$

In campo perfettamente riverberato
$\Downarrow$
$U = \frac{4I}{c}$ (Attenzione intensità sul piano)
$\downarrow$
prendo la metà del semispazio

Dimostrazione Sabine



Conservazione dell'energia sonora dentro la sala



$W_{assorbita} = \alpha_m \cdot W_{incid.}$
coeff. di assorbim. incidente

Conservazione energia

$E_{entr} - E_{usc} = 0$
$\Downarrow$ vale sempre
$\boxed{E_{entr} - E_{usc} = \frac{dE}{d\tau}}$

non si tiene conto della variazione di energia e quindi si tratta di un regime transitorio

Principio di conservazione della massa

$M_{entr} - M_{in} = 0$
vale solo per regime stazionario
$\Downarrow$ vale sempre
$\boxed{M_{entr} - M_{in} = \frac{dm}{d\tau}}$
variazione della massa nel tempo

Nel nostro caso:

$$\boxed{W_{emessa} - W_{assorbita} = \frac{dE_{sonora}}{d\tau}}$$

$E_{sonora} \Rightarrow U = \frac{dE}{dV} = \frac{E_{sonora}}{V}$

$\Rightarrow E_{sonora} = U \cdot V$

$$W - \underbrace{\overbrace{a_m \cdot W_{incid.}}^{W_{assorb}}}_{W_{assorbita}} = \frac{d(U \cdot V)}{d\tau}$$

$$W - a_m \cdot W_{incidente} = \frac{V \cdot dU}{d\tau}$$

$L_m = \frac{4V}{S}$ (volume)
cammino libero medio
superficie totale.

$\Rightarrow T_m = \frac{L_m}{c} = \frac{4V}{cS}$

$c = \frac{spazio}{tempo} = \frac{L_m}{T_m}$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 47 di 136

b) Analisi della coda sonora → ciò che si sente quando viene spenta la sorgente.

$$W = 0 \Rightarrow -\frac{CUA_{tot}}{4V} = \frac{V \cdot dW}{dt}$$

$$-\frac{CA_{tot}}{4V} \cdot d\Omega = \frac{dW}{dU} \Rightarrow -\int_{T_0}^{T_{60}} \frac{CA_{tot}}{4V}\, dT = \int_{U_0}^{U} \frac{dU}{U} \; *$$

$$L_p = 10 \log \frac{P^2}{P_0} = 10 \log \frac{U}{U_0} \qquad U = \frac{P^2}{\rho C^2}$$

$$T_{60} \Rightarrow \quad = 60\,dB \Rightarrow \frac{U}{U_0} = \frac{1}{1000000}$$

$$* \; -\frac{CA_{tot}}{4V} \int_{T_0}^{T_{60}} dT = \ln \frac{U}{U_0}$$

FORMULA DI SABINE

$$T_{60} = -\left[\frac{4 \overbrace{\ln U/U_0}^{\ln 10^{-6}}}{\underbrace{C}_{340\,m/s}}\right] \cdot \frac{V}{A_{tot}} = \boxed{0{,}163 \frac{V}{A_{tot}} = T_{60}}$$

vale in condizioni generali.

È una formula ottenuta con assunzioni semplificative per cui ci sono dei casi in cui non è corretto utilizzarla.

$$T_{60} = 0{,}163 \frac{V}{A_{tot}} \qquad A_{tot} = a_m \cdot S$$

CONSIDERAZIONI FORMULA SABINE

Caso particolare: camera anecoica

$a_m \rightarrow 1 \qquad T_0 = \emptyset$

se $a_m = 1 \Rightarrow A_{tot} \Rightarrow S$

$T_{60} = 0{,}163 \frac{V}{S} \neq 0 \Rightarrow$ Tende ad essere tanto più approssimato tanto più è grande a_m; è molto imprecisa per ambienti poco riverberanti

Funziona bene fino ad $A_m = 0{,}75$.

Per valori maggiori di A_m si usano formule modificate:

FORMULA DI EYRING

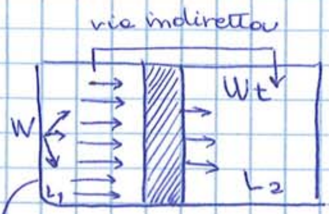
Introduce la costante acustica della scala: R

→

FONOISOLAMENTO

Tratta la trasmissione del suono fra ambienti limitrofi

$t = \frac{W_{inc}}{W_{trasm.}}$ ⇒ coefficiente di trasmissione che varia da $0 \to 1$



→ ambiente disturbato

$\Delta L = \underbrace{L_1 - L_2}_{\text{capacità di abbattimento del rumore}}$?

ambiente disturbante

Questa differenza sarà funzione di due fattori (W, caratteristiche del divisorio) ⇒ potere fonoisolante del divisorio R.

POTERE FONOISOLANTE DI UNTRAMEZZO $\boxed{R = 10 \log \frac{1}{t}}$

Se $R \uparrow$ il divisorio è in grado di abbattere il suono e non permette al suono di essere trasmesso all'ambiente disturbato.

$R = f$ (frequenza del suono) $\frac{W_{inc.}}{W_{trasm.}}$

Si può avere una trasmissione per via solida (o strutturali) ovvero una trasmissione diretta (per via aerea).

$$L_2 = 10 \log \frac{U_2}{U_0}$$

A_2 = potere fonoassorbente del locale 2

$$U = \frac{4W}{C A_{tot}} \Rightarrow U_2 = \frac{4W_2}{CA_2}$$

sostituisco

Sul divisorio inciderà una certa potenza incidente e parte di questa potenza verrà trasmessa all'ambiente disturbato

$$W_2 = W_{trasm} = t \cdot W_i$$

$$U_2 = \frac{4tW_i}{CA_2}$$

sostituisco

$$W_i = I_i \cdot S_d = I_1 \cdot S_d$$

in campo perfettamente riverberato:

$$I_i = \frac{W}{A_1}$$

→

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 51 di 136

R aumenta all'aumentare della massa superficiale ("peso parete") e che cresce anche al crescere di $f \Rightarrow$ è più facile isolare le alte frequenze che le basse

L'unico modo per 'sfuggire' ad esse è quello di utilizzare pareti pesanti.

Se la frequenza ↓ per migliorare R è necessario AUMENTARE la massa delle pareti.

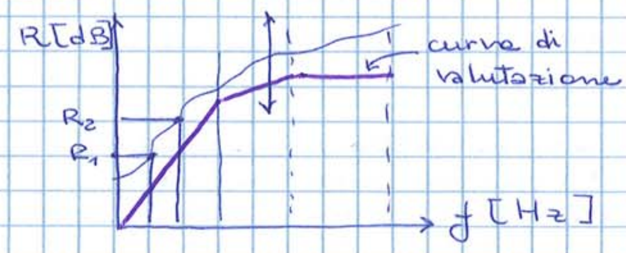
La legge della massa funziona molto bene per frequenze medie: (pag 161)

questo è dovuto a problemi di risonanza ("coincidenza")

Se il suono agisce sulle pareti in cui la frequenza è molto bassa si ha una vibrazione della parete.

Alle basse e alte frequenze le pareti sono soggette a delle vibrazioni → creano problemi su R.

INDICE DI VALUTAZIONE, I



Su questo diagramma riporto l'andamento di R per il tramezzo considerato

$$\sum_{i=1}^{n} |R_i - I_i| < 12\,dB$$

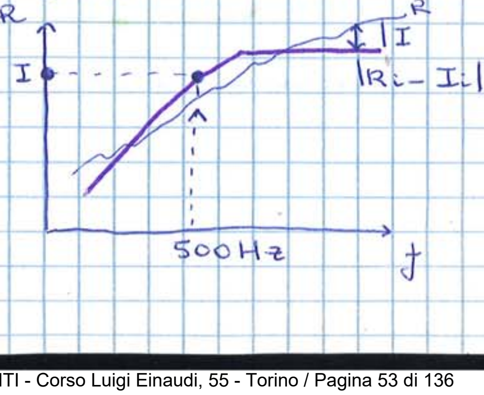
$$(|R_i - I_i|)_{MAX} < 5\,dB$$

n = bande di frequenza.

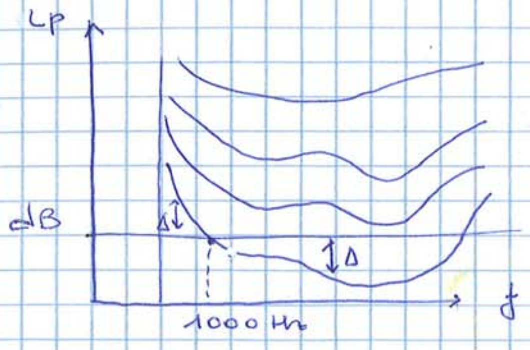
In base al tramezzo abbasso o alzo la curva di valutazione fino a farla approssimare al meglio e cioè per ogni banda di freq. ho la possibilità di calcolare la differenza tra i valori ⇒ devo cercare di muovere la curva in modo tale che la sommatoria (dei pezzettini) sia inferiore a 12 dB e che il max di tutti gli spostamenti sia minore di 5 dB.

Una volta approssimata al meglio la curva, l'indice di valutazione I è data dal valore della curva di valutazione alla frequenza di 500 Hz.

Più è alto I più è efficace



Sull'audiogramma normale considero valori di compensazione → creo delle curve che mi permettono di compensare queste differenze ⇒ CURVE di COMPENSAZIONE
pag 167



∃ Δ a seconda della curva che vado a considerare cambiano !!!
↓
dB

Curve di ponderazione → Livello ponderato A
Per es. curva di ponderazione A [dBA]

Hz	dB	KHz	dB
125	-16,1	2	+1,2
250	-8,6	3,15	+1,2
500	-3,2	4	1
1000	0	8	-1,1
		20	-9,3

Esempio

Lp = 20 dB a tutte le freq. per avere la stessa sensazione (DANNO).

125 → 20 + (16,1) → 36,1 dB ovvero 20 dB a 1000 Hz ⇒ corrispondono alla sensazione (20 - 16,1) a 125 Hz

Il calcolo del disturbo dunque non avviene sui dB 'normali' bensì su livelli ponderati, avremo dunque livelli su dBA, dBB, dBC....
8h al giorno
24h al giorno

I sistemi termodinamici possono scambiare energia con l'esterno sottoforma di:

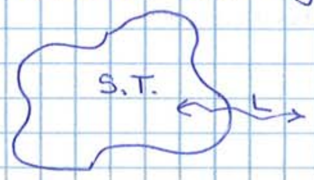
- CALORE (Q)
- LAVORO (L)

⇝ sono grandezze (energie) di scambio

Q ed L hanno senso solo come energie scambiate, non ha senso affermare: "Il calore posseduto da un corpo".

Q ed L non sono dunque proprietà dei sistemi termodinamici, sono energie [J].

Un S.T. scambia energia con l'ambiente esterno sottoforma di lavoro, quando una forza esterna applicata al contorno del sistema determina uno spostamento del punto di applicazione (ovvero determina una deformazione della superficie di controllo).

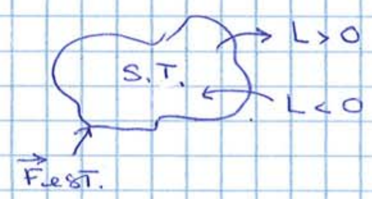


LAVORO TERMODINAMICO, L [J]

$$\boxed{L = -\int_S \vec{F}_{est.} \cdot d\vec{S}}$$

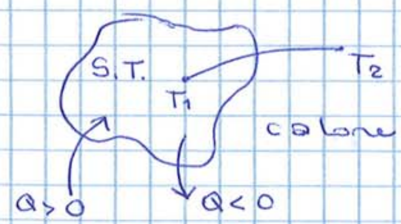
$(\vec{F}_{est} \cdot d\vec{S}) = |\vec{F}_{est}|\,|d\vec{S}| \cdot \cos\alpha$

convenzione
~~Conversione~~ di segno



CALORE, Q

Un sistema termodinamico scambia energia con l'esterno sottoforma di calore quando questo scambio è dovuto a una diff. di temperatura.



Q > 0 assorbito dal sistema
Q < 0 ceduto dal sistema

Il calore è energia in transito a causa di diff. di calore (J).

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 57 di 136

Es.

Multipli	10^9	Giga	$10^9 = 1\,GJ$
	10^6	Mega	$100\,000\,0 = 1\,MJ$
	10^3	Kilo	$1000\,J = kJ$
	1 UM		$1\,J$
Sotto Multipli	10^{-3}	Milli	$0{,}001 = mJ$
	10^{-6}	Micro	
	10^{-9}	Nano	

Per convenzione dunque si è deciso di dare alla pressione una alternativa unità di misura:

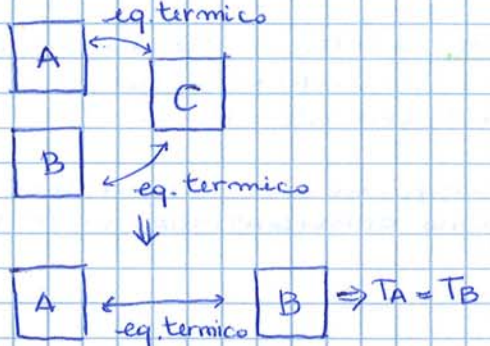
$$\boxed{1\,bar = 10^5\,Pa = 100'000\,Pa}$$

$$1\,bar \simeq 1\,atm$$

TEMPERATURA, T

Principio 0 della termodinamica (Fowler 1931): dati due sistemi termodinamici A, B, ciascuno dei quali è in equilibrio termico con un terzo S.T., C, allora anche i sistemi A e B sono in equilibrio termico tra loro.

enunciato (basato su esperimenti) che non è dimostrabile, ma che non può essere contraddetto.



Due sist. termodinamici A e B sono in equilibrio termico se hanno la stessa temperatura.

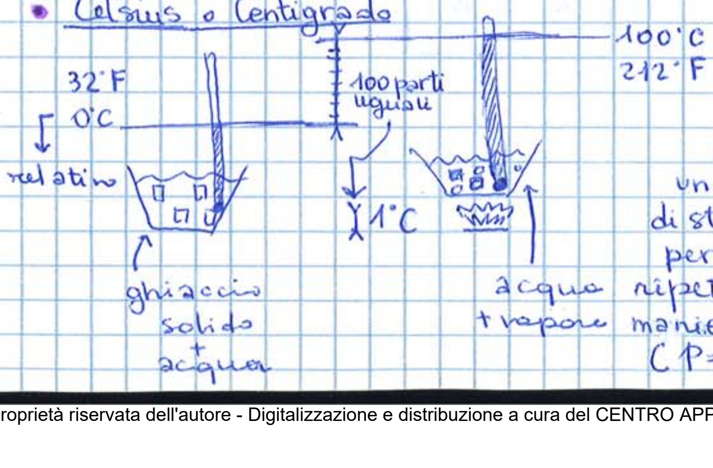
Posso enunciare un principio anche prima dell'esperimento e verificare che sia così $\Rightarrow$ forma ASSIOMATICA dei principi.

DEFINIZIONE ASSIOMATICA: esiste una grandezza di stato detta temperatura che assume lo stesso valore in sistemi termodinamici in equilibrio termico fra di loro.

SCALE TERMOMETRICHE

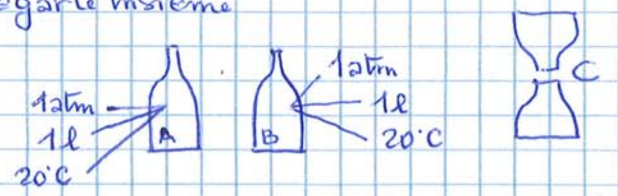
↳ facciamo entrare in gioco delle unità soggettive

- Celsius o Centigrado



Scala di temperatura empirica
↳ creare un insieme di step che mi permettono di ripetere l'esper. in maniera univoca. (P = 1 atm).
↳ procedura tramite esperimenti

Immaginiamo di avere due bottiglie di acqua da 1L e di collegarle insieme



ESTENSIVE

V = volume
M = massa
U = energia interna
H = entalpia
S = entropia

sono in funzione della massa M del sistema

INTENSIVE

T = temperatura
P = pressione

è possibile ricavare delle GRANDEZZE SPECIFICHE ⇒ che diventano INTENSIVE
(prendo le grandezze e le divido per la loro massa M).

non dipendono dalla MASSA!

$$v = \frac{V}{M} = \left[\frac{m^3}{Kg}\right]$$ volume massico o volume specifico

$$u = \frac{U}{M} = \left[\frac{J}{Kg}\right]$$ energia interna massica

$$h = \frac{H}{M} = \left[\frac{J}{Kg}\right]$$ entalpia massica

$$s = \frac{S}{M} = \left[\frac{J}{K \cdot Kg}\right]$$ entropia massica

Facendo il reciproco del volume massico:

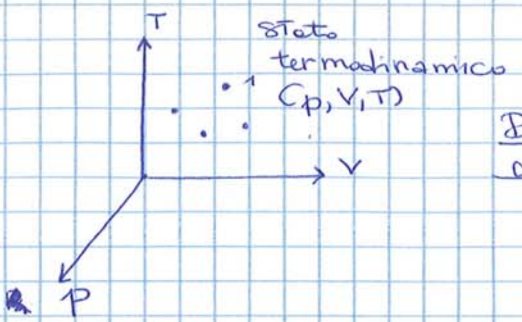
$$\boxed{\rho = \frac{1}{v} = \frac{M}{V}} \left[\frac{Kg}{m^3}\right]$$ densità o massa volumica

$$\rho = 1/v$$

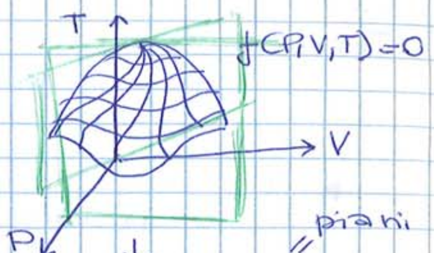
Pur non essendo Q, L grandezze di stato posso immaginare di far dipendere la loro q.tà dalla massa!

$$q = \frac{Q}{M} \left[\frac{J}{Kg}\right]$$ calore massico

$$l = \frac{L}{M} \left[\frac{J}{Kg}\right]$$ lavoro massico



Diagrammi di stato



seziono il mio diagramma per poterne ricavare una immagine in 2D

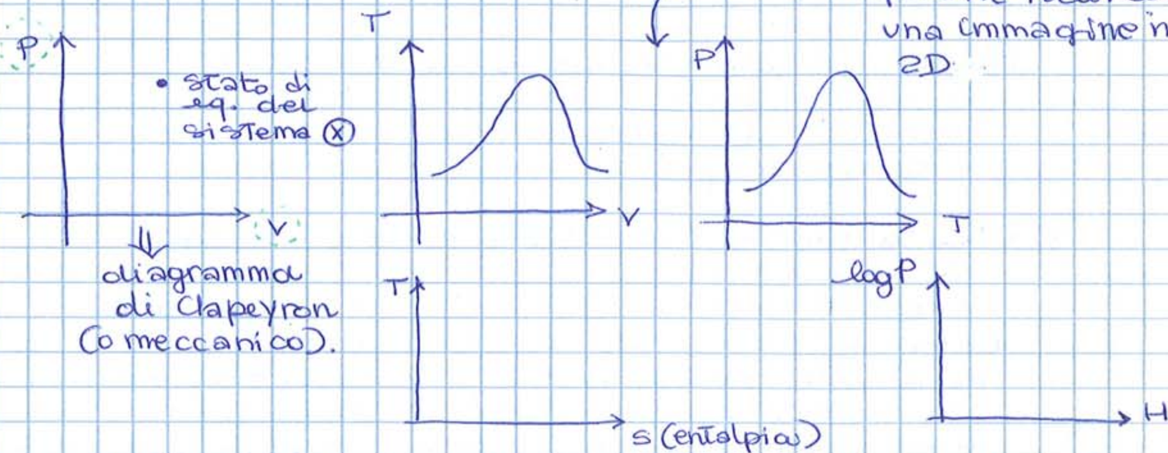
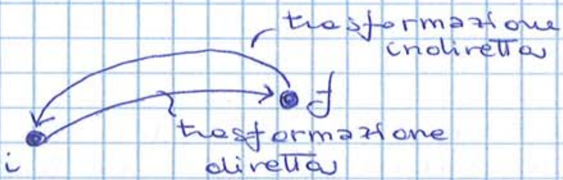


diagramma di Clapeyron (o meccanico).

⊗ è possibile evidenziarlo sul diagramma di stato.

TRASFORMAZIONE REVERSIBILE

Una trasformazione è reversibile se una volta effettuata la trasformazione è possibile invertire il senso della trasformazione tornando allo stato iniziale senza che resti traccia della trasformazione diretta e inversa dell'universo, cioè in modo tale che sia il S.T. che l'ambiente esterno non rechino traccia delle due trasformazioni diretta e inversa.



Trasf. reversibile → continua

Questo affinché avvenga prevede che la trasformazione sia una successione infinita di stati di equilibrio

Esperienza di Zemansky

Immaginiamo di prendere un sistema pistone - cilindro.

(i) il S.T. è in equilibrio alla temp. T. e con $F_{est.} = M_1 \cdot g$

produco anche calore degli attriti (sul termostato)

(i) $\xrightarrow[\text{(scambio } L' + Q)]{\text{trasformazione}}$ (f)

$\vec{F} \cdot \vec{s} = F \cdot s \cdot \cos\theta$

$\vec{F} = M_1 \cdot g$ ⇓ $\theta = \pi/2$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 63 di 136

TRASFORMAZIONE $i \to f$

$\to 1$ ma $\theta = 0$

$$L' = -\vec{F}_{est} \cdot \vec{s} = -|\vec{F}_{est}'| \cdot |\vec{s}| \cdot \cos\theta$$

$$|\vec{F}_{est}'| = (M_2 + M_1) \cdot g$$

$$|\vec{s}| = (z_1 - z_2)$$

riceve calore dall'esterno

$$L' = -(M_2 + M_1)\, g\, (z_1 - z_2) < \emptyset$$

Lavoro positivo quando il sistema PRODUCE lavoro

in questo caso devo spendere Lavoro $\Rightarrow$

espansivo
intensivo) ?

$$Q' = \begin{pmatrix} \text{Calore per} \\ \text{la compressione} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \text{calore} \\ \text{attriti} \end{pmatrix}$$

$< \emptyset$ $\quad$ $< \emptyset$

TRASFORMAZIONE $f \to i$

$$L'' = -\vec{F}_{est}'' \cdot \vec{s} = -|\vec{F}_{est}''| \cdot |\vec{s}| \cos\theta = |\vec{F}_{est}''| \cdot |\vec{s}|$$

$\theta = \pi$, $\cos\theta \to -1$

opposto alla forza

$\uparrow \vec{s}$ $\quad$ $\downarrow \vec{F}_{est}''$

$$|\vec{F}_{est}''| = (M_1 \cdot g)$$

$$\vec{s} = |z_1 - z_2|$$

$$L'' = (M_1 \cdot g) \cdot (z_1 - z_2) > \emptyset$$

$$Q'' = \begin{pmatrix} \text{calore per} \\ \text{l'espansione} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \text{calore} \\ \text{attriti} \end{pmatrix}$$

$> \emptyset$ $\quad$ $< \emptyset$

producono e forniscono calore al sist $\Rightarrow$ li dovrei cedere verso l'esterno

Al termine di $(i \to f) + (f \to i)$, l'ambiente esterno perde energia meccanica $\Rightarrow$ LAVORO

$$-L' - L'' = (M_1 + M_2)\, g\, (z_1 - z_2) - M_1 g (z_1 - z_2) =$$

$$= \Delta L = M_2 \cdot g\, (z_1 - z_2) =$$ perdita di energia potenziale della massa M_2

$$\Delta Q = |Q'| - |Q''| =$$ una quota di calore resta nel termostato

Le irreversibilità determinano delle "inefficienze", delle perdite di energia.

REVERSIBILE:

In ogni istante le variabili interne del sistema sono note e le F_{int} ed F_{est} al sistema sono in equilibrio tra loro (come anche le temperature)

⇓

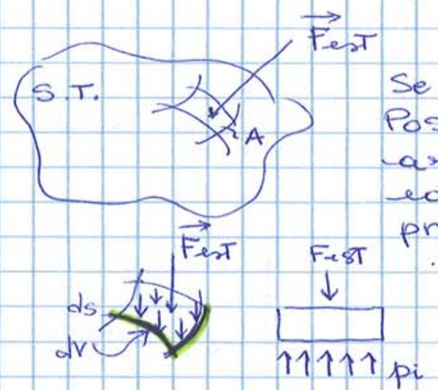
per una trasformazione reversibile è possibile determinare le energie scambiate dal sistema (Q, L) con l'esterno, in funzione delle variabili di stato interne del sistema (intensive).

LAVORO (trasf. reversibile)

In generale (per tutte le trasf.)

$$\boxed{L = -\int \vec{F}_{est} \cdot d\vec{s}}$$

↳ reversibili ed irreversibili.



Se la trasform. è reversibile ⇒ c'è equilibrio
Posso dire che da un lato della area c'è della forza esterna che è equilibrata istante per istante da una pressione interna della superficie.

$$\vec{F}_{est} = -p_i \cdot A \Rightarrow L = +\int p_i \cdot A ds \cdot \underbrace{\cos\theta}_{1}$$

$$L = \int_{\Omega} p_i \underbrace{A ds}_{dV} \Rightarrow$$

Se isocora → $V = 0$
$L_{rev} = 0$

$$\boxed{L_{Rev} = \int_V p\, dV} \Rightarrow$$ vale SOLO per trasformazioni REVERSIBILI.

$L = L_{REV} - L_W$ $\qquad L_W \geq 0$
Lavoro perso per irreversibilità

$$\boxed{L_{IRR} = \int p\, dV - L_W}$$
↓
formula generale nuovamente.

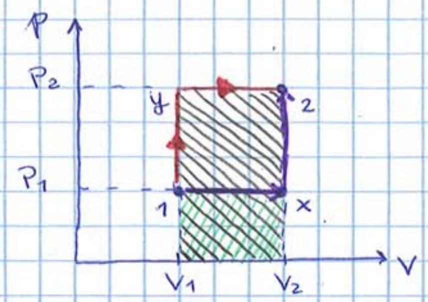
Per trasformazioni in cui il sist. produce lavoro ($L > 0$)

$$L = \overset{>0}{\int p\, dV} - \overset{>0}{L_W} < L_{rev}$$

Per trasformazioni in cui il sist. assorbe lavoro ($L < 0$)

$$L = \overset{<0}{\int p\, dV} - \overset{>0}{L_W} > L_{rev}$$

Esempio ← IMPORTANTE



Caso 1: $1 \to x \to 2$

Lavoro scambiato dal S.T. con l'esterno

$$L = \int_1^2 \delta L = \int_1^x \delta L + \int_x^2 \delta L = \int_1^x p\, dV + \int_x^2 p\, dV$$

è costante ; $\varnothing$

$$\Rightarrow p_1 \int_1^x dV = p_1 (V_2 - V_1) = L_{1 \to x \to 2} > 0$$

↳ poiché $V_2 > V_1$

area verde

Caso 2: $1 \to y \to 2$

Lavoro scambiato dal S.T. con l'esterno

$$L = \int_1^2 p\, dV = \int_1^y p\, dV + \int_y^2 p\, dV = p_2 \int_y^2 dV =$$

$\varnothing$ avviene tutto lungo V_1 ; cost.

$$= p_2 (V_2 - V_1) = L_{1 \to y \to 2} > 0$$ area nera

In questo modo abbiamo provato che δL non è un differenziale esatto !!

Riassumendo

$\left.\begin{matrix}\delta Q \\ \delta L\end{matrix}\right\}$ non sono ~~differenziali esatti~~ ⇒ in generale quindi:

$$\boxed{\oint \delta Q \neq 0 \quad e \quad \oint \delta L \neq 0}$$

Per le grandezze variabili di stato ($p, T, V, H, S, \dots$) vale sempre che

$$\boxed{\oint dx = \varnothing}$$ → vale in generale per trasform. reversibili e irreversibili.

→ dx è un DIFFERENZIALE

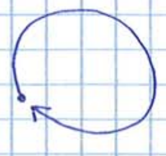
x = generica variabile di stato

Esempio

$\oint dT = 0$

$\oint dp = 0$

! ⇒ $\oint dH = 0$



$dp = p_f - p_i = \varnothing$

$p_i = p_f = 10\,bar$

$$c = \frac{\delta Q}{M\,dT} \Rightarrow \delta Q = M c\, dT \Rightarrow Q = \int \delta Q = \int_{T_1}^{T_2} M c\, dT$$

se c è costante con T $\Rightarrow \boxed{Q = M c \Delta T}$

1 Kcal = 4186 J

$1\ \text{Kcal/h} = \frac{4186}{3600}\ \text{J/s} \to \text{W}$

BTU = British Thermal Units

1 BTU = 1055,06 J

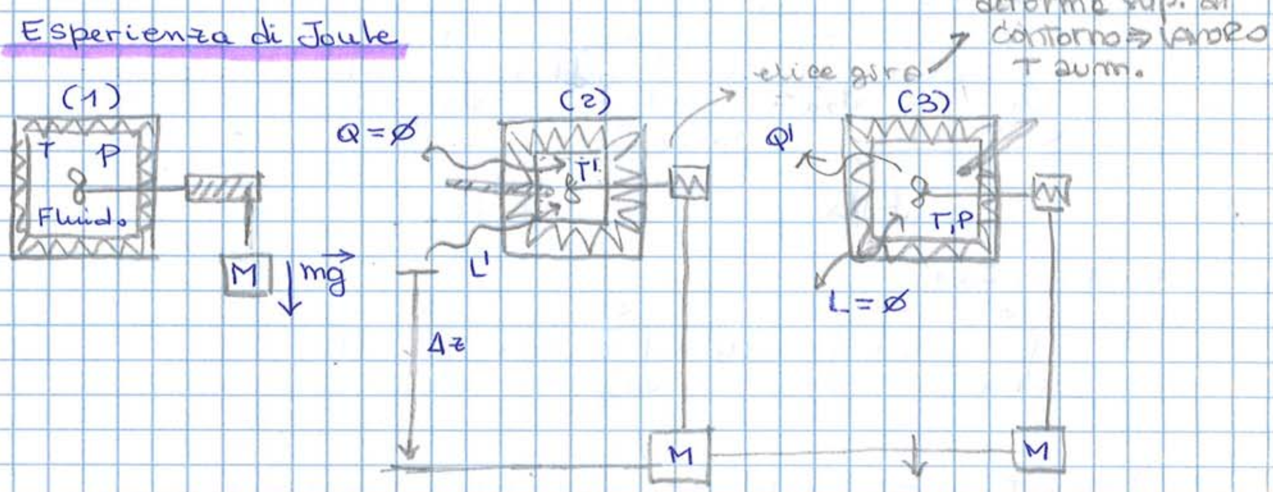
$1\ \text{BTU/h} = \frac{1055{,}06}{3600}\ \frac{\text{J}}{\text{s}} = 0{,}293\ \text{W}$

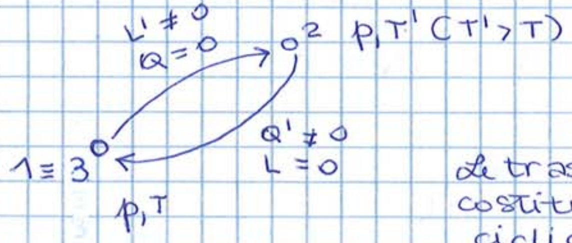
I PRINCIPIO della TERMODINAMICA (1850 Joule)

(principio di conservazione dell'energia)

Metodo INDUTTIVO → parto da esperimenti che forniscono una CONCLUSIONE di carattere generale ⇒ INDUCO UNA SOLUZIONE GENERALE.

Esperienza di Joule





si scambia CALORE ma non LAVORO → si riportano nelle stesse condiz.

Le trasformazioni 1 → 2 → 3 costituiscono una trasformazione ciclica

$\oint \delta Q$ = calore dissipato $\qquad \oint \delta L$ = lavoro assorbito dal fluido

Qualunque fosse la qtà di lavoro e indipendentem. dal fluido, in seguito a questo esperim. ottenevo sempre lo stesso risultato

$$\boxed{\frac{\oint \delta L}{\oint \delta Q} = \text{cost.} = J}$$

Siccome $\int_1^2 (\delta Q - \delta L)$ NON dipende dalla trasformazione, ma SOLO dagli estremi di integrazione $\Rightarrow$ $\delta Q - \delta L$ è un differenziale ESATTO $= dX$

Quindi $\delta Q - \delta L$ è una grandezza di stato che dipende soltanto dallo stato in cui si trova il sistema:

$X \Rightarrow$ è l'energia totale posseduta dal sistema ; E

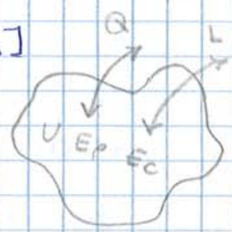
$$\boxed{\delta Q - \delta L = dE}$$ 1° principio della termodinamica (*)

dove dE è data dalla somma di tantissimi contributi ($E = U + E_c + E_p + E_{cin} \dots +$)

Quelle fondamentali sono:
↳ nelle applicazioni

U = energia interna [J]
E_c = energia cinetica [J]
E_p = energia potenziale [J]

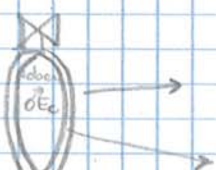
Mentre Q ed L erano energie SCAMBIATE, le altre forme di energia sono ENERGIE POSSEDUTE dal sistema.



E_{cin} = energia che il sistema possiede in virtù della sua velocità $= 1/2\, m w^2$ (velocità [m/s])

E_{pot} = energia che il sistema possiede in virtù della sua posizione $= mgr$ (distanza)

U = energia che il sistema possiede in virtù della somma delle en. cinetiche e potenziali a livelli molecolari (effetti VIBRAZIONALI)
↳ particelle che vibrano



Se la bombola è ferma
$E_c = 0$, ma esiste comunque una energia interna del sistema

(*) vale in realtà su OGNI SISTEMA $\angle$ chiuso / aperto.

CASI PARTICOLARI

$$\boxed{\delta Q - \delta L = dU + dE_c + dE_p}$$
↳ trasformazioni infinitesime

$$\boxed{Q - L = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p}$$
↳ trasformazioni finite

Ricordando che:

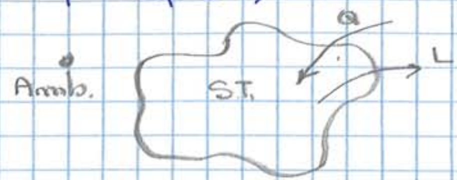
$q = \frac{Q}{m}$ $\quad l = \frac{L}{m}$ $\quad e = \frac{E}{m}$

Posso riscrivere ↳

$dq =$

→ regola che funziona poiché gli esperimenti non hanno 'negato'!

1° principio ⇒ conservazione dell'energia



Prendo un ST che prende Q dall'esterno e produce un L sull'ambiente

- Applico il 1° principio al S.T.

$\Downarrow$

en. totale del sistema termodinamico

$$Q - L = \Delta E_{ST}$$

Siccome Q ed L hanno dei segni ⇒ $+|Q| - [+|L|]$

e quindi $\boxed{|Q| - |L| = \Delta E_{ST}}$ 1)

- Applico il 1° p.d.t. all'ambiente esterno

Dal pto di vista dell'ambiente il calore è ceduto, mentre il lavoro è ricevuto $\Downarrow$

$$-|Q| - [-|L|] = \Delta E_{amb.}$$

$$\Rightarrow \boxed{-|Q| + |L| = \Delta E_{amb.}} \quad 2)$$

A questo punto chiediamoci quanto vale la variazione di energia dell'universo, ΔE_u, a seguito di questa trasformazione ↳ ambiente + ST

$$\Delta E_u = \Delta E_{ST} + \Delta E_{amb.}$$

Sostituendo 1), 2)

$$\Rightarrow \quad \Delta E_u = \cancel{|Q|} - \cancel{|L|} - \cancel{|Q|} + \cancel{|L|} = 0$$

$$\Delta E_u = 0 \rightarrow E_u = \text{costante}$$

Dunque l'energia dell'universo si conserva!

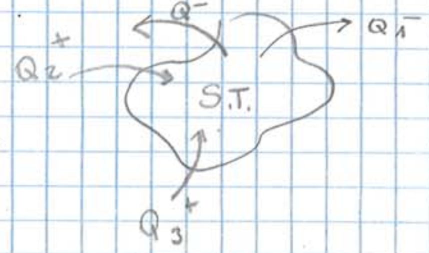
ASSIOMA (metodo DEDUTTIVO)

Esiste una grandezza legata (in funzione) di grandezze misurabili del ST e quindi funzione del S.T. la cui variazione, Δ, in assenza di variazioni di tutte le altre forme di energia possedute dal S.T. è pari alla differenza tra il calore netto scambiato dal ST con l'esterno e del lavoro netto scambiato dal ST con l'esterno.
Tale grandezza prende il nome di ENERGIA INTERNA del ST.

$$\boxed{\Delta U = Q - L}$$

calore globalmente scambiato dal ST (tenendo conto dei segni)

somma algebrica di tutti i contenuti

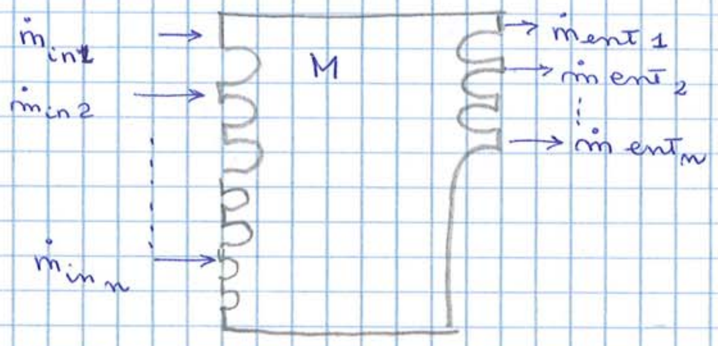


$$\oint \delta Q - \oint \delta L = \underbrace{\oint dE}_{=0}$$ perchè E è una grandezza di stato (parentesi)

$$\Downarrow$$

$$\oint \delta Q = \oint \delta L$$

PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE della MASSA o PRINCIPIO di CONTINUITÀ



$$\boxed{\sum_{i=1}^{n} \dot m_{in_i} - \sum_{j=1}^{m} \dot m_{ent\,j} = \frac{dM}{d\tau}}$$

→ caso generale

Nel caso particolare di regime stazionario ⇒ tutte le grandezze che caratterizzano il sistema non variano nel tempo

$$\Downarrow$$

$$\frac{dM}{d\tau} = 0$$

$$\boxed{\sum_{i=1}^{n} \dot m_{in_i} - \sum_{j=1}^{m} \dot m_{ent\,j} = 0}$$

→ regime stazionario

Portata in massa, $\dot m$ [Kg/s]

$$\boxed{\dot m = \frac{dm}{d\tau}}$$

Portata in volume, $\dot V$ [m³/s]

$$\boxed{\dot V = \frac{dV}{d\tau}}$$

!!! Il principio di conserv. della massa vale in generale SOLO sulla massa e non sul volume.

solo in alcuni casi

il volume è legato alla massa mediante la densità ρ

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V} \Rightarrow$$

La prima cosa che noto è che U, E_c, E_p sono grandezze di stato estensive → posso sempre calcolare la loro variazione come valore della grand. alla fine della trasform. $-$ quello all'inizio

$$\Rightarrow \quad dU = U_{fin} - U_{in.}$$

$$dE_c = E_{c\,fin} - E_{c\,in.}$$

$$dE_p = E_{p\,fin} - E_{p\,in.}$$

Il fatto che siano ESTENSIVE ⇒ mi permette di calcolare ciascuna energia come somma di contributi ⇒ $X = X_A + X_B$

- Al tempo T il S.T. è costituito dalle parti

$$\underset{\text{sez } 1 \to 1'}{\mathrm{I}} + \underset{\text{sez } 1' \to 2}{\mathrm{III}}$$

- Al tempo $T + dT$ il S.T. è costituito dalle parti

$$\mathrm{III} + \underset{\text{sez. } 2 \to 2'}{\mathrm{II}}$$

Esaminiamo:

U = energia interna

$$dU = U_{fin} - U_{in.}$$

$$U_{finale} = U_{III} + U_{II} \quad \text{(grandezza estensiva)}$$

$$U_{iniziale} = U_I + U_{III}$$

$$dU = (U_{III} + U_{II}) - (U_I + U_{III})$$

$$= U_{II} - U_I + \underset{(T+dT)}{U_{III}} - \underset{(T)}{U_{III}}$$

$\boxed{\text{NOTA}}$

In generale dovrei scrivere

$$U_{III}(T + dT) = U_{III}(T) + \frac{dU}{dT} dT$$

Se il regime è stazionario:

$$\frac{dU}{dT} = 0$$

Quindi $\quad dU = U_{II} - U_I$ → la trasf. avviene come se il volume da $1 \to 1'$ fosse uguale a quello in $2 \to 2'$ in seguito allo spostamento.

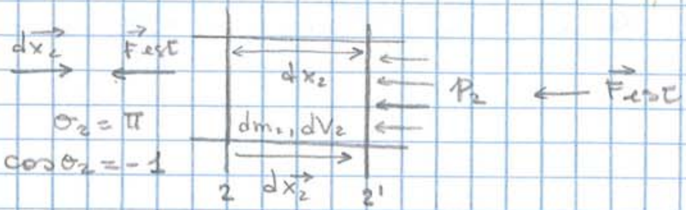
$$\Rightarrow U_{II} = u_2 \cdot dm_2$$
$$U_I = u_1 \cdot dm_1$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 79 di 136

$$dL_1 = -p_1\, dV_1 = -p_1 \cdot \underbrace{(dm_1 \cdot v_1)}_{dV_1} = (*)$$

v_1 = volume massico
$dm_1 = \dot{m}\, d\tau$

$(*) = -\dot{m}\, d\tau\, p_1 v_1$



$$dL_2 = -\vec{F}_{est} \cdot \vec{ds} = -(p_2 \underbrace{A_2\, dx_2}_{dV_2} \cdot (-1))$$

$dV_2 = dm_2 \cdot v_2$

$dm_2 = \dot{m}\, d\tau$

- $$\delta L = \dot{L}_i\, d\tau - \dot{m}\, d\tau\, p_1 v_1 + \delta L_2 =$$
$$= \dot{L}_i\, d\tau + \dot{m}\, d\tau\, (p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

$\dot{L}_i \Rightarrow$ Lavoro Tecnico
Lavoro Interno
Lavoro all'asse.

L_i è il lavoro compiuto o assorbito dal fluido (sistema termodinamico) attraverso le parti $\underset{\text{reali}}{\text{(solide)}}$ mobili del sistema

Sostituisco tutte le quantità trovate fino ad ora in:

$$\delta Q - \delta L = (dU + dE_c + dE_p)$$

$$\dot{Q}\, \cancel{d\tau} - [\dot{L}_i\, \cancel{d\tau} + \dot{m}\, \cancel{d\tau}\, (p_2 v_2 - p_1 v_1)] = \dot{m}\, \cancel{d\tau}\, (u_2 - u_1) +$$
$$+ \dot{m}\, \cancel{d\tau} \left(\frac{w_2^2 - w_1^2}{2}\right) + \dot{m}\, \cancel{d\tau}\, g\, (z_2 - z_1) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \dot{Q} - \dot{L}_i = \dot{m}\left[u_2 - u_1 + p_2 v_2 - p_1 v_1 + \left(\frac{w_2^2 - w_1^2}{2}\right) + g\,(z_2 - z_1)\right] =$$

$$= \dot{m}\left[\left(\underbrace{u_2 + p_2 v_2}_{h_2} \underbrace{- u_1 - p_1 v_1}_{-h_1}\right) + \left(\frac{w_2^2 - w_1^2}{2}\right) + g\,(z_2 - z_1)\right]$$

h_1 = entropia

$H = U + pV \qquad h = u + pv$

$$\boxed{\dot{Q} - \dot{L}_i = \dot{m}\left[(h_2 - h_1) + \left(\frac{w_2^2 - w_1^2}{2}\right) + g\,(z_2 - z_1)\right]} \longrightarrow$$

II PRINCIPIO della TERMODINAMICA (Carnot inizio '800)

Esiste una grandezza caratteristica del S.T. e funzione di grandezze misurabili, caratteristiche del S.T. (dunque grandezza di stato), la cui variazione durante trasformazioni reversibili, è data dalla seguente relazione:

$$\boxed{dS = \left(\frac{dQ}{T}\right)_{reversibile}}$$

S = entropia $\left[\frac{J}{K}\right]$

L'entropia è una grandezza di stato estensiva

$\Downarrow$

- dS è un differenziale esatto

$dS = S_{fin} - S_{iniz.}$ ($\Rightarrow$ non dipende dal tipo di trasformazione, ma solo dagli estremi.)

- $\oint dS = 0$ (SEMPRE)
- $\Delta S = \Delta S_A + \Delta S_B$

$\boxed{ds = \frac{dS}{m}} \Rightarrow \left[\frac{J}{Kg\,K}\right] \rightarrow$ entropia massica

Nel caso di processi irreversibili $\Rightarrow$ fra stati che non sono in equilibrio

$$dS > \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{irr}$$

posso trasformare la disequaz. in una equazione attraverso il valore dS_i

Equazione del 2° principio delle termodinam. $\leftarrow$ $\boxed{dS = \frac{\delta Q}{T} + dS_i}$ con $dS_i \geq 0$

T: è la temperatura assoluta in K

dS_i: pezzo di variaz. di entropia dovuto alle irreversibilità

1) Se nel termine dS_i inseriamo le irrevers. interne al sistema allora T continuerà ad essere quella del sistema.

2) Se T non è definibile e in dS_i inserisco le irrevers. interne ed esterne e considero la temperatura esterna dal sistema.

$$\boxed{dS = \underbrace{\left(\frac{dQ}{dT}\right)}_{\text{Irr. esterne}} + \underbrace{dS_{irr}}_{\text{irreversibilità interne}}}$$

Irr. esterne $\downarrow$ Scambi di calore tra diff. finita di temperat.

irreversibilità interne $\rightarrow$ per es:
- attriti
- disequilibri

$$\Delta S_u = -\frac{|Q|}{T_A} + \frac{|Q|}{T_B} \geq \emptyset$$

$$\frac{|Q|}{T_B} \geq \frac{|Q|}{T_A} \quad \text{c.v.d.} \quad \underline{\text{vera}}$$

per ipotesi $T_B < T_A$

Il 2° p.d.t. afferma che calore e lavoro sono due forme di energia vengono misurati entrambi in J, ma pone dei vincoli o restrizioni. non equivalenti

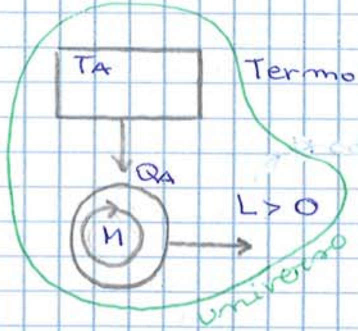
È possibile convertire $\boxed{\text{tutto}}$ il lavoro in calore, ma non sempre è possibile effettuare il contrario.

$L \rightarrow Q$ ✓

$Q \rightarrow L$ Limiti

$\underbrace{\text{esistono dei vincoli che pongono dei limiti alle trasformazioni}}_{\text{mi dice quali sono possibili e quali non lo sono.}}$ → IMPOSSIBILI

MACCHINE TERMICHE MOTRICI



M = macchina termica motrici funzionante secondo un ciclo termodinamico: percorso in senso orario sul diagramma di stato.

Perché scegliamo una trasformazione ciclica?
Poiché utilizzando una trasform. aperta il motore da $1 \rightarrow 2$ non ritorna in 1, ma ci serve una macchina che infinitamente operi dallo stato iniziale.

- Applichiamo il 1° p d.t. alla macchina

poiché trasf. ciclica $\oint dQ - \oint \delta L = \oint dU \rightarrow \emptyset \Rightarrow \oint dQ = \oint \delta L$

$$\oint dQ = +|Q_A| \qquad \oint \delta L = +|L|$$

- Applichiamo il 2° p.d.t., in particolare:

$\Delta S_{universo} \geq 0$

Siccome l'entropia è una grand. di stato estensiva

↓

A questo punto vediamo se con questa modifica la trasf. può funzionare:

- applichiamo 1° p.d.t. alla macchina

$$\oint \delta Q - \oint \delta L = \oint \cancel{dU} \to \emptyset$$

$$\underbrace{\oint \delta Q}_{\text{calore netto scambiato con l'esterno}} = \oint \delta L$$

calore netto scambiato con l'esterno $= L$

$Q_{netto} = \sum |Q|^+ - \sum |Q^-| = |Q_A| - |Q_B| = L$

$$\boxed{L = |Q_A| - |Q_B|} > \emptyset$$

- applichiamo 2° p.d.t.

$$\Delta S_{univ} \geq \emptyset \Rightarrow \Delta S_{univ} = \Delta S_{TA} + \Delta S_{TB} + \Delta S_M =$$

$$= \oint_A dS + \oint_B dS + \oint_M \underbrace{\cancel{dS}}_{\emptyset} = \int_A \left(\frac{\delta Q}{T} + \underbrace{\cancel{dS_i}}_{=\emptyset} \right) + \int_B \left(\frac{\delta Q}{T} + \underbrace{\cancel{dS_i}}_{=\emptyset} \right) =$$

Trattandosi di termostati le temperature possono essere portate fuori, in più $dS_i = 0$ poichè non ci sono irreversibilità

$$= \frac{Q_A}{T_A} + \frac{Q_B}{T_B} = -\frac{|Q_A|}{T_A} + \frac{|Q_B|}{T_B}$$

$$\Rightarrow \boxed{\Delta S_{univ} = -\frac{|Q_A|}{T_A} + \frac{|Q_B|}{T_B}} \geq \emptyset$$

$$\frac{|Q_B|}{T_B} \geq \frac{|Q_A|}{T_A}$$

$$\Delta S_{univ} \geq 0 \text{ se } \frac{|Q_B|}{T_B} \geq \frac{T_B}{T_A}$$

è necessario mettere nella macchina una qtà di calore > rispetto a quella che va via

L_{MAX} OTTENIBILE

↳ massimo lavoro possibile ottenibile dalla macchina

$$L = |Q_A| - |Q_B|$$

Esprimiamo Q_A e Q_B in funzione di ΔS_{univ}.

$$|Q_A| = \frac{T_A}{T_B} |Q_B| - T_A \cdot \Delta S_{univ}$$

$$|Q_B| = \frac{T_B}{T_A} |Q_A| + T_B \cdot \Delta S_{univ}$$

↓

η = rendimento termodinamico della macchina

$$\boxed{\eta = \frac{\text{Effetto utile}}{\text{spesa}}} \rightarrow \text{in generale}$$

Dunque:

$$\boxed{\eta = \frac{L}{Q_A}} < 1$$

(= 1 significherebbe la macchina monoterma che non si può fare).

Sostituendo a $L = |Q_A| - |Q_B|$ ottengo:

$$\boxed{\eta = \frac{L}{Q_A} = 1 - \frac{|Q_B|}{|Q_A|}}$$

↳ Lavoro in funzione del calore fornito e tolto.

$\eta_{max} = ? \iff L_{max}$ e cioè quando $\Delta S_{univ} = \varnothing$

$$\eta_{max} = \frac{L_{max}}{|Q_A|} = \left(1 - \frac{T_B}{T_A}\right) \cdot |Q_A| \cdot \frac{1}{|Q_A|}$$

$$\boxed{\eta_{max} = 1 - \frac{T_B}{T_A}} = \eta_{carnot}$$

dipende solo dalle temperature dei termostati

Il termine $\left(1 - \frac{T_B}{T_A}\right)$ è detto fattore Carnot.

NOTA T_A e T_B devono essere espresse in K

TEMPERATURE TERMODINAMICHE

$\eta_{max} = f(T_A, T_B)$

$\eta_{max} \uparrow$ (sale) se o $T_A \uparrow$ o $T_B \downarrow$

In condizioni di η_{max} (cioè L_{max}) $\Rightarrow \Delta S_{univ} = \varnothing$, per cui vale:

$$-\frac{|Q_A|}{T_A} + \frac{|Q_B|}{T_B} = \varnothing$$

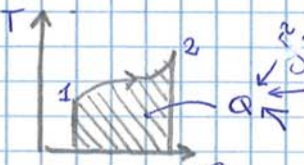
$$\boxed{\frac{|Q_A|}{|Q_B|} = \frac{T_A}{T_B}}$$

↳ pone le basi per la scala di temp. assoluta ⇒ posso misurare la temperatura con un calorimetro

Perché la trasformazioni che avvengono con scambio di calore avvengono a $T=cost$?

Poiché se la facessimo a $P=cost$ non avremmo un rendimento max $\Rightarrow$ se la temp. non fosse costante $\rightarrow$ aumenterebbe $\Rightarrow$ ci sarebbero delle IRREVERSIBILITÀ ESTERNE $\rightarrow$ scambi di temperatura finiti.

Dunque la trasformazione deve essere ISOTERMA e REVERSIBILE $\longrightarrow$ ISOENTROPICA

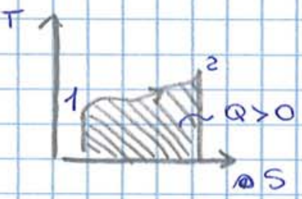


Sto implicitamente dicendo che la trasf. è reversibile $\Rightarrow$ ho disegnato un GRAFICO.
↳ rappresenta i calori scambiati da T con l'esterno.

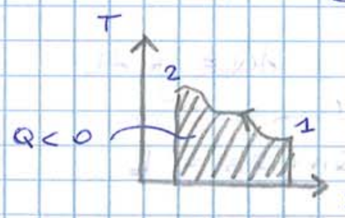
$$\int_1^2 dS = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} + \underbrace{dS_i}_{=0 \text{ reversibile}} \right)$$

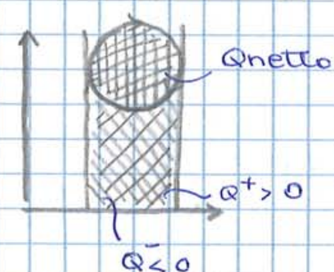
$$\int_1^2 \delta Q = \int_1^2 T\,dS = Q_{1\rightarrow 2}$$

Se $dS>0$, $Q>0$ fornito dal sistema verso l'interno



Se $dS<0$, $Q<0$ fornito dal sistema verso l'esterno





$Q_{netto} = |Q^+| - |Q^-|$

L'area racchiusa dal ciclo rappresenta il Q_{netto} scambiato dal sistema con l'esterno

- POSITIVO se percorso in senso orario (macchine motrici)
- NEGATIVO se il ciclo è percorso in senso antiorario (macchine utilizzatrici)

$\oint \delta Q = Q_{netto} < \emptyset$

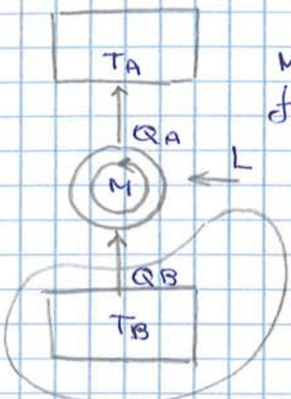
$\oint \delta Q = Q_{netto} > \emptyset$

Ed essendo $\oint \delta Q = \oint \delta L$

$\Rightarrow$ le aree racchiuse rappresentano entrambi

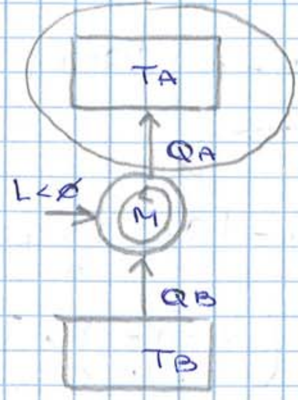
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 91 di 136

Da un punto di vista pratico la macchina frigorifera e la pompa di calore sono la stessa cosa, ciò che fa la differenza è quale calore Q_A o Q_B sfruttare.



Macchina frigorifera

Q_B = effetto utile



Pompa di calore

Q_A = effetto utile

EFFICIENZA

$$\eta = \frac{\text{effetto utile}}{\text{spesa}}$$

⇓

macchina frigorifera: ε

ε = efficienza frigorifera o effetto frigorifero unitario $= \dfrac{|Q_B|}{|L|}$ — in moduli altrimenti verrebbero dei valori negativi

Siccome $|L| = |Q_A| - |Q_B|$

$$\boxed{\varepsilon = \frac{|Q_B|}{|L|} = \frac{|Q_B|}{|Q_A| - |Q_B|}}$$

$\varepsilon \gtrless 1$

pompa di calore: COP

COP = coefficient of performance $= \dfrac{|Q_A|}{|L|}$

$$\boxed{COP = \frac{|Q_A|}{|L|} = \frac{|Q_A|}{|Q_A| - |Q_B|}}$$

$COP > 1$ ⇝ il numeratore sarà sempre maggiore del numeratore.

Esisteranno anche in questo caso COP_{MAX} e ε_{MAX}?

Massime solo quando il LAVORO al denom. è MINIMO

ε_{max} e/o COP_{max} ⟺ da ΔS_{univ} ricavo $|Q_A|$ e $|Q_B|$

$L \equiv L_{MIN}$

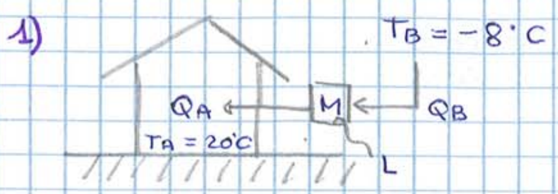
$$|Q_A| = |Q_B| \cdot \frac{T_A}{T_B} + T_A \Delta S_{univ}$$

$$|Q_B| = |Q_A| \cdot \frac{T_B}{T_A} - T_B \Delta S_{univ}$$

→

Esempi

1)



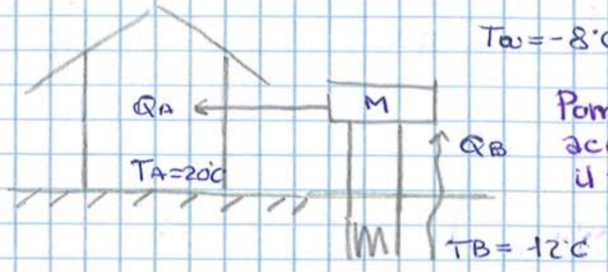
Pompa di calore aria-aria

Lavoriamo come minimo con un $\Delta T = 28°C = 28K$

$$COP_{carnot} = \frac{293}{28} = 10,5$$

$$COP(reale) \simeq 1,5 \div 2,5$$

2)



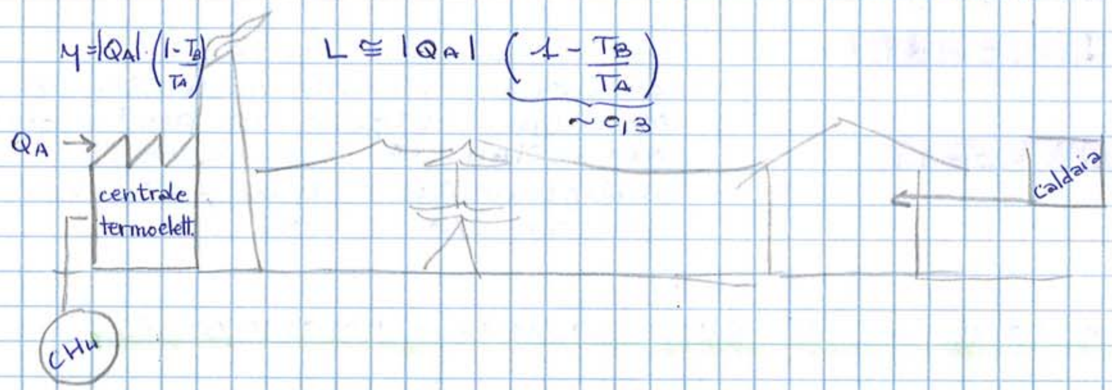
Pompa di calore accoppiata con il terreno

La temp. del terreno è quasi sempre ~~due~~ costante durante l'anno

$$\Delta T = 8°C = 8K$$

$$COP'_{carnot} = \frac{293}{8} = 36,6$$

$$COP(reale) = 4 \div 6$$



$$L \leq |Q_A| \underbrace{\left(1 - \frac{T_B}{T_A}\right)}_{\sim 0,3}$$

$$\eta = 0,85 \div 0,95$$

GAS PERFETTI

$$pV = nRT \qquad f(P, V, T) = 0$$

n = numero di moli

R = cost. universale dei gas $= 8314 \ \frac{J}{Kmol \cdot K}$

$$\frac{p\overset{v}{\cancel{V}}}{M} = \frac{nRT}{M}$$

M = massa [Kg]

v = volume massico $\left(\frac{m^3}{Kg}\right)$

$\frac{n}{M} = PM$ = peso molecolare

$$pv = \frac{R}{PM} T$$

$\frac{R}{PM} = R^*$ → costante di elasticità del Gas

$$pv = R^* T$$

$$pV = MR^*T$$

V = volume

v = volume massico

p = pressione

T = temp. assoluta [K]

Gas	PM	R^*
N_2	28	~297 J/KgK
Aria	~29	~297
H_2O_{vap}	18	~462

Energia	Exergia
Q	$\left(1-\frac{T_B}{T_A}\right) Q$
L	L
E_p	$mg\,(z - z_{rif.})$
H	$H - T_0 \cdot S \quad T_0 \equiv T_B$

Le analisi exergetiche diventano importanti nel caso dello sfruttamento di energia.

~ ∘ ~

EQUAZIONI di GIBBS e CONSERVAZIONE ENERGIA MECCANICA

1° pdt: $\delta Q - \delta L = dU$

2° pdt: $dS = \frac{\delta Q}{T} + \delta S_{irr}$

$\delta L = p\,dV - \delta L_w$

$\delta Q = T\,dS - T\,\delta S_{irr}$

$T\,dS - T\,\delta S_{irr} - p\,dV + \delta L_w = dU$

1 $\xrightarrow{dU}$ 2

Per una trasformazione reversibile

$T\,\delta S_{irr} = \varnothing \qquad \delta L_w = \varnothing$

$$\boxed{dU = T\,dS - p\,dV}$$

1ª equazione di Gibbs.

⇓

MISURARE L'ENTROPIA

Sappiamo che

$H = U + pV$

$dH = d(U + pV) = dU + p\,dV + V\,dp =$ (1ª eq di Gibbs)

$= T\,dS - \cancel{p\,dV} + V\,dp + \cancel{p\,dV}$

$$\boxed{dH = T\,dS + V\,dp}$$

2ª equazione di Gibbs.

lavoro perso per irreversibilità.

$\delta L = p\,dV - \delta L_w$

$dS = \frac{\delta Q}{T} + dS_{irr}$

entrambe irreversibili

esiste un legame?

$\delta L_w - T\,dS_{irr} = \varnothing$ → equazioni di Gibbs vere

$$\boxed{\delta L_w = T\,dS_{irr}}$$