



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 1658A -

ANNO: 2015

A P P U N T I

STUDENTE: Sordo

MATERIA: Fisica Tecnica + Eserc. Prof.Perino

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

FISICA TECNICA

Obiettivo:

Comfort ^{attraverso}  Tecniche di controllo ambientale

ILLUMINOTECNICA

Progettazione passiva + impianti

- Settore che si occupa di studiare il fenomeno luminoso e che permette di progettare degli impianti con il minor consumo possibile, impianti ottimali, nel caso in cui la luce naturale non sia sufficiente.

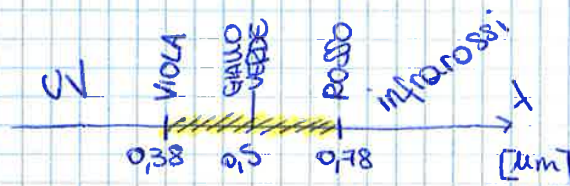
FENOMENO : **LUCE** = onda elettromagnetica

↳ **caratterizzata da una particolare lunghezza d'onda**

⇒ **LUCE** = insieme delle lunghezze d'onda delle onde elettromagnetiche a cui l'occhio umano è sensibile

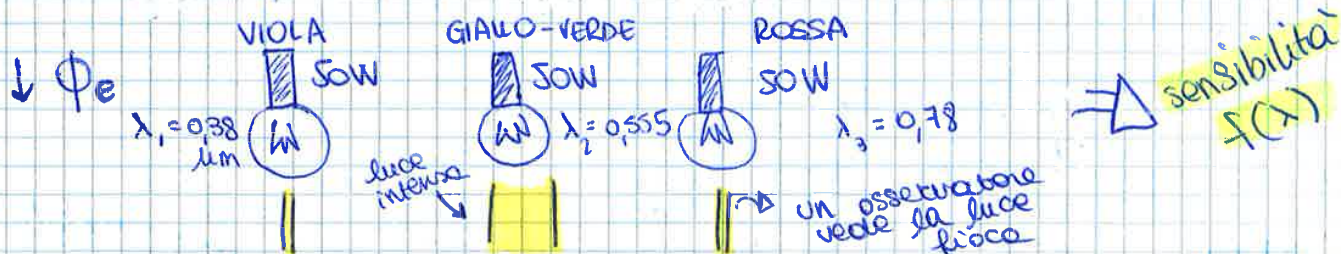
(entra in gioco la percezione, dal punto di vista fisico non c'è distinzione tra raggi x, microonde ecc...)

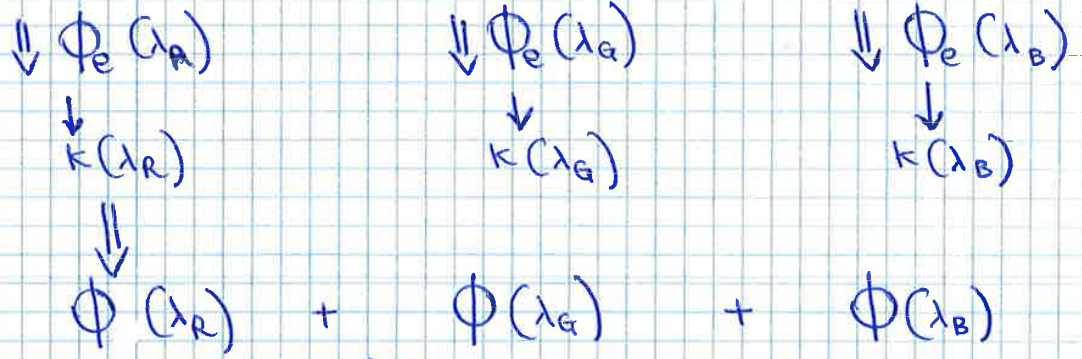
$$0,38 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 0,78 \mu\text{m}$$



- La **sensazione** che ha l'occhio umano è **diversa** a seconda della **lunghezza d'onda** ⇒ si vedono **tinte diverse**
- la luce è legata quindi ai nostri sensi
- L'intervallo di λ che vediamo viene chiamato: **CAMPO DEL VISIBILE**
- La sensibilità dell'occhio umano non è costante nel campo del visibile ma varia, cioè ci sono alcune **lunghezze d'onde** alle quali l'**occhio umano** è **più sensibile**

Ex. $\Phi_e = \text{Flusso energetico [W]}$





$$\Phi(\lambda) = K(\lambda) \frac{em}{W} \Phi_e(\lambda)$$

$\left[\frac{em}{W} \right]$
 $0 \div 1$

flusso luminoso spettrale
 o monocromatico

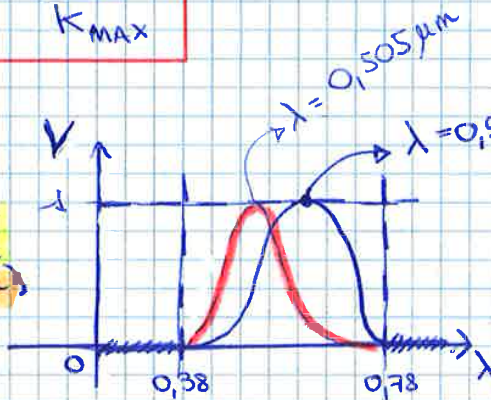
$$\Phi(\lambda) = \frac{d\Phi}{d\lambda} \quad \left[\frac{em}{\mu m} \right]$$

$$[em] \quad \Phi = \int_0^{\infty} \Phi(\lambda) d\lambda = \int_0^{\infty} K(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda$$

$v(\lambda)$ = Fattore di visibilità relativo

$$v(\lambda) = \frac{K(\lambda)}{K_{MAX}} \quad [-] \quad 0 \div 1$$

Curva di visibilità Fotopica (diurna)



\Rightarrow gli occhi sono più sensibili alla luce giallo-verde che a quella viola o rossa

Occhio umano: **coni** & bastoncelli

sensibili alla quantità di luce e alle radiazioni \Rightarrow permettono di distinguere i colori

\rightarrow per visione notturna, no percezione del colore

— Curva di visibilità scotopica (notturna)

* VISIONE FOTOPICA $\Rightarrow K_{MAX} = 683 \frac{em}{W}$

* VISIONE SCOTOPICA $\Rightarrow K_{MAX} = 1700 \frac{em}{W}$

limite di sensibilità
 In corrispondenza di questo K la luce è giallo-verde

Ex. Luci stradali \rightarrow più efficienti \Rightarrow sono giallo-arancioni, non serve distinguere i colori

SORGENTI LUMINOSE

Fonti o corpi che producono un flusso luminoso

① NATURALI: producono flusso luminoso senza bisogno di elettricità
 Consideriamo solo il SOLE e la VOLTA CELESTE

② ARTIFICIALI: esistono dal 1880 (Edison)

$\eta_{LUMINOSA}$ \rightarrow è dimensionale

In generale $\eta = \frac{\text{EFFETTO UTILE DESIDERATO}}{\text{SPESA SOSTENUTA}} \rightarrow$ è adimensionale

① $\eta_{LUMINOSA} = \frac{\Phi}{\Phi_e} \left[\frac{\text{lm}}{\text{W}} \right]$

SORGENTI NATURALI

② $\eta_{LUMINOSA} = \frac{\Phi}{W} \left[\frac{\text{lm}}{\text{W}} \right]$

\rightarrow potenza elettrica assorbita

SORGENTI ARTIFICIALI

\rightarrow FLUSSO EMESSE SOLO PER IRRAGGIAMENTO

① $\eta = \frac{k_{max} \int_0^{\infty} V(\lambda) \Phi_e(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda) d\lambda}$

$0 < V < 1$

$k_{max} = 683$

η è max quando $V = 1 \Rightarrow \lambda = 0,555 \mu\text{m} \Rightarrow \eta = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$

VALORE TEORICO MASSIMO

non viene mai raggiunto \rightarrow abbiamo sempre luce bianca

Il calore viene scambiato in 3 modi

- IRRAGGIAMENTO (anche nel vuoto)
- CONDUZIONE
- CONVEZIONE avviene tra una sorgente di calore e un fluido

Quando si hanno sorgenti artificiali il calore viene scambiato sia per irraggiamento sia per convezione mentre per le sorgenti naturali c'è solo irraggiamento

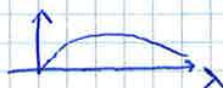
$\Rightarrow \Phi_e + W_c = W$ $W \geq \Phi_e$

SORGENTI NATURALI

SOLE \rightarrow CORPO NERO, 5800 K

\downarrow schematizzato

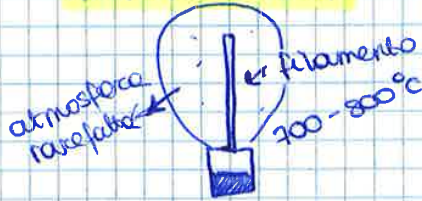
\downarrow assorbe ed emette a tutte le lunghezze d'onda



SORGENTI ARTIFICIALI

- INCANDESCENZA → ALOGENI
- LUMINESCENZA → FLUORESCENZA
- SSD → LED / OLED

INCANDESCENZA



$Q = RI^2$ → effetto joule → dissipazione di potenza

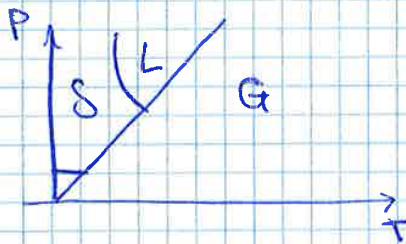
Il filamento si scalda e una piccola parte della sua potenza viene dissipata per calore, un'altra parte, la maggiore, viene trasformata in flusso luminoso

filamento di TUNGSTENO 3370 °C → T di fusione

(Piu' la T aumenta piu' aumenta l'efficienza luminosa)

Attraverso il bulbo trasparente si cerca di creare il vuoto

→ evita che si verifichi combustione a contatto con O



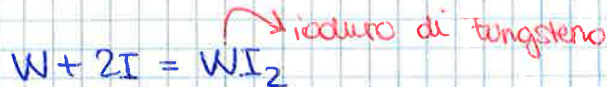
basse pressioni

↳ facilita la sublimazione

il filamento perde dei pezzi e poi il GAS raggiunge la superficie del bulbo, solidifica e la superficie si opacizza, diminuisce la T del filamento (2450 °C)

EFFETTO RIGENERANTE DEGLI ALOGENI

- W = tungsteno



il W ricade sul filamento e I migra verso la periferia della lampa da per ricominciare la sua azione rigenerante

ALOGENI → 3000 °C

TRADIZIONALI

1000 h → di funzionamento

$10 - 20 \text{ lm/W} = \eta$

ALOGENI

3000 h

$30 \text{ lm/W} = \eta$

LED → hanno un'efficienza molto alta $100 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$

$$\eta = 90 - 120 \frac{\text{lm}}{\text{W}}$$

durata 50000 h

perché i LED di potenza si scaldano e perdono in durata

DIFETTI:

- * Per potenze elevate si scaldano molto → bisogna dissipare il calore con strumenti
- * Fenomeno di abbagliamento → I molto elevate
- * tinta FREDDA

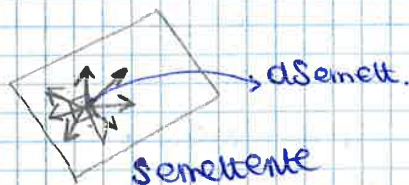
② OLED → superficie estesa, pannelli sottili funzionano con lo stesso principio dei led ma con I di luce molto bassa
→ quindi superficie estesa

GRANDEZZE FOTOMETRICHE

FLUSSO LUMINOSO per SORGENTI ESTESE

EMETTENZA = quantità di flusso luminoso emessa dalla superficie infinitesima d'emettente

(M)



$$M = \frac{d\Phi}{dS_{em}}$$

$$[M] = \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} = \text{lx sul bianco} \quad [E_{x, sb}]$$

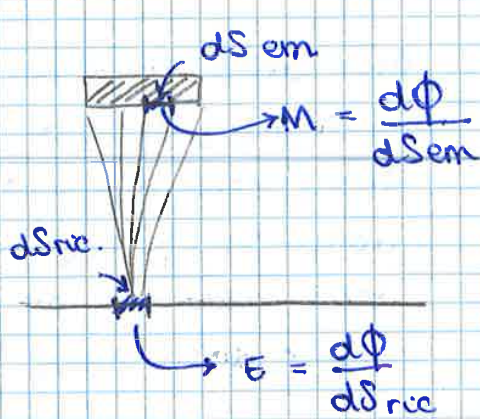
Spesso la riflessione viene usata per illuminare → è una superficie che emette luce



- È il soffitto che riflettendo la luce, fa luce

NOTA: il concetto di emettente si applica sia alle superfici delle sorgenti luminose stesse sia alle superfici che riflettono

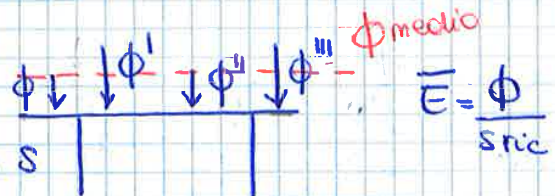
L'emettente dice quanto emette e l'area ma non quanto emette in una particolare direzione.



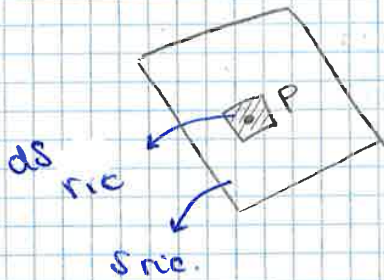
$E \rightarrow$ sup. ricevente
 $M \rightarrow$ sup. emittente

Quindi E è la grandezza "base", il requisito fondamentale su cui si basa il progetto illuminotecnico.

NOTA: usiamo $d\phi$ perché non è detto che i flussi siano tutti uguali su S



ma l'illuminamento introdotto in precedenza è un valore puntuale (rapporto tra infinitesimi) e non un valore medio (quando non usiamo gli infinitesimi).



$$E_p = \frac{d\phi}{dS_{ric}}$$

→ illuminamento in un punto (nell'area che circonda il punto ma essa è infinitesima, la faccio coincidere con il punto)

≠

$$\bar{E} = \frac{\phi}{S_{ric}}$$

→ illuminamento medio

$$\bar{E} = \frac{\sum_{s=1}^n E_s \cdot \Delta S}{S_{ricev.}} = \frac{\int_S E(p) dS}{S_{ric.}}$$

$$\bar{E} = \frac{1}{S_{ric}} \int_{S_{ric}} E(p) dS$$

② Mezzo trasparente ideale \leadsto è solo un modello fisico-matematico

$$\tau_e = 1 \quad \alpha_e = \rho_e = 0$$

↓
non lo vedo

③ Mezzo trasparente reale (es. vetro)

$$\alpha_e + \rho_e + \tau_e = 1$$

④ Specchio (o riflettore) ideale \leadsto modello fisico-matematico

$$\rho_e = 1 \quad \alpha_e = \tau_e = 0$$

⑤ Corpo nero (ideale) \leadsto modello fisico-matematico

$$\alpha_e = 1 \quad \rho_e = \tau_e = 0 \quad \forall \lambda$$

↓
assorbe tutta la luce

NOTA: tali valori dei coefficienti α_e, ρ_e, τ_e sono validi solo per la luce ($0,38 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 0,78 \mu\text{m}$)

Ex. Neve \leadsto quasi come uno specchio, con $\rho_e \approx 1$ considerando gli infrarossi è nera $\rho_e \approx 0$

NOTA: α_e, ρ_e, τ_e sono dei valori medi

\leftarrow calcolati sperimentalmente

$$\alpha_e = \frac{1}{(0,78 - 0,38)} \int_{0,38}^{0,78} \alpha(\lambda) d\lambda$$

$$\rho_e = \frac{1}{(0,78 - 0,38)} \int_{0,38}^{0,78} \rho(\lambda) d\lambda$$

$$\tau_e = \frac{1}{(0,78 - 0,38)} \int_{0,38}^{0,78} \tau(\lambda) d\lambda$$

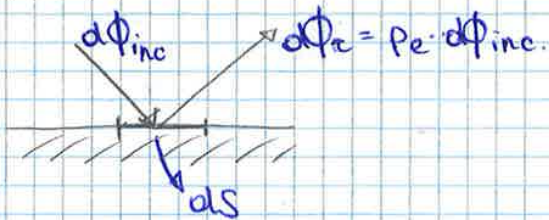
per tutte le lunghezze d'onda (non solo per la luce)

$$\alpha = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \alpha(\lambda) d\lambda$$

$$\alpha, \rho, \tau \Rightarrow f(\lambda, \varepsilon)$$



Ex. quando ci specchia in un vetro se esso non è \perp a noi per $\varepsilon = 0$ ρ molto basso



ρ_e = coeff. di riflessione luminosa della superficie

Posso vedere la superficie dS in 2 modi

- ricevente
- emittente (dal punto di vista illuminotecnico)

$E = \frac{d\phi_{inc}}{dS}$ $M = \frac{d\phi_{em}}{dS} \rightarrow d\phi_r$

$$M = \frac{\rho_e d\phi_{inc}}{dS} = \rho_e E$$

$L = \frac{\rho_e E}{\pi}$

→ valido solo per superfici lambertiane

ILLUMINAZIONE Artificiale

Le sorgenti luminose sono inserite in un sistema più complesso detto apparecchio luminoso.

Necessario perché: [RAGIONI TECNOLOGICHE - PRATICHE]

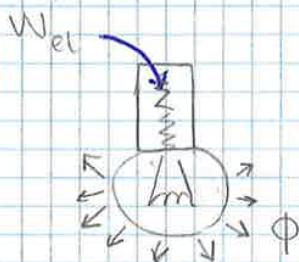
- ISOLAMENTO ELETTRICO → evitare di prendere la scossa
- ISOLAMENTO MECCANICO → evitare che la sorgente possa essere toccata o rotta
- PROTEZIONE, ad esempio lampadina esposta alle intemperie

[RAGIONI ILLUMINOTECNICHE]

- consentire di sagomare il flusso luminoso attraverso delle superfici riflettenti o ottiche opportune (lenti)



Attraverso fenomeni di riflessione, rifrazione, diffusione si può sagomare il flusso luminoso e indirizzarlo dove si vuole.

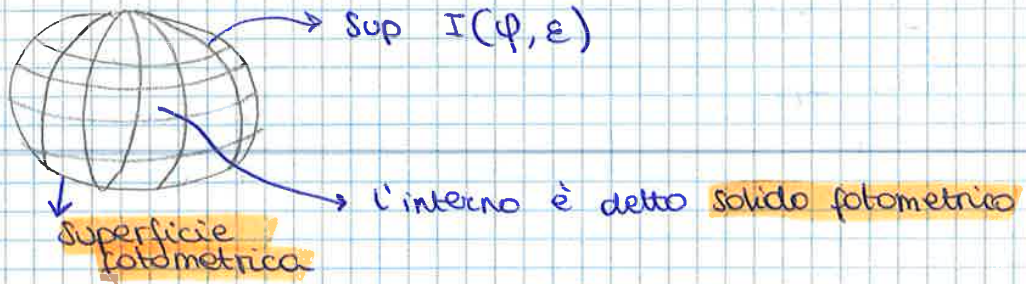


$$\eta = \frac{\phi}{W_{el}} \quad \frac{lm}{W}$$

$$\eta = K_{max} \frac{\int_0^{\infty} v(\lambda) \phi_e(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} \phi_e(\lambda) d\lambda}$$

$$\eta_{max} = K_{max} = 683 \text{ lm/W}$$

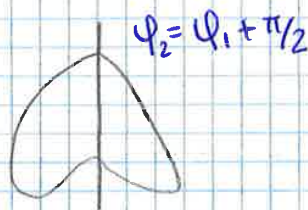
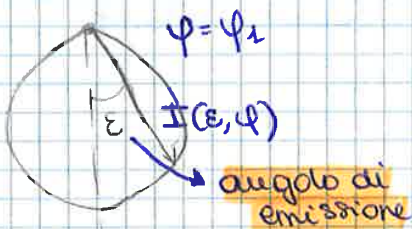
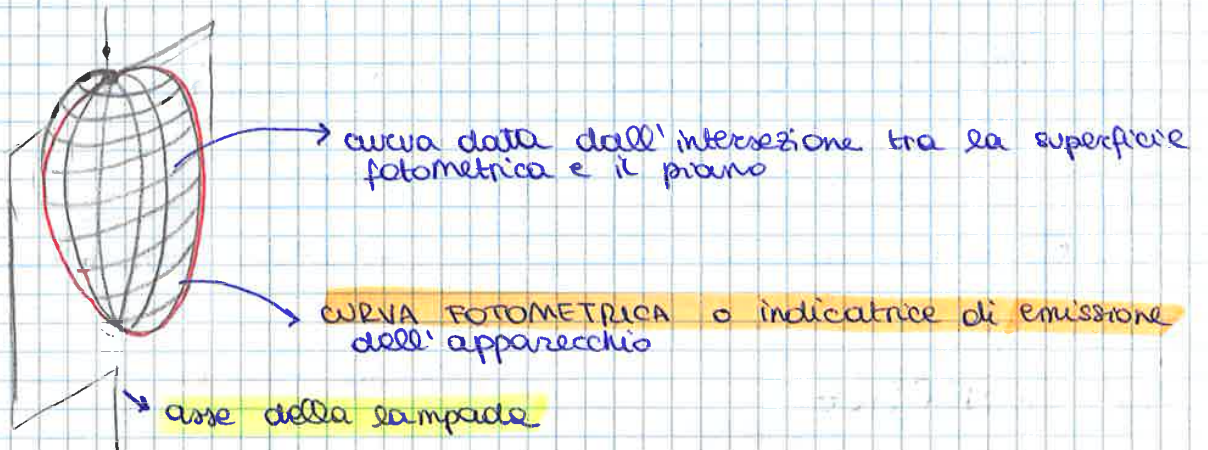
ri dell'intensità luminosa



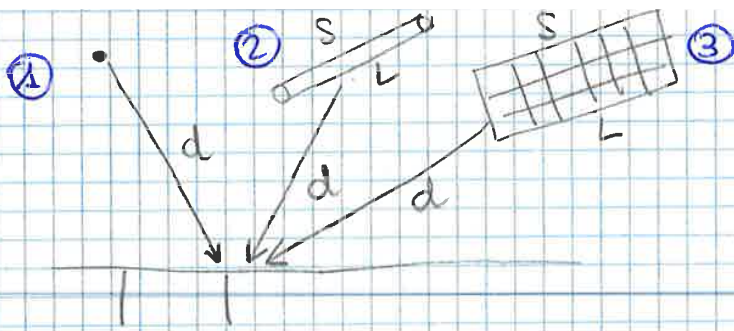
Gli apparecchi luminosi si scelgono anche in base al solido fotometrico



Il solido fotometrico viene sezionato da piani



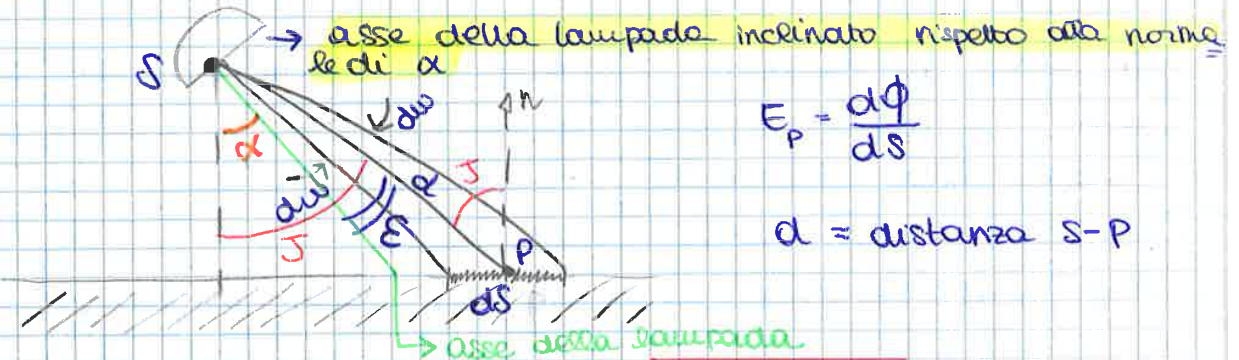
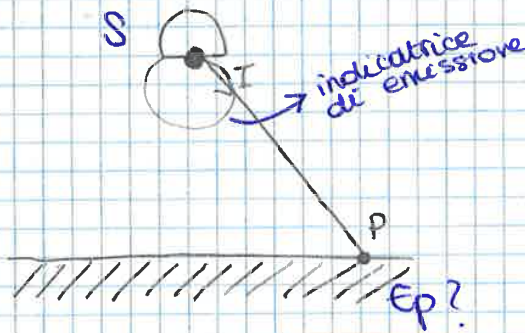
L'angolo $d\varphi$ è l'angolo che viene usato per tagliare il solido, dato che $I(\varepsilon, \varphi)$ bisognerebbe usare tante curve fotometriche a seconda dell'angolo φ → per semplicità nella realtà si usano solo 2 indicatori di emissione corrispondenti a due piani ortogonali ($\varphi_1, \varphi_2 = \varphi_1 + \pi/2$)



ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE DI ESTERNI

- Quanto deve essere grande l'apparecchio illuminante affinché ci sia in tutte le aree un illuminamento adeguato?

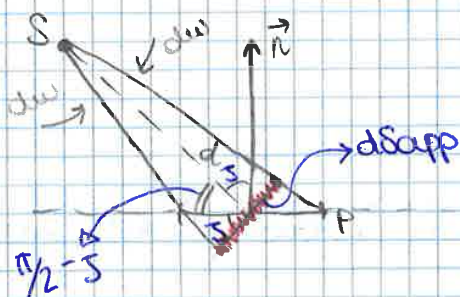
Calcolo dell'illuminamento su un punto di una superficie dovuto ad una sorgente puntiforme



$$E_p = \frac{d\phi}{ds}$$

d = distanza S-P

$$I = \frac{d\phi}{d\omega} \rightsquigarrow d\phi = I d\omega \rightsquigarrow E_p = \frac{I d\omega}{ds}$$



$$d\omega = \frac{ds_{app}}{d^2}$$

$$ds_{app} = ds \cos J$$

$$d\omega = \frac{ds \cos J}{d^2}$$

\hat{J} = angolo di incidenza

$$\hat{J} = \hat{\alpha} + \hat{\epsilon}$$

⇒ Obiettivi del progetto:

① garantire in tutti i punti della superficie un $E_p > E_{min}$

↓
fissato da norme/leggi

② Garantire un illuminamento il più uniforme possibile su tutta la superficie. ⇒ $U_o > U_{o min}$ e $U_e > U_{e min}$

↓
fissati dalla normativa

UNIFORMITÀ DI ILLUMINAMENTO

$$U_o = \frac{E_{min}}{\bar{E}}$$

\bar{E} illuminamento medio sulla superficie

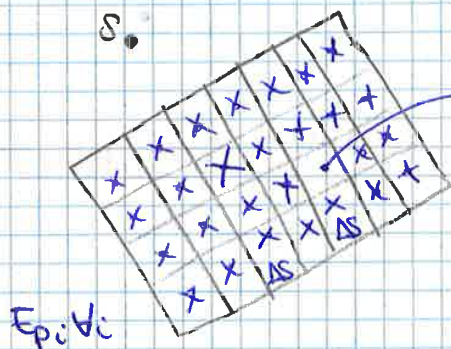
$$U_e = \frac{E_{min}}{E_{max}}$$

U_o = fattore di uniformità generale

U_e = fattore di uniformità longitudinale

variano tra 0 e 1

PROGETTO



E è cost sull'area AS

Calcolo l'illuminamento nei baricentri di ognuna delle aree poi calcolo

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i \Delta S_i}{S_{TOT}}$$

$$\bar{E} = \frac{\Phi_{sulle\ sup}}{sup} = \frac{1}{S} \int E_p ds \approx \frac{\sum_{i=1}^n E_i \Delta S_i}{S_{TOT}}$$

$E_{p min} = \min(E_{p_i}) \Rightarrow$ verificare se $E_{p min} > E_{min}$

$E_{p max} = \max(E_{p_i})$

$U_o = \frac{E_{min}}{\bar{E}} \Rightarrow$ verificare se $U_o > U_{o min}$

- ho messo una lampada troppo potente se $E_{p min} > E_{min}$
- se $E_{p min} < E_{min}$ lampada troppo poco potente

$$\Phi_{\text{eff}} = \frac{\bar{E} \cdot S}{DM C_0}$$

flusso nominale o effettivo

tiene conto del decremento delle prestazioni della sorgente

D = coeff. di deprezzamento

M = coeff. di manutenzione

↓ tiene conto del decremento delle prestazioni dell'apparecchio

$$D \text{ e } M < 1$$

$$\left\{ \begin{array}{l} D \simeq \text{ compreso tra } 0,85 \text{ e } 0,90 \\ M \simeq \text{ " } \text{ tra } 0,55 \text{ e } 0,80 \end{array} \right.$$

$$\Phi = \int_{4\pi} I d\omega \rightarrow \text{flusso che abbiamo, flusso che viene emesso}$$

ILLUMINAZIONE D'INTERNI

Fino al 2011 la norma a cui si faceva riferimento era la UNI 10380 poi sostituita da UNI EN 12464 (del 2011)

Requisiti:

- 1 Illuminamento, U uniformità di E
- 2 Contrasto
- 3 Abbagliamento
- 4 Resa del colore

- 1 La normativa stabilisce dei valori medi di E a seconda del tipo di locale ad esempio UFFICIO $\bar{E} = 500 \text{ lx}$, AULA DI DISEGNO $\bar{E} = 750 \text{ lx}$, LOCALE PER USO DOMESTICO $\bar{E} = 300 \text{ lx}$.

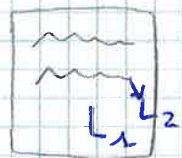
$$U_0 = \frac{E_{\text{min}}}{\bar{E}} > 0,8 \rightarrow \text{stabilito dalla normativa}$$

$$C = \frac{|L_2 - L_1|}{L_1}$$

↓ fattore di contrasto

← luminanza dello sfondo nel caso del foglio

→ In generale L_1 e L_2 sono le luminanze di due punti vicini nel campo visivo



Non ci deve essere troppo contrasto tra l'oggetto considerato e gli oggetti nell'immediata circostanza.

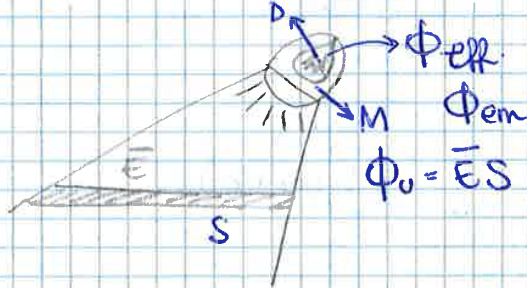
$C < 3$ da normativa → tra oggetto e piano di lavoro

* **Rea del colore**: è un intervallo rapportato all'indice di resa cromatica, può assumere valori: 1A, 1B, 2, 3, 4. Generalmente sono richiesti i valori 1A, 1B.

PROGETTO

METODO DEL FLUSSO TOTALE

→ problema → **REFLESSIONE** (solo nel caso di illuminazione d'interni)



→ Se la distanza lampada-piano utile aumenta il flusso utile diminuisce

$$\Phi_{em} = \Phi_{eff} \cdot D \cdot M$$

↳ **pezzo** che emetterebbe solo la sorgente (solo il filamento)

$$C_u = \frac{\Phi_u}{\Phi_{em}} \Rightarrow \Phi_{em} = \frac{\Phi_u}{C_u} \Rightarrow \frac{\Phi_u}{C_u} = \Phi_{eff} \cdot D \cdot M \rightsquigarrow \Phi_{eff} = \frac{\Phi_u}{C_u \cdot D \cdot M}$$

$$\rightsquigarrow \Phi_{eff} = \frac{\bar{E} \cdot S}{C_u \cdot D \cdot M}$$

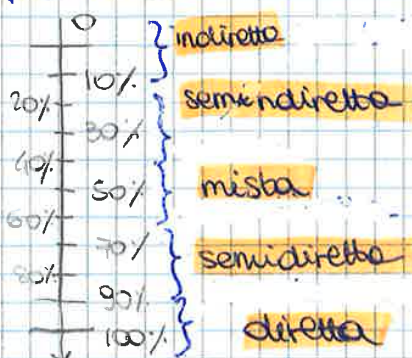
$$\Phi_{app} = \Phi_s \cdot n_s$$

↳ sorgente singola

$$n_{app} = \frac{\Phi_{eff}}{\Phi_{app}} \rightsquigarrow \text{approssimo per eccesso per garantire } E_{min}$$

* C_u dipende dal colore delle pareti, dalla geometria del locale e dal tipo di apparecchio.

• La forma dell'apparecchio può modificare la forma del solido fotometrico



% del flusso luminoso verso il basso

ILLUMINAZIONE NATURALE D'INTERNI

- Si fanno calcoli senza tener conto delle dimensioni ^(forma) e della posizione delle finestre ma si tiene conto solo dell'area

$$FLD = \frac{E_i}{E_o}$$

E_i ← illuminamento orizzontale in un p.to dell'ambiente interno
 E_o ← illuminamento orizzontale all'esterno
 ↳ fattore di luce diurna • puntuale

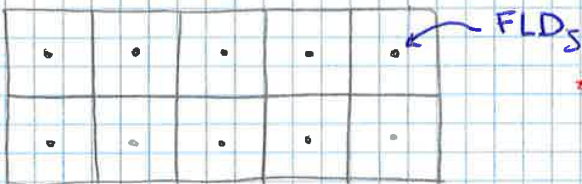
- L'illuminamento è preso all'orizzontale e si tiene conto solo dell'illuminamento diffuso e senza ostacoli

$$FLD_m = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N FLD_s$$

\downarrow medio

- i valori degli FLD_s devono riguardare aree uguali (per poter fare la media aritmetica)

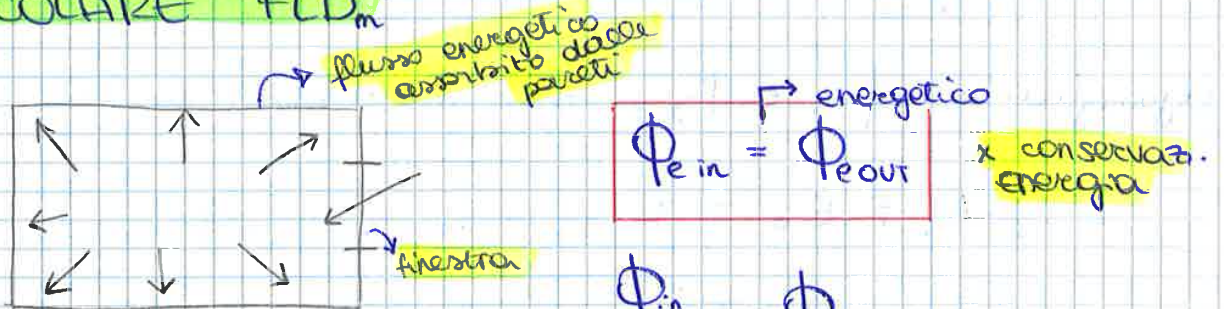
locale in pianta:



← divido il locale in aree uguali

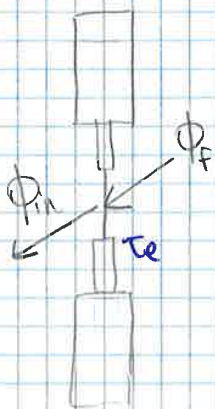
Per i locali residenziali la normativa richiede $FLD_m > 2\%$
 ma per un aula $FLD > 3\%$

CALCOLARE FLD_m



$$\frac{\Phi_{in}}{\eta} = \frac{\Phi_{out}}{\eta}$$

x rendimento per sorgenti luminose naturali
 → possiamo parlare di flusso luminoso e non di energetico

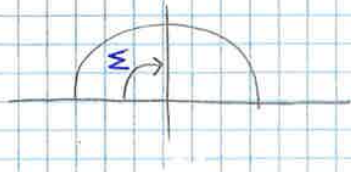


$$\Phi_f = E_f \cdot A_v$$

A_v → area della finestra al netto dei montanti (area parete vetrata)
 ↳ illuminamento verticale

T_e → la finestra assorbirà in minima parte la luce → coeff. di trasmissione del vetro

FATTORE FINESTRA



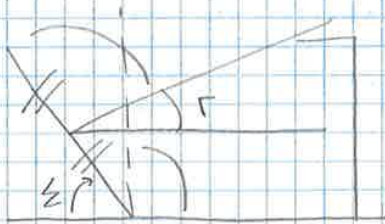
$F = 0,5$ se la finestra è verticale

In generale

$$F = \frac{1 + \cos \varepsilon}{2} \quad (1)$$

Se il cielo è isotropo (guardare a NORD o a SUD è la stessa cosa) \rightarrow vero se il cielo è coperto

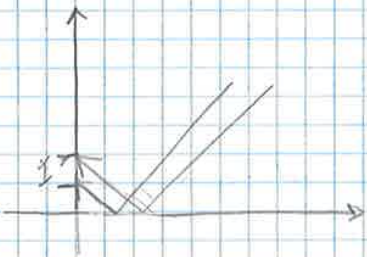
- La (1) è valida se non si hanno delle ostruzioni davanti alla finestra.



$$F = \frac{1 + \cos(\varepsilon + \gamma)}{2}$$

↑ elevazione media delle ostruzioni sull'orizzonte

RIFLESSIONE DEL TERRENO



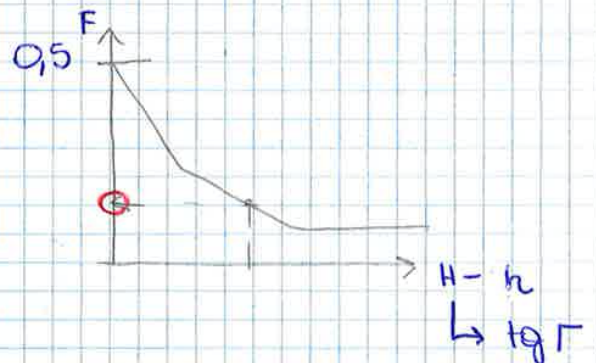
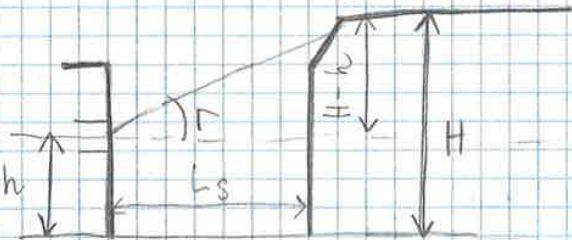
$$1 - F = \frac{1 - \cos(\varepsilon + \gamma)}{2}$$

↓
porzione che vediamo di terreno e di altri oggetti

$$F = \frac{1 + \cos(\varepsilon + \gamma)}{2} + P_t \frac{1 - \cos(\varepsilon + \gamma)}{2}$$

^{0 se non c'è ostruzione}
 ↓
 coeff. di riflessione del terreno

3 tabelle per leggere $F(\varepsilon)$



→ Se sono a Torino garantisco 200 lx per 83% del tempo, per il restante 17% devo utilizzare illuminazione artificiale

ACUSTICA

È un sottoinsieme dello studio della generazione e propagazione delle oscillazioni (vibrazioni) nei mezzi elastici.

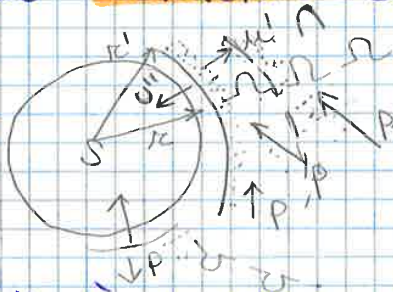
→ L'orecchio è sensibile a oscillazioni la cui frequenza è compresa tra 20 e 20000 Hz

⇒ Acustica = studio della generazione e propagazione delle oscillazioni nei mezzi elastici alle frequenze a cui è sensibile l'orecchio

> 20.000 Hz → **ULTRASUONI**

< 20 Hz → **INFRASUONI**

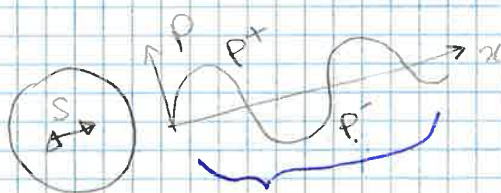
FENOMENO: **OSCILLAZIONE** in un mezzo elastico, si genera dalla vibrazione di un solido che nel caso dell'acustica è detto **SORGENTE SONORA**.



Considero una sfera di un materiale elastico e la faccio espandere ⇒ il primo strato di aria si comprime, la pressione aumenta, ma poi poiché

l'aria è un mezzo elastico successivamente comprime lo strato successivo e il precedente ritorna in condizioni normali ⇒ **PROPAGAZIONE DELLA PRESSIONE**, il fenomeno opposto (**PROPAGAZ. DI DEPRESSIONE**) si ha se la sfera si contrae

Se considero il fenomeno tutto insieme, espansione e compressione ciò che si ottiene è un'onda elastica.



ONDA ELASTICA
20 < f < 20000 Hz

Valore di pressione che aumenta e diminuisce alternandosi da S si chiama **ONDA DI PRESSIONE ACUSTICA**.

- ARIA → gas ideale

$$PV = nRT \rightsquigarrow \text{il modulo di compressione dipende dalla temperatura}$$

Per i gas perfetti:

$$c = \sqrt{\gamma R^* T} \quad [K]$$

R^* = costante di elasticità del gas

↳ dipende dal tipo di gas

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

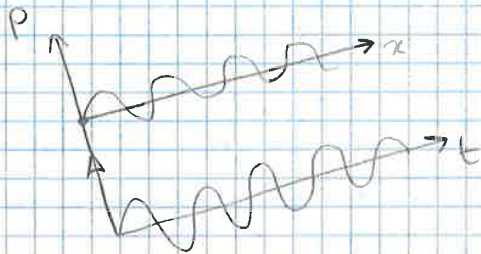
Per l'aria $\left\{ \begin{array}{l} \gamma = 1,4 \\ R^* = 287 \text{ J/kgK} \end{array} \right.$

A $t = t_{\text{ambiente}} \rightsquigarrow 20^\circ\text{C} = 293 \text{ K}$

$$c = 343 \text{ m/s}$$

NOTA: la luce poiché è un'onda elettromagnetica si può propagare anche nel vuoto. Il suono poiché è un'onda elastica ha bisogno di un mezzo elastico per propagarsi.

ONDE ELASTICHE



$$\Delta P(x, t)$$

S

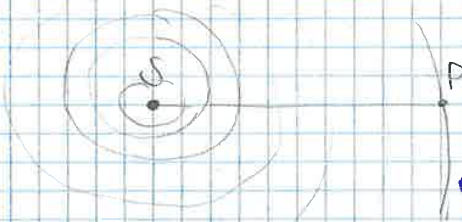
Conoscenza del CAMPO di una grandezza \Leftrightarrow sapere il valore dello spazio e del tempo quanto vale tale grandezza.

$$\nabla^2(\Delta P(t)) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Delta P(t)}{\partial t^2} \quad \left. \begin{array}{l} \text{↳ tempo} \end{array} \right\}$$

$$\nabla^2 u(t) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u(t)}{\partial t^2}$$

Equazione differenziale dell'onda sonora (o acustica)

CASO PARTICOLARE



↳ osservatore abbastanza lontano da S

↳ Posso approssimare il fronte dell'onda con un piano

→ Per l'aria a $T = 20^\circ\text{C} \Rightarrow \rho \approx 1.2 \text{ kg/m}^3$ e diminuisce di $\approx 0,7 \text{ kg/m}^3$ $\forall 1^\circ\text{C}$ di incremento di T

$$\Delta p(t) = \rho c \cdot v(t)$$

→ onda di velocità di oscillazione e di pressione sono in FASE tra loro (hanno tutte e due $(t - \frac{x}{c})$)

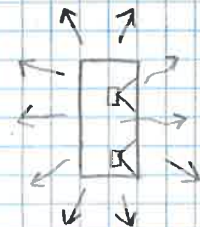
Se $v(t) \perp c \rightarrow$ ONDA TRASVERSALE

Se $v(t) \parallel c \rightarrow$ ONDA LONGITUDINALE \rightarrow ONDA SONORA

POTENZA SONORA W [W]

Potenza emessa dalla sorgente sonora.

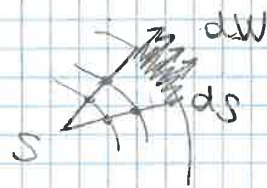
- La potenza sonora è sempre molto piccola
- Non è detto che la potenza sonora sia emessa in modo uniforme in ogni direzione dello spazio.



INTENSITA' SONORA [W/m²]

$$I = \frac{dW}{ds}$$

ds = superficie infinitesima del fronte d'onda



Cambiando il fronte d'onda cambia l'intensità sonora poiché cambia ds , mentre dW resta uguale.

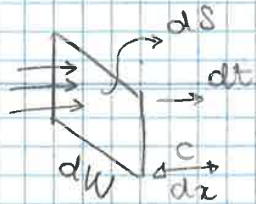
$$I = f(\Delta p(t), v(t))$$

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta p(t) v(t) dt$$

T = periodo
 $t = \tau$ = tempo

NOTA: tutti i ragionamenti si possono fare solo per un periodo poiché abbiamo supposto un'onda elastica ad un'unica frequenza.

$$U = \frac{dE}{dV} \quad [J/m^3]$$



$$dx = c dt$$

- onda piana
- no componente diffusa

$$dV = ds \cdot dx = ds \cdot \underbrace{c \cdot dt}_{dx} \Rightarrow U = \frac{dW}{ds \cdot c \cdot dt} \Rightarrow U = \frac{I}{c} = \frac{P^2}{\rho c^2}$$

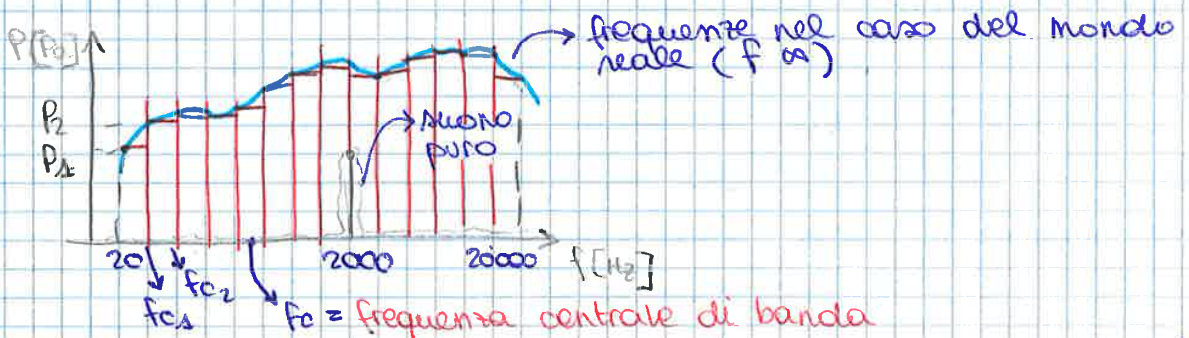
$$I = \frac{P^2}{\rho c}$$

$$U = \frac{I}{c} = \frac{P^2}{\rho c^2}$$

valide in CAMPO LIBERO

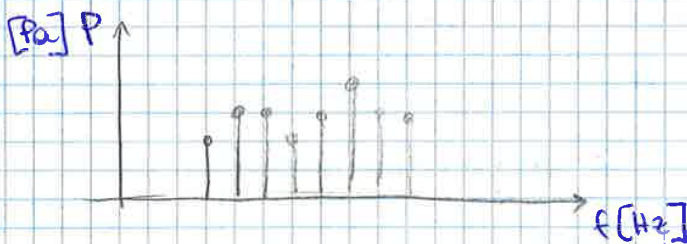
(l'ipotesi di onda piana è racchiusa in questa \rightarrow se un oggetto è molto lontano posso considerarlo come se il campo fosse libero)

BANDE DI FREQUENZA



Quando si ha a che fare con SUONI COMPLESSI (= infinite f) "divido" in BANDE il segnale \rightarrow BANDE DI FREQUENZA

- Posso approssimare alla frequenza del punto medio dell'intervallo e poi sommo \rightarrow dopo aver diviso in intervallini sempre più piccoli



Vengono standardizzate le bande.

BANDE DI OTTAVA :

- $f_2 = 2 f_1$
- $f_c = \sqrt{f_1 f_2}$



Integrando :

$$S - S_0 = k \ln \frac{I}{I_0}$$

→ legge di W-F in forma integrale

$$S - S_0 = k' \log \frac{I}{I_0}$$

LIVELLO DI UNA GRANDEZZA X

$$L_x = 10 \log \frac{x}{x_{\text{riferimento}}}$$

→ decibel [db]

(anche se è una grandezza adimensionale)

In acustica si lavora non tanto sulle grandezze fisiche, ma sui loro livelli:

- $L_p = 10 \log \frac{P^2}{P_0^2} = 20 \log \frac{P}{P_0}$ → livello di pressione sonora
- $L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}$ → livello di intensità sonora
- $L_W = 10 \log \frac{W}{W_0}$ → livello di potenza sonora

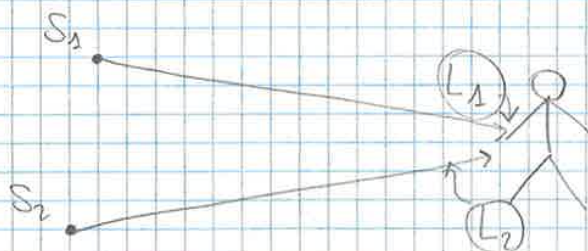
$P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} = 20 \mu\text{Pa}$ → soglia di udibilità a 1000 Hz

$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ → corrisponde alla soglia di udibilità a 1000 Hz

$W_0 = 10^{-12} \text{ W}$ → valore convenzionale → non corrisponde a nulla
↳ caratterizza la sorgente



NOTA: I livelli NON si sommano, si compongono



Quale livello L_{TOT} genera $S_1 + S_2 = ?$

• ~~$L_1 + L_2$~~ → si sommano (grazie al principio di conservazione dell'energia) I, W e P^2

AUDIOGRAMMA NORMALE (1961)

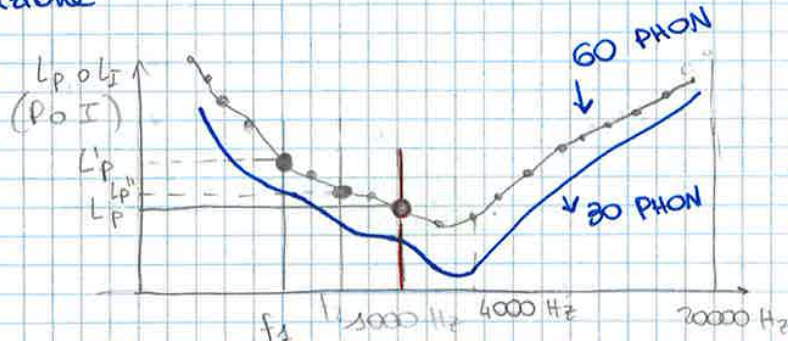
(Fletcher e Munson)

↳ costituito da curve di uguale sensazione uditiva

$I, W, P, L_I, L_P, L_W \Rightarrow$ grandezze oggettive

$S, L_s \Rightarrow$ grandezze soggettive

↳ sensazione



Chiedo al soggetto in esame di dire quando sente il suono alle frequenze f_i uguale a quello a 1000 Hz

La curva è il luogo dei punti che danno origine alla stessa sensazione sonora. La curva è detta **ISOSENSAZIONE**

- Si è assunta come u.d.m della sensazione sonora il **PHON**
 \Rightarrow la curva si chiama **ISOPHON**.

Il PHON coincide con il valore di L_p corrispondente a 1000 Hz.

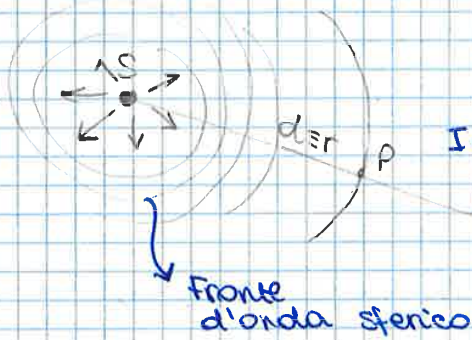
- A bassi livelli, la curva è più accentuata \Rightarrow la sensibilità varia in maniera marcata;
 Ad alti livelli la curva diventa più piatta
- A basse frequenze l'occhio è più sensibile (curva "più ripida")
 ad alte frequenze è meno sensibile (curva meno "ripida").
- Lo stesso livello può essere più o meno fastidioso a seconda della frequenza a cui viene emesso il suono. \rightsquigarrow se la frequenza è più alta l'occhio è più sensibile e il suono è più fastidioso \Rightarrow da questo diagramma derivano le curve di pesatura (curve ponderali) per la valutazione del disturbo del rumore.
- Il minimo della curva coincide con il massimo della sensibilità uditiva poiché è necessario un L_p più basso per produrre la stessa sensazione

in aria $\rho c \approx 400 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $P_0 = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \Rightarrow P_0^2 = 400 \cdot 10^{-12}$

Sostituendo

$$10 \log \frac{400 I}{400 \cdot 10^{-12}} = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

\Rightarrow In campo libero $L_I \approx L_p \rightsquigarrow$ valido FUORI dagli edifici



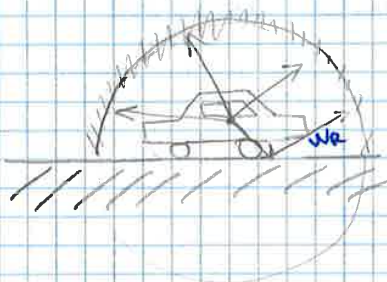
$I = \frac{dW}{dS}$ \rightsquigarrow poiché dW è uniforme

$$= \frac{W}{S} = \frac{W}{4\pi d^2} \rightsquigarrow I = f\left(\frac{1}{d^2}\right)$$

$I \downarrow \approx d \uparrow$

① In campo libero sferico: $I = \frac{W}{4\pi d^2} \Rightarrow$ posso calcolare $L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}$

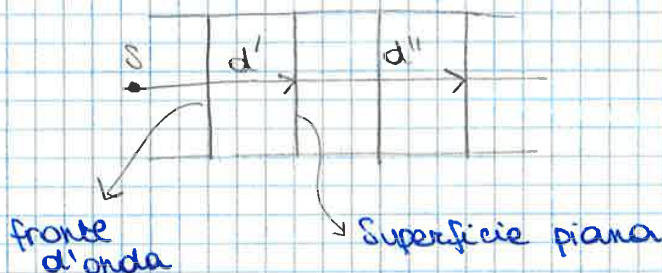
② CAMPO LIBERO SEMISFERICO



• se si può trascurare l'assorbimento del terreno è come se tutta la potenza fosse distribuita non su una sfera ma su una semisfera

$$I = \frac{W}{S_{\text{emisfera}}} = \frac{W}{2\pi d^2} \rightsquigarrow I = \frac{W}{2\pi d^2} \rightsquigarrow I \downarrow \approx d \uparrow$$

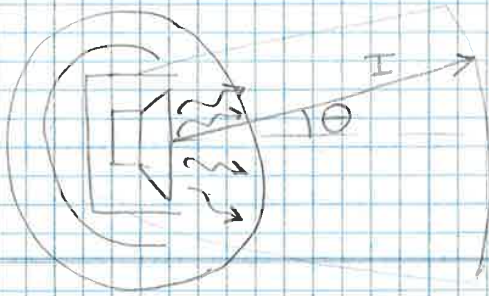
③ CAMPO LIBERO CON ONDA PIANA



$$I = \frac{W}{S_{\text{piano}}}$$

$I =$ costante al variare della distanza

Nei casi ① e ② per diminuire il rumore occorre aumentare la distanza dalla sorgente sonora.



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

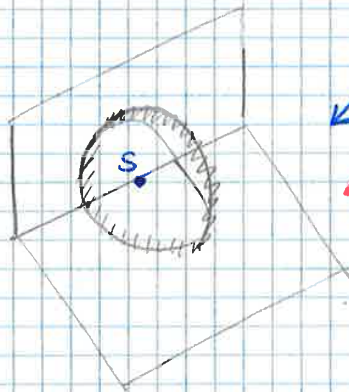
- Campo sferico $\Rightarrow Q_{\theta} = 1$
(+ sorgente omnidirezionale)

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

- Campo semisferico (+ sorg. omnidirez.)

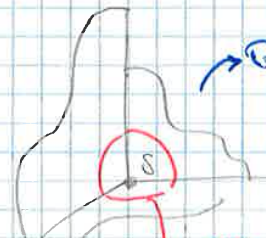
$$\Rightarrow Q_{\theta} = 2$$

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



$$Q_{\theta} = 4$$

← quarto di superficie sferica



$$Q_{\theta} = 8$$

↓ ottavo di superficie sferica

Posso scrivere L_I e L_p in funzione di L_W

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \left(\frac{1}{I_0} \left(\frac{W Q_{\theta}}{4\pi d^2} \right) \right)$$

$$= 10 \log \left(\frac{W}{I_0} \cdot Q_{\theta} \cdot \frac{1}{4\pi d^2} \right)$$

$$= 10 \log \frac{W}{I_0} + 10 \log Q_{\theta} - 10 \log 4\pi - 20 \log d$$

$$10 \log \frac{W}{W_0} = L_W$$

$\rightarrow 10^{-12} \text{ W/m}^2$

$\rightarrow 10^{-12} \text{ W}$

\rightarrow a livello numerico se due quantità coincidono

$$L_I = L_p = L_W + 10 \log Q_{\theta} - 10 \log (4\pi d^2)$$

mi ritardate \Rightarrow sovrapposizione delle parole

\leadsto Bisogna misurare la coda sonora per far sì che le riflessioni non siano né troppe, né troppe poche.

\Rightarrow TEMPO CONVENZIONALE DI RIVERBERAZIONE o T_{60}

È il tempo necessario affinché il livello L_p si riduca di 60 dB rispetto al valore che esso aveva quando la sorgente era in funzione.

\Leftrightarrow È il tempo necessario affinché la densità di energia sonora si riduca di 100000 di volte al cessare dell'emissione sonora.

$$U = \frac{p^2}{\rho c^2}$$

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 10 \log \frac{\left(\frac{p^2}{\rho c^2}\right) U}{\left(\frac{p_0^2}{\rho c^2}\right) U_0} = 10 \log \frac{U}{U_0}$$

$$\frac{U}{U_0} = 10^{-6} \Rightarrow 10 \log 10^{-6} = -60 \text{ dB}$$

- Esempi di luoghi con: coda LUNGA \rightarrow CHIESE
coda CORTA \rightarrow STANZA DI BIBLIOTECA

• Il T_{60} si può quantificare attraverso la FORMULA DI SABINE:

$$T_{60} = 0,163 \frac{V}{A_{TOT}}$$

[s/m] [s]

costante dimensionata \leftarrow volume

A_{TOT} = potere FONOASSORBENTE del locale o unità di FONOASSORBIMENTO DEL LOCALE [m²]

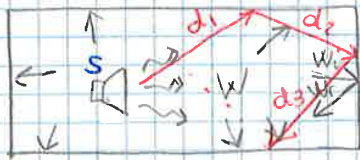
$$V = [m^3]$$

A_{TOT} è un PARAMETRO che permette di caratterizzare la capacità totale che ha il locale di assorbire il suono.

$$A_{TOT} = \sum_{i=1}^n a_i \cdot S_i \quad [m^2], \quad n = n \text{ superfici che circondano l'ambiente}$$

- Anche tutti gli oggetti, i mobili assorbono suono \Rightarrow devo correggere \leadsto devo aggiungere $+ \sum N_j \cdot A_j$ numero degli oggetti \rightarrow m²

Dimostrazione Formula di SABINE



W_a
 $t+a$
 a

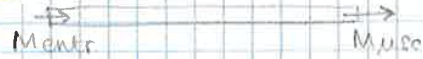
Conservaz. energia

$$W_{entr} = W_{usc.}$$

considero la massa

$$M_{entr} = M_{usc.}$$

REGIME STAZIONARIO



REGIME TRANSITORIO O DINAMICO

Il principio di conservazione vale solo se siamo in

REGIME STAZIONARIO

tutte le grandezze che caratterizzano il fenomeno sono costanti nel tempo

caso ideale o di difficile probabilità

La maggior parte dei fenomeni avviene in **REGIME TRANSITORIO**, cioè una o più grandezze che caratterizzano il fenomeno variano nel tempo.

↳ occorre tener presente ciò che cambia nel tempo, espresso attraverso la derivata. Infatti vale: $M_{entr} - M_{usc} = \frac{dM}{dt}$

⇒ Torniamo al caso dell'energia

Durante la CODA SONORA il regime NON è stazionario poiché noi andiamo a vedere come scende L_p

⇒ $W_{entr} - W_{usc} = \frac{dE}{dt}$ ⇒ principio di conservazione dell'energia

$W - W_a = \frac{dE}{dt} = \frac{d(V \cdot V)}{dt} = V \frac{dW}{dt}$

V = volume ambiente

Ricordando $a_m = \frac{W_a}{W_i} \Rightarrow W_a = a_m W_i$

potrebbe considerarsi tutto il locale

⇒ $W - a_m W_i = V \frac{dW}{dt}$ (1) • validità generale

Se considerassi tutte le onde e tutti i "d" e ne facessi la media $\bar{d} = L_m \rightarrow$ libero cammino medio

L_m = è la distanza mediamente percorsa dall'onda sonora

$$-\frac{CA_{TOT}}{4V} dt = \frac{dU}{U} \rightsquigarrow \text{variabili separabili} \Rightarrow \text{INTEGRO}$$

$$\Rightarrow \int_0^{T_{60}} \frac{CA_{TOT}}{4V} dt = - \int_{U_0}^U \frac{dU}{U} \Rightarrow -\frac{CA_{TOT}}{4V} T_{60} = \ln \frac{U}{U_0}$$

per $\Delta L_p = 60 \text{ dB} \Rightarrow \frac{U_0}{U} = \frac{1}{10^6}$

$$\frac{-CA_{TOT}}{4V} T_{60} = \ln(10^{-6})$$

$$T_{60} = \frac{-\ln(10^{-6}) \cdot 4}{c} \cdot \frac{V}{A_{TOT}} \Rightarrow T_{60} = 0,163 \frac{V}{A_{TOT}}$$

$\underbrace{c}_{>0} \downarrow 340 \text{ m/s}$
 $0,1625 = 0,163$

\rightarrow SABINE

c.v.d.

Sappiamo: $U = \frac{4I}{c}$ e $U = \frac{4W}{CA_{TOT}}$

Uguagliando: $\frac{4W}{CA_{TOT}} = \frac{4I}{c} \Rightarrow I = \frac{W}{A_{TOT}} \neq I = \frac{W}{S}$

$\Sigma a_i \cdot \delta_i$

valido in campo libero
 \hookrightarrow superficie del fronte d'onda

NOTA: la I è nulla in tutti i p.ti interni all'ambiente ma è $\neq 0$ alle pareti \Rightarrow la I appena trovata è **ALE PARETI**



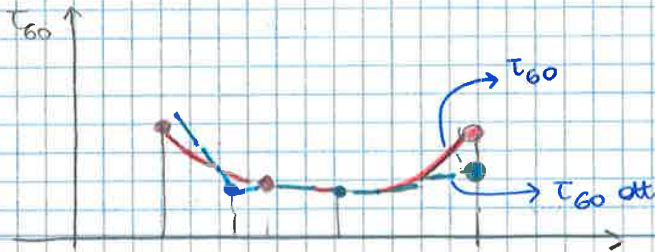
LEGAME L_I e L_W

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \left(\frac{W/A_{TOT}}{I_0} \right) = 10 \log \frac{W}{I_0} - 10 \log A_{TOT}$$

numericamente è L_W

$$\Rightarrow \boxed{L_I = L_W - 10 \log A_{TOT}}$$

\hookrightarrow alle pareti, altrimenti sarebbe nulla



FORMULA EMPIRICA PER CALCOLARE $T_{60\text{ott}}$

$$T_{\text{ott}} (1000 \text{ Hz}) = k \sqrt[3]{V}$$

↙ volume

$$k = 0,3 - 0,4 \text{ parlato}$$

$$k = 0,5 - 0,8 \text{ musica}$$

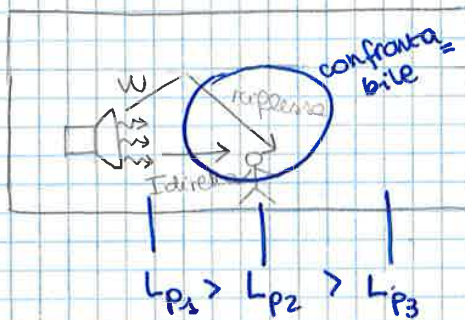
Oppure

↳ GRAFICI vedi pag 159

CAMPO SEMRIVERBERATO

(a_m elevati → sempre più vero)

- Si usa la formula di Eyring : $T_{60} = 0,163 \frac{V}{R}$



$$L_p = f(d)$$

↗ distanza dalla sorgente

- ragionevolmente vicino alla sorgente prevale il segnale diretto mentre lontano dalla sorgente prevale la componente riflessa.

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{Q_0}{4\pi d^2} + \frac{4}{R} \right)$$

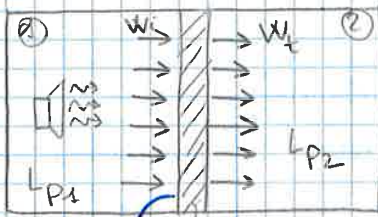
⇒ Vicino alla sorgente il campo può essere approssimato con un campo libero, poi ci sarà un campo semiriverberato ⇒ tutti e due i termini, ancora più lontano il campo sarà più simile ad un campo perfettamente riverberato.

NOTA: $T_{60\text{ott}}$ deriva da criteri percettivi ≠ T_{60} deriva da criteri oggettivi.

T_{60} molto grande ⇒ stanza troppo RIVERBERANTE ⇒ si possono mettere dei pannelli fonoassorbenti

al rumore. Essa dipende dai materiali da costruzione e dai giunti usati.

→ Ci occupiamo della propagazione per via diretta



$$L_{P1} - L_{P2} ?$$

CAMPO PERFET. RIVERBERERATO
Regime stazionario

$$U = \frac{4W}{CA_{TOT}}$$

$$U = 4 \frac{I}{C}$$

$$L_{P2} = 10 \log \frac{P2}{P0^2} = 10 \log \frac{U2}{U0} = 10 \log \left(\frac{1}{U0} \frac{4Wt}{C \cdot A2} \right) \quad (1)$$

potenza nel locale 2

dalla definizione di $t \Rightarrow t = \frac{Wt}{Wi} \Rightarrow Wt = Wit$ ma

$$I1 = \frac{W}{A1} \Rightarrow t \cdot Wi = t (I1 \cdot Sd) \quad (2)$$

↓
lega I e W globale e deve tenere conto del campo (perfett. riverberato)

↳ perché considero solo "un pezzo" di potenza, quella che incide sul tramezzo. vale la relazione

$$I = \frac{dW}{ds}$$

Sostituisco (2) in (1)

$$* = 10 \log \left(\frac{1}{U0} \left(\frac{4}{CA2} \cdot t \cdot I1 \cdot Sd \right) \right) =$$

$$= 10 \log \left(\frac{U1}{U0} \frac{Sd}{A2} \cdot t \right) =$$

$$= 10 \log \frac{U1}{U0} + 10 \log \frac{Sd}{A2} + \underbrace{10 \log t}_{-R}$$

L_{P1}

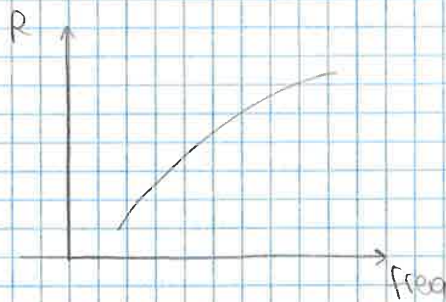
$$L_{P2} = L_{P1} - R + 10 \log \frac{Sd}{A2}$$

② $R \uparrow \approx f \uparrow \Rightarrow$ è più facile isolare i rumori ad alta frequenza

③ Ad ogni raddoppio di frequenza R sale di \approx 5 dB
(o di $\frac{1}{Ms}$)

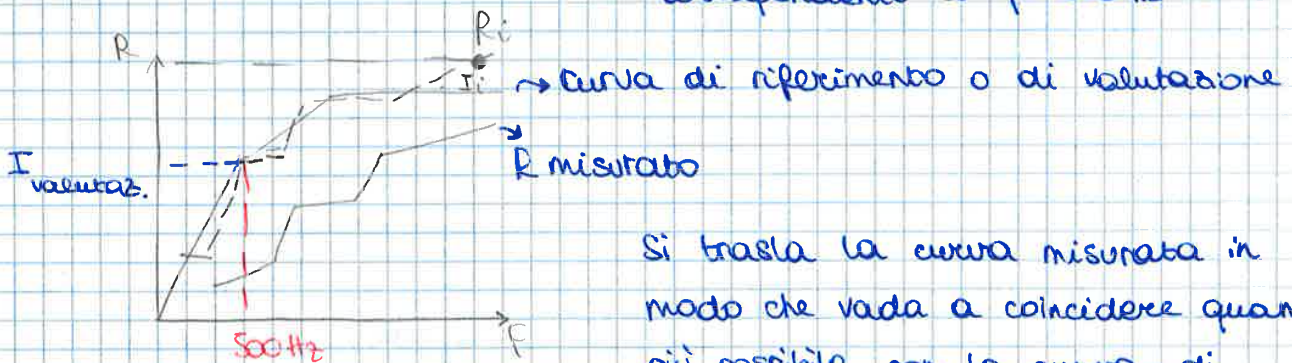
NOTA: la legge della massa vale solo per strati omogenei e approssima bene i fenomeni alle Frequenze Medie dei rumori poiché alle alte e alle basse frequenze ho delle risonanze.
Per frequenze alte: risonanze longitudinali = COINCIDENZE

- Anche per pareti multistrato valgono la ① e la ②
- Per pareti multistrato il valore di R è dato dai produttori (misurati)



La normativa ha introdotto il fattore di merito I,

I = indice di valutazione standard ed è il valore della curva "normalizzata" $R = f(\text{freq})$ corrispondente a $f = 500 \text{ Hz}$



Si trasla la curva misurata in modo che vada a coincidere quanto più possibile con la curva di riferimento.

In particolare in modo che

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n (R_i - I_i) < 12 \text{ dB} \text{ e} \\ \text{Max} (R_i - I_i) < 5 \text{ dB} \end{array} \right.$$

Per quanto riguarda la trasmissione indiretta bisogna togliere =

Esempio

f (Hz)	Lp dB		PESO	CASO A PESATO	CASO B PESATO
	CASO A	CASO B			
63	80	100	-26,2	53,8	0
125	100	20	-16,4	83,9	3,9
250	80	40	-8,6	71,4	31,4
500	80	30	-3,2	76,8	26,8
1000	70	90	0	70	90
2000	30	70	+1,2	31,2	71,2
4000	40	60	+1	41	61
16000	30	80	-6,6	23,4	73,4
TOT	100,13	90,5		85	91,15

$$L_{P_{TOT}} = 10 \log \left(\sum \frac{L_i}{10} \right)$$

CASO A :

$$L_{P_{TOT}} = 10 \log (10^8 + 10^{10} + 10^8 + 10^8 + 10^7 + 10^3 + 10^4 + 10^3) = \underline{100,13} \text{ dB}$$

CASO B :

$$L_{P_{TOT}} = 10 \log (10^1 + 10^2 + 10^4 + 10^3 + 10^9 + 10^7 + 10^6 + 10^8) = \underline{90,5} \text{ dB}$$

Livello PESATO (A) :

CASO A :

$$L_{P_{A_{TOT}}} = 10 \log (10^{5,38} + 10^{8,39} + 10^{7,14} + 10^{7,68} + 10^7 + 10^{3,12} + 10^{4,1} + 10^{2,34}) = \underline{85} \text{ dB}$$

<< CASO A

↓ In realtà è il rumore che disturba di meno (in relazione alla sensibilità dell'occhio)

CASO B :

$$L_{P_{B_{TOT}}} = 10 \log (10^0 + 10^{0,39} + 10^{3,14} + 10^{2,68} + 10^9 + 10^{7,12} + 10^{6,1} + 10^{7,34}) = \underline{90,15} \text{ dB}$$

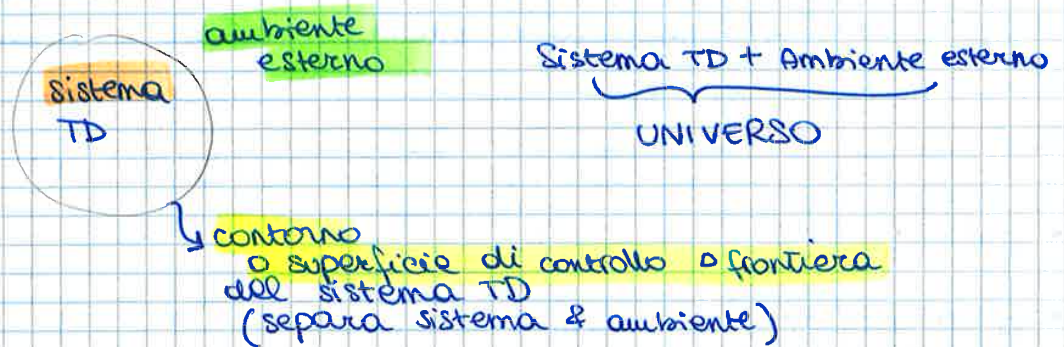
⇒ In termini PERCETTIVI il caso B è peggiore ⇒ bisogna usare il livello pesato poiché tiene conto della nostra sensazione

TERMODINAMICA

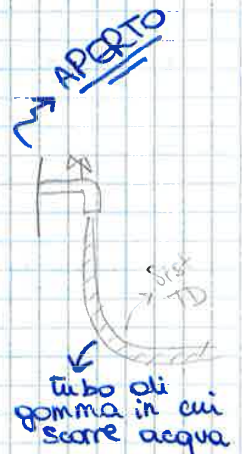
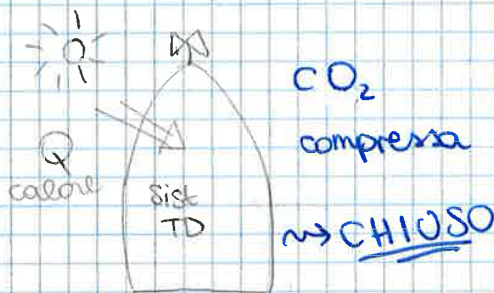
È il ramo della fisica che studia l'energia, gli scambi di energia tra corpi e le trasformazioni da una forma di energia ad un'altra. Si occupa anche di studiare gli effetti che le trasformazioni dell'energia hanno sui sistemi.

PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE: l'energia di un sistema resta cost.

→ **SISTEMA TD.** : una qualunque porzione di spazio univocamente identificabile

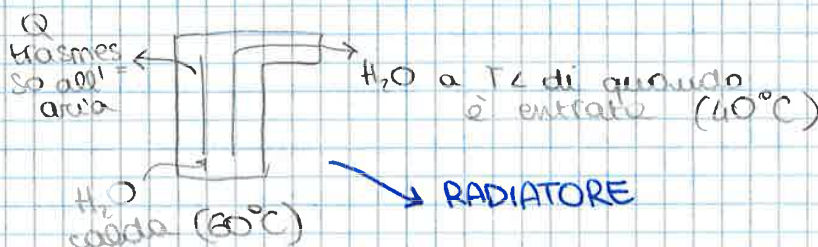


ESEMPI di SISTEMI TD



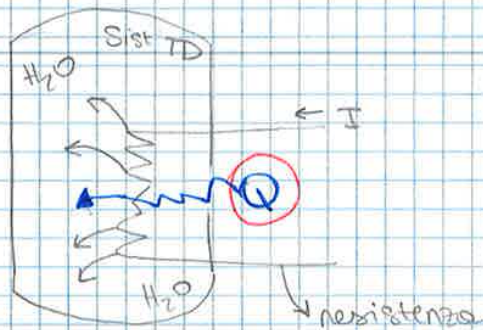
NOTA: le superfici di controllo possono essere tutte o in parte immaginarie (es. considero un cubo di aria → sup. di controllo totalmente immaginaria)

- **SISTEMI TERMODINAMICI CHIUSI** → possono scambiare energia con l'esterno ma NON scambiano massa (es. bombola di gas compresso)
- **SISTEMI TERMODINAMICI APERTI** → possono scambiare energia e materia con l'esterno (es. casa, radiatore)

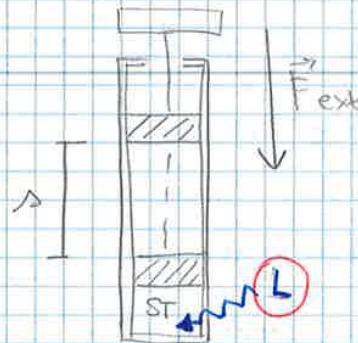


In generale sistemi TD scambiano sia Q che L con l'esterno

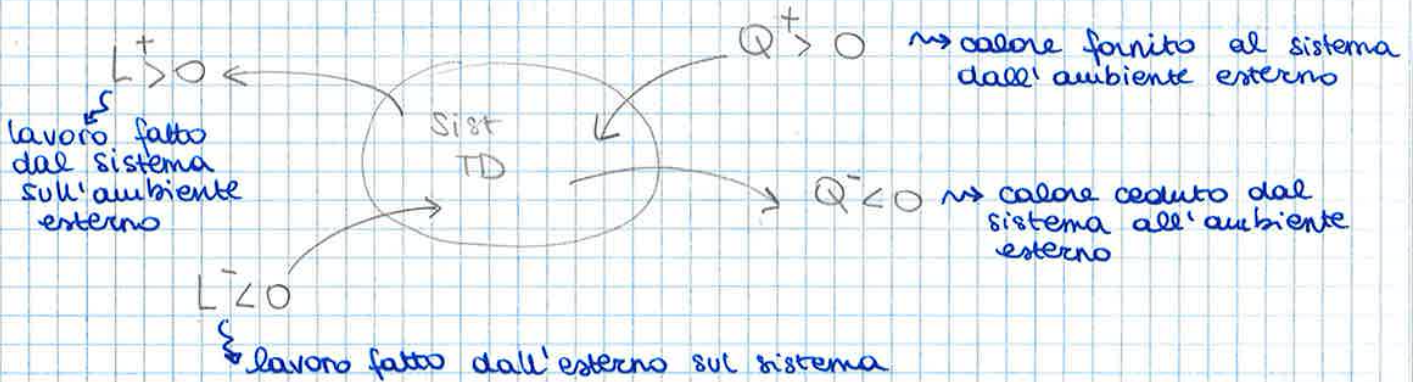
ESEMPIO - BOILER



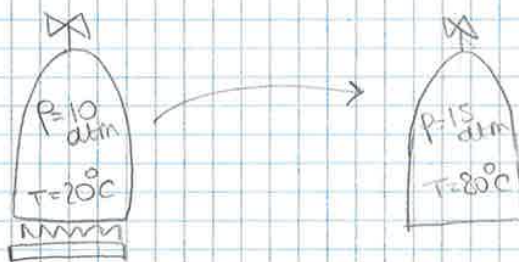
ESEMPIO - POMPA DI BICICLETTA



CONVENZIONE DI SEGNI



NOTA: Scambi di Q e L determinano delle variazioni delle proprietà (caratteristiche) del sistema TD.



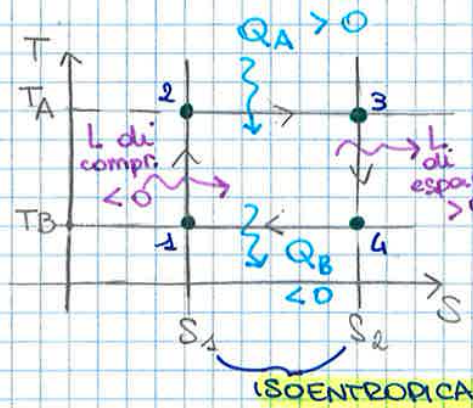
PROPRIETÀ:

- Volume V [m³]
- Entropia, s
- Massa M [Kg]
- Entalpia, h
- Temperatura, T
- Pressione, P

- Le proprietà sono l'insieme di tutte le grandezze fisiche misurabili sul sistema TD.
- Per ogni sistema TD in condizioni di equilibrio l'insieme dei valori di tutte le sue proprietà misurabili prende il nome di **STATO DEL SISTEMA**; ognuna delle proprietà prende il nome di grandezza di stato

NOTA: Isoentropica \nleftrightarrow adiab. reversibile \Leftarrow

NOTA: Il piano PV permette di vedere le quantità di lavoro scambiate (area sotto la curva) ma per il ciclo di Carnot usiamo il piano TS



è un rettangolo in questo piano

• Verso ORARIO poiché la macchina è motrice
 • 1, 2, 3, 4 sono i **CAPISALDI** del ciclo (punti in cui finisce una trasf. e ne inizia un'altra).

$$L_{\text{netto}} = |L_{\text{espans.}}| - |L_{\text{compress.}}| > 0$$

• Nella realtà il ciclo di Carnot è un **ciclo IDEALE**

↳ difficoltà nel costruire una macchina che lo rispetti e duri nel tempo

RELAZIONE PIÙ UTILIZZATA:

$$L_{\text{max}} = \left(1 - \frac{T_B}{T_A}\right) |Q_A| \rightarrow \text{ho } L \text{ in base a quanto devo spendere in termini di energia per ottenerlo}$$

RENDIMENTO delle MACCHINE TERMICHE MOTRICI

$$\eta = \frac{\text{effetto utile}}{\text{spesa}} \quad \text{m in generale}$$

$$\Rightarrow \eta = \frac{|L|}{|Q_A|} \quad \text{m Per una macchina motrice (definizione generale)}$$

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

$$\Rightarrow \eta = \frac{|Q_A| - |Q_B|}{|Q_A|} = 1 - \frac{|Q_B|}{|Q_A|} \quad \text{m relazioni utili derivanti dall'applicazione del 1° principio}$$

$$\eta_{\text{max}} = \frac{L_{\text{max}}}{|Q_A|} = \left(1 - \frac{T_B}{T_A}\right) = \eta_c \quad \text{m rendimento del ciclo di Carnot reversibile}$$

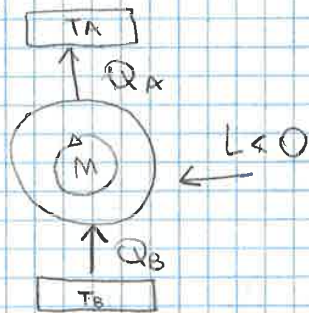
↳ **fattore di Carnot**

MACCHINE TERMICHE A CICLO INVERSO

ENUNCIATO DI CLAUSIUS

Non è possibile realizzare una macchina che operando secondo un processo ciclico abbia come unico effetto quello di trasferire calore da una sorgente a bassa temperatura ad una sorgente ad una più alta. Affinché si verifichi questo processo occorre fornire lavoro alla macchina.

Dimostrazione:



$T_A > T_B$, A e B sono termostati.

* Applico il 1° principio alla macchina M:

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

$Q_A + Q_B$ L

(2) $-|Q_A| + |Q_B| = L$

per ipotesi $L < 0$ ma io voglio far vedere che $L < 0$ (devo dimostrarlo)

* Applico il 2° principio all' universo

$$\Delta S_{TOT} = \Delta S_A + \cancel{\Delta S_M} + \Delta S_B$$

poiché il processo è ciclico ($\oint \delta S = 0$)

$$\Delta S_{TOT} = \Delta S_A + \Delta S_B$$

$$\Delta S_A = \frac{|Q_A|}{T_A}$$

$$\Delta S_B = \frac{-|Q_B|}{T_B}$$

$$\Delta S_{TOT} = \frac{|Q_A|}{T_A} - \frac{|Q_B|}{T_B} > 0$$

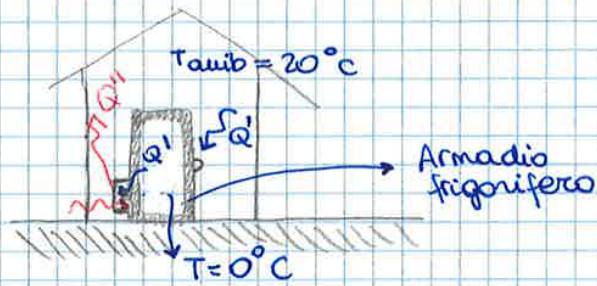
(1)

$$\Rightarrow \frac{|Q_A|}{T_A} > \frac{|Q_B|}{T_B} \quad \text{ma poiché per ipotesi } T_A > T_B$$

affinché (1) sia vera deve essere: $|Q_A| > |Q_B|$

Ma se deve essere $|Q_A| > |Q_B|$ allora da (2) $\Rightarrow L < 0$ necessariamente

$$Q'' = |Q_A| \quad Q' = |Q_B|$$



Sulle pareti del frigorifero circola del liquido freddo che mantiene freddo il frigorifero ma mentre circola si scalda, sul retro del frigo c'è una griglia che dissipa il calore Q'' .

Q' è l'effetto utile cioè il calore che frigo cede ^{estrae} ~~alla~~ ^{all'ambiente} ~~macchina~~.

• Se noi ipotizzassimo di considerare il calore Q_A , cioè Q'' otteniamo le **POMPE DI CALORE** → prelevano il calore da una temperatura minore e lo pompano nella stanza, ad una T maggiore.

Per le pompe di calore l'effetto utile è $|Q_A|$

EFFICIENZA FRIGORIFERA
(effetto frigorifero unitario)

$$\varepsilon = \frac{|Q_B|}{|L|} \rightsquigarrow \text{per macchine frigorifere}$$

COP
coefficient of performance
(Fattore di moltiplicazione termica)

$$\text{COP} = \frac{|Q_A|}{|L|} \rightsquigarrow \text{Macchina a pompa di calore}$$

NOTA: $Q'' > Q'$ ⇒ non conviene aprire la porta del frigo per refrigerare la stanza → scalda di più di quanto raffredda

$Q'' = L$ ⇒ l'ideale per non surriscaldare la cucina sarebbe spegnere il frigorifero

NOTA: Dal punto di vista della struttura la macchina che funziona da pompa di calore o da frigorifero è la stessa.

I sistemi oggi utilizzati sono **REVERSIBILI** cioè funzionano da condizionatore o da pompa di calore (**SPUT REVERSIBILI**)

⇒ **REVERSIBILE** significa che ha doppio uso (no accezione TD)

$\text{COP} > 1$ sempre

$\varepsilon \geq 1$ in teoria

} vedi pag. successiva

RIEPILOGO

* Macchine Motrici

$$\eta_{MAX} = 1 - \frac{T_B}{T_A} \Rightarrow \eta_{MAX} \uparrow \Rightarrow T_A \uparrow \text{ e/o } T_B \downarrow$$

T_A è limitato dalla resistenza dei materiali

* Macchina Frigorifera

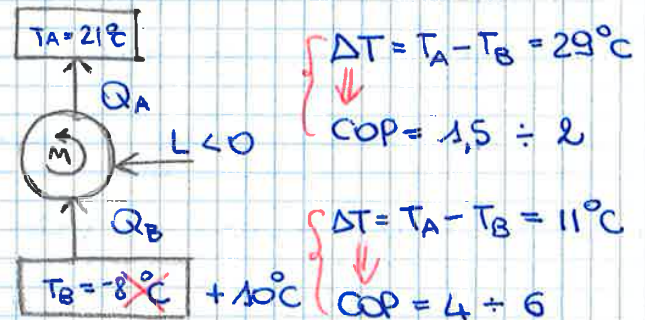
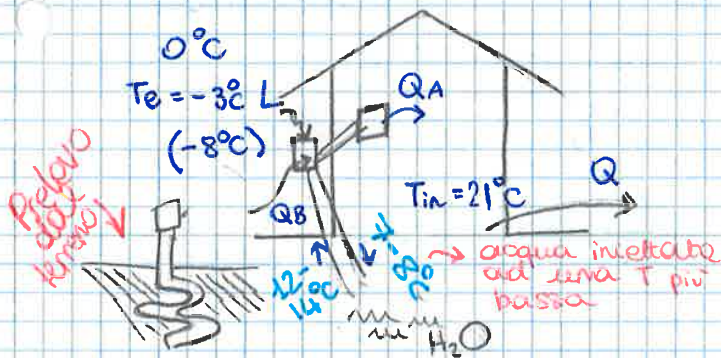
$$\epsilon_{MAX} = \frac{T_B}{T_A - T_B} \Rightarrow \epsilon_{MAX} \uparrow \text{ e } COP_{MAX} \uparrow \text{ se } T_A \rightarrow T_B$$

* Pompa di calore

$$COP_{MAX} = \frac{T_A}{T_A - T_B}$$

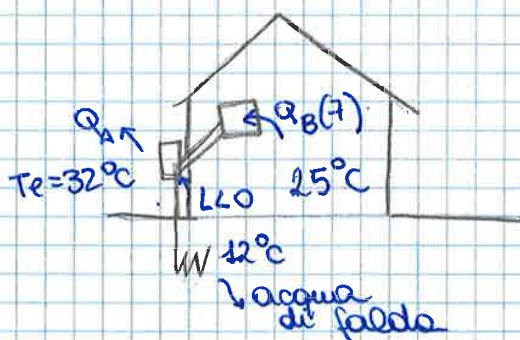
SISTEMI SPLIT

• caso **invernale** (pompa di calore)



- Prendo Q_B dall'acqua di falda a $12/14^\circ\text{C}$ ($\approx 10^\circ\text{C}$)
- Usare l'acqua di falda a volte può essere scomodo quindi si può usare il terreno (**SOLUZIONE ALTERNATIVA**)
- Tutta via, mentre l'acqua di falda che viene prelevata è sempre "fresca" cioè sempre a 12°C , il terreno dopo un po' che viene prelevato calore si raffredda e se nell'estate non viene scalato l'inverno dopo il COP sarà diminuito, ad esempio passerà da 4 a 2,5

• **Caso estivo**



$$\Delta T = T_A - T_B = 32 - 7 = 25^\circ\text{C}$$

$$\epsilon = 6 \div 8$$

Se devo solo raffreddare è sufficiente usare H_2O di falda a 12°C se devo anche deumidificare devo portare l' H_2O di falda a 7°C

$-\delta L_i = v dp + w dw + g dz + \delta L_w \rightarrow$ 1° principio della TD (per sistemi aperti) in forma meccanica

$v dp + g dz + w dw = 0 \rightarrow$ trinomio di Bernoulli

$\delta L_i = \delta L_w = 0 \rightarrow$ per fluidi reali nel caso in cui non ci siano pompe che fanno lavoro

STATI DI AGGREGAZIONE

- Solido: forma e volume propri
- Liquido: no forma propria ma volume proprio
- Aeriforme: né forma né volume propri

Tutte le sostanze sono costituite da aggregazione di molecole legate da legami intermolecolari

- T O-RGIZIACA
- Solido: le molecole vibrano attorno alla posizione di equilibrio, più è alta la T più le molecole vibrano \rightsquigarrow misura delle vibrazioni (velocità) attraverso T
 - Liquido: applicando una piccolissima forza tangenziale riesco a far scorrere una molecola sull'altra
 - Aeriforme: le molecole possono allontanarsi

REGOLA DELLE FASI

$f = n - r + 2$

f : n° gradi di libertà
 n : n° fasi presenti
 r : n° componenti
 (n° di grandezze che posso variare)

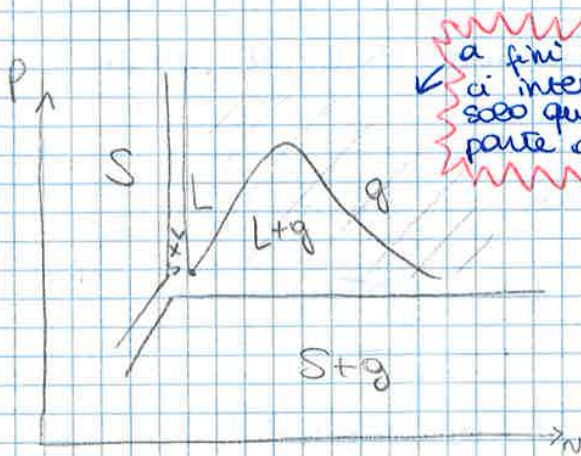
Per una sostanza pura $\Rightarrow n = 1$ $f = 3 - r$

Esempio \rightarrow H₂O liquida $\left\{ \begin{array}{l} 20^\circ\text{C} \text{ e } 1 \text{ atm} \\ 10^\circ\text{C} \text{ e } 5 \text{ atm} \end{array} \right. \rightarrow f = 2$

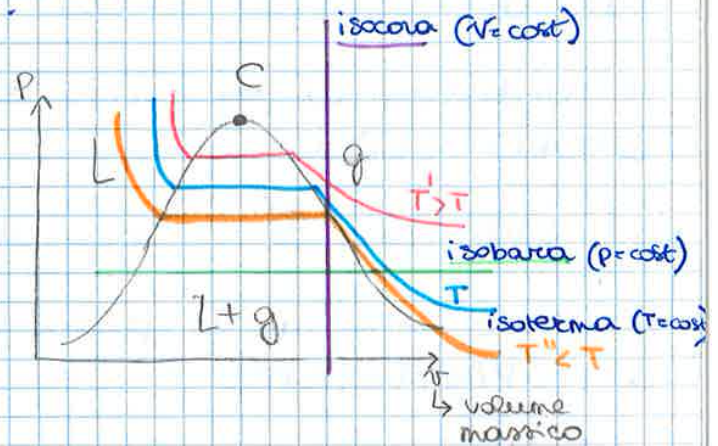
\rightsquigarrow posso cambiare due variabili

Le di studiare cosa avviene nella trasformazione del cambiamento di fase (→ uno stato è descritto solo da un punto)

Nel diagramma PV vedo proprio le aree → posso vedere cosa accade nel cambiamento di fase.



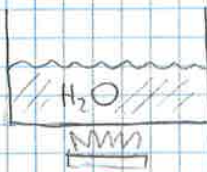
a fini pratici ci interessa solo questa parte di grafico



NOTA: Il primo tratto dell'isoterma è un'iperbole ($xy = \text{cost}$ ⇒ $PV = \text{cost}$ ⇒ legge di Boyle per le isoterme).

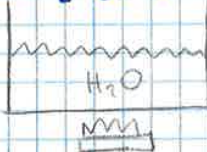
ESPERIMENTO

$p = \text{cost}$ $T_1 = 12^\circ\text{C}$



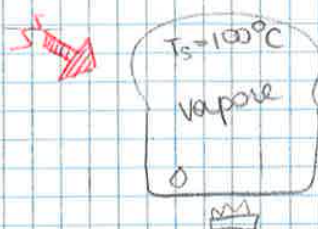
+ 10 min

$T_2 = 20^\circ\text{C}$

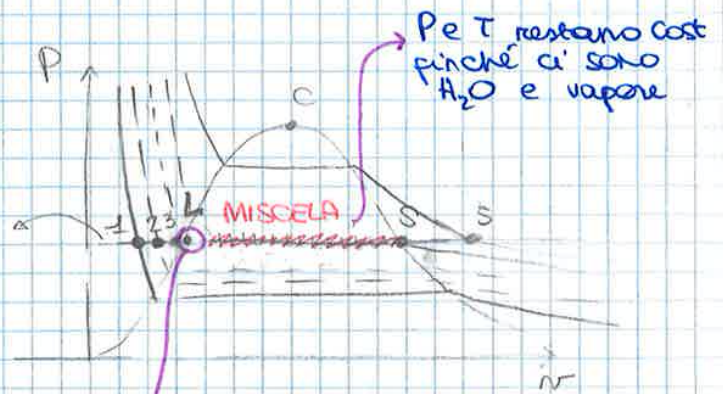


+ 20 min

$T_3 = 85^\circ\text{C}$



$P_3 = 1 \text{ atm}$



$P_1 = 1 \text{ atm}$
 $T_1 = 100^\circ\text{C}$

$P_4 = 1 \text{ atm}$
 $T_4 = 100^\circ\text{C}$

⇒ I cambiamenti di fase che avvengono a p cost avvengono anche

$$\left. \begin{array}{l} x = 0,3 \\ x = 0,5 \\ \vdots \end{array} \right\} \text{Tra S e L} \rightarrow \text{liquido + vapore}$$

Il concetto di titolo permette di descrivere le caratteristiche TD del sistema.

$$Z_{\text{vapore umido}} = Z_L \cdot (1-x) + Z_S \cdot X$$

↑ concentr. liquido
↑ vapor saturo secco (concentrazione)

↓ grandezza generica
↓ valore che la funzione ha per il vapor saturo secco

⇒ È possibile studiare il comportamento di vapor umido considerando una miscela di liquido saturo e di vapor saturo secco.

(La bolla → vapor saturo secco, l'acqua che c'è attorno → liquido saturo).

Il calore che viene fornito tra S e L non provoca un aumento termico, ma tale energia serve per rompere i legami tra le molecole e far avvenire il cambiamento di stato.

CALORE SENSIBILE & CALORE LATENTE

Def. **CALORE SENSIBILE** → energia termica (calore) che determina variazioni di temperatura (il c. s. è percepibile)

Def. **CALORE LATENTE** → energia termica (calore) che determina dei cambiamenti di fase a $T = \text{cost.}$ (il c. l. non è percepibile)

Esempio

Voglio condizionare l'aria.

Aria fredda (poco vapor d'acqua) }
 ↓ FORNISCO Q SENSIBILE } CONTROLLO DELLA T
 Riscaldo aria ambiente } CARICO TERMICO SENSIBILE

CONTROLLO DELL'UMIDITÀ RELATIVA → CARICO TERMICO LATENTE
 ↓
 FORNISCO O TOLGO Q LATENTE

solo tutto il volume della miscela, alla stessa T della miscela.

2^a LEGGE DI DALTON

In una miscela di gas perfetti la pressione totale della miscela è pari alla somma delle pressioni parziali di ogni componente cioè la pressione che ogni gas eserciterebbe se occupasse da solo tutto il volume della miscela, alla stessa T.

→ Per 2^a legge di Dalton

$$P = P_a + P_v = P_{atm} = \text{pressione barometrica}$$

\downarrow \downarrow \downarrow
 99000 Pa 2000 Pa \rightarrow 101325 Pa
 \uparrow
 100000 Pa

→ Per 1^a legge di Dalton

$$V = V_a = V_v \rightarrow \text{ogni gas è come se fosse da solo}$$

$$P_a V_a = R_a^* T \quad \parallel \quad P_v V_v = R_v^* T$$

\downarrow \downarrow
 volume costante
 massimo di elasticità

$$\rightarrow R_a^* = \frac{R}{\mu_a} \approx 287 \text{ J/kgK} \quad \parallel \quad \rightarrow R_v^* = \frac{R}{\mu_v} \approx 462 \text{ J/kgK}$$

GRANDEZZE PSICROMETRICHE

Ma resta sempre fisso mentre M_v varia, mi riferisco solo a M_a .

$$X = \frac{m_v}{M_a} \rightarrow \text{adimensionata ma di solito definita kg/kg}$$

\downarrow \downarrow
 titolo [g/kg]
 dell'aria \rightarrow moltiplica $\cdot 10^{-3}$ prima di fare i conti
 umidità

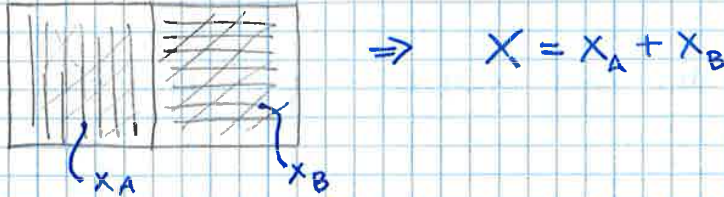
Nell'ambito della psicrometria si fa sempre riferimento nelle grandezze massiche, all'unità di massa della sola ARIA SECCA M_a che è una invariante.

NOTA: Quando ci riferiamo all'unità di massa in psicrometria ci riferiamo all'unità di massa dell'aria secca.

$$X = \frac{m_v / V_v}{M_a / V_a} = \frac{P_v}{P_a} \Rightarrow X = \frac{m_v}{M_a} = \frac{P_v}{P_a} \rightarrow 1 \cdot 10^{-3} \text{ kg/kg} = 50 \cdot 10^{-3}$$

diviso per V

PROPRIETÀ DELLE GRANDEZZE ESTENSIVE



Il valore di una generica grandezza di stato X è pari alla somma dei valori che la medesima grandezza X assume per ognuna delle sottoparti in cui può essere diviso il sistema TD.

Grandezze estensive

V, H, S
 M, U

Grandezze intensive

T, P } sono le uniche due grandezze intensive

GRANDEZZE DI STATO SPECIFICHE O MASSICHE

Grandezze di stato specifiche: si ottengono dalle grandezze estensive dividendole per la massa

$v = \frac{V}{M}$ volume massico $[m^3/kg]$

$h = \frac{H}{M}$ entalpia massica $[J/kg]$

$u = \frac{U}{M}$ energia interna massica $[J/kg]$

$s = \frac{S}{M}$ entropia massica $[J/kgK]$

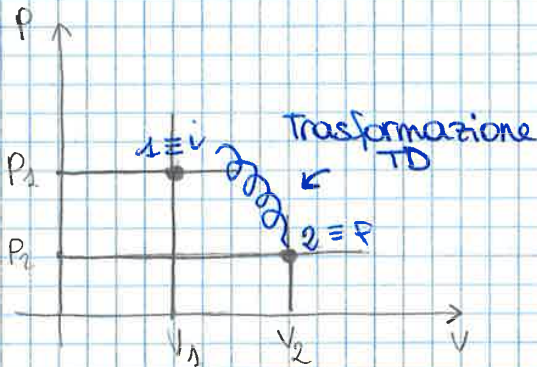
sono tutte grandezze intensive poiché il loro valore dipende più dalla massa

$\rho = \frac{1}{v} = \frac{M}{V}$ densità o massa volumica $[kg/m^3]$

SISTEMI TERMODINAMICI SEMPLICI

\Rightarrow costituiti da un materiale detto sostanza pura

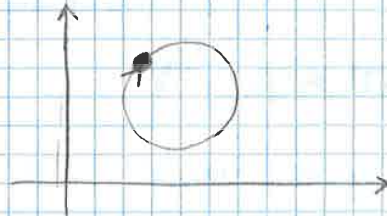
- Sono sufficienti 3 variabili per caratterizzare in modo completo lo stato del sistema \Rightarrow SISTEMI pVT



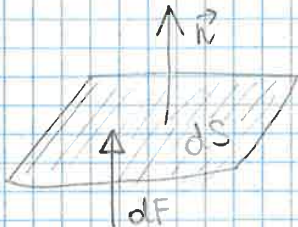
i = iniziale
f = finale

TRASFORMAZIONI CICLICHE

$$i = f$$



PRESSIONE P



$$p = \frac{d\vec{F}}{dS}$$

→ la forza che conta è la forza normale alla superficie

(nei fluidi tutte le forze sono ⊥)

$$\left[\frac{N}{m^2} \right] = [Pa]$$

Dalla legge di Stevino:

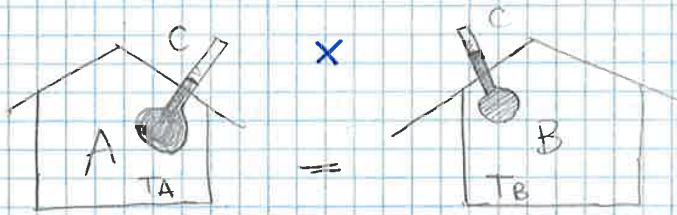
$$p = \rho g h \rightsquigarrow \rho = 1000 \text{ kg/m}^3, g \approx 10 \text{ m/s}^2$$

$$h = \frac{p}{\rho g} = \frac{1 Pa}{1000 \cdot 10} = 0,1 \text{ mm}$$

1 mm H₂O = 10 Pa → pressione esercitata da una colonna di 1 mm

⇒ si usano le atm e mmHg 760 mmHg = 1 atm = 101325 Pa

sistemi termodinamici in eq. termico tra loro.



Il sistema TD © è il TERMOMETRO

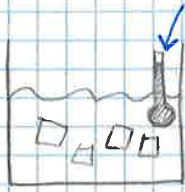
→ si basano su esperimenti

SCALA EMPIRICA DI TEMPERATURA

• Scala Celsius o Centigrada

contiene sostanze che si dilatano all'aumento di T

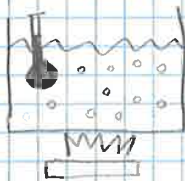
H₂O + ghiaccio



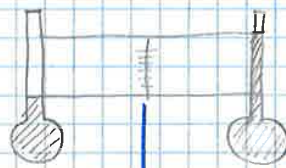
Metto un termometro nella miscela, aspetto un po' di tempo che la miscela e il termometro raggiungano la stessa T.

Convenzionalmente da a quel valore quello di 0°C

H₂O in ebollizione



Acqua bollente → 100°C convenzionalmente



$$1^\circ\text{C} = \Delta T$$

intervallo diviso in 100 parti uguali

• Scala Fahrenheit

$$0^\circ\text{C} \rightarrow 32^\circ\text{F}$$

$$100^\circ\text{C} \rightarrow 212^\circ\text{F}$$

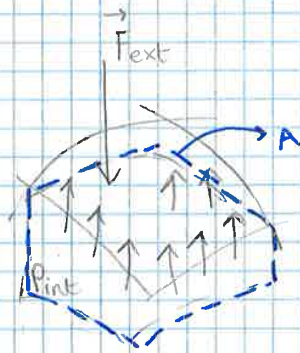
180 parti uguali

- vengono usati questi sistemi TD poiché la temperatura è sempre la stessa ed è facilmente riproducibile
- Queste scale sono legate a delle SOSTANZE e ad una caratteristica, oltre a valori convenzionali

TEMPERATURA TERMODINAMICA o ASSOLUTA

NOTA: secondo le scale empiriche non c'è nessun valore massimo né minimo per la temperatura; ma un limite minimo deve esistere → 0 → coincide con la situazione in cui le molecole sono ferme → $E_k = 0$

CASO PARTICOLARE - TRASFORMAZIONE REVERSIBILE



→ istante per istante la forza esterna è equilibrata dalla P_{int}

$$|\vec{F}_{ext}| = P_{int} \cdot A$$

ovvero $\vec{F}_{ext} = -P_{int} \cdot A$

$$\Rightarrow L = - \int_{\alpha} \vec{F}_{ext} \cdot d\vec{s} = - \int -P_{int} \cdot A \cdot d\vec{s} = L = + \int P_{int} A \cdot d\vec{s} \underset{dV}{\underbrace{}}$$

• È come se io stessi spostando l'area di uno spazio $d\vec{s} \Rightarrow$ volume
 \Rightarrow il lavoro è la variazione di volume dovuta alla \vec{F}_{ext}

$$\Rightarrow L = \int_V P_{int} \cdot dV$$

- Una **trasf. TD REVERSIBILE** è costituita da una **successione infinita di stati di equilibrio TD**. \leadsto L'equilibrio TD \Rightarrow Eq chimico, termico e meccanico, quest'ultimo significa che la \vec{F}_{ext} è equilibrata in ogni istante da P_{int} .
- Affinché una **trasf. sia REVERSIBILE** per l'eq. meccanico la velocità dovrebbe tendere a 0 ($\vec{a} = 0$ poiché $\vec{R} = 0$) \Rightarrow **la trasf. REVERSIBILE deve essere infinitamente lenta**.
- \Rightarrow Una **trasf. REVERSIBILE** è un caso **IDEALE** a cui si avvicinano solamente alcune **trasf. reali**.

$$L_{\text{trasformazione irreversibile}} = L_{REV} - L_W$$

\downarrow
 lavoro in gioco se la trasf. fosse reversibile

$L_W =$ lavoro o energia perso per irreversibilità

$$L_{\text{trasp. irrev.}} = \int p dV - L_W$$

$L_W \geq 0$, $L_W = 0 \Leftrightarrow$ trasf. reversibile

① MACCHINE MOTRICI REALI

$$L > 0$$

$$L = \int_V p dV - L_W \Rightarrow L < L_{REV} \leadsto \text{le irreversibilità peggiorano il rendimento}$$

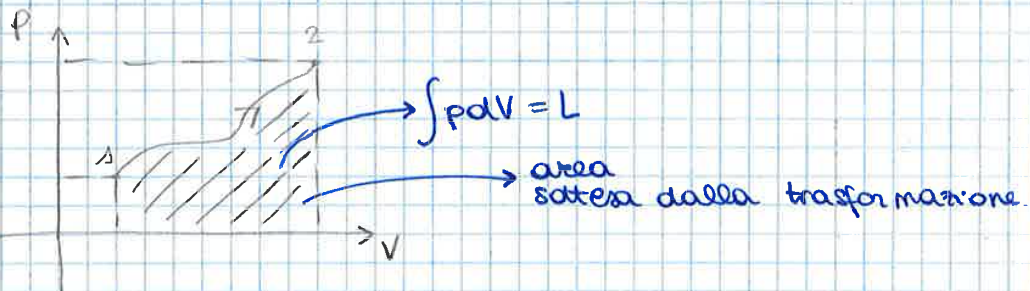
si potrebbe fare se dL fosse un differenziale esatto.

⇒ utilizzeremo il simbolo δL

NOTA: il lavoro NON è una caratteristica del sistema, è una grandezza di scambio come Q , dipende dal percorso fatto.

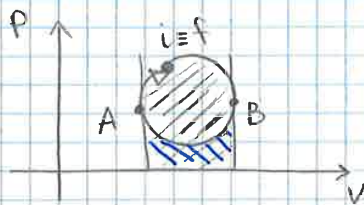
INTERPRETAZIONE GRAFICA

$$L = \int p dV$$



- Se $V \uparrow \Rightarrow L > 0$
- Se $V \downarrow \Rightarrow L < 0$

TRASFORMAZIONE CICLICA



$$L_{A \rightarrow B} > 0$$

$$L_{B \rightarrow A} < 0$$

L'area interna al ciclo rappresenta il lavoro scambiato dal sistema con l'esterno

$$L = \oint \delta L = \oint p dV$$

→ > 0 se il ciclo è percorso in senso orario
⇒ **MACCHINA MOTRICE**

→ < 0 se il ciclo è percorso in senso antiorario
⇒ **MACCHINA OPERATRICE**

- **MACCHINA MOTRICE** o A CICLO DIRETTO (senso orario)
- **MACCHINA OPERATRICE** o A CICLO INVERSO (senso antiorario)

CALORE [J] Q

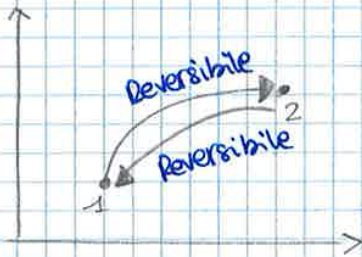
È energia scambiata dal sistema con l'ambiente a causa di una differenza di temperatura

Come per il lavoro, il calore, essendo una energia scambiata

TRASFORMAZIONI REVERSIBILI

$$L_{rev} = \int_V p dV \quad \neq \quad L = L_{REV} - L_W = \int p dV - L_W$$

Def: Si dice reversibile una trasformazione che invertita riporta il sistema TD e l'ambiente esterno nelle medesime condizioni che essi avevano prima della trasformazione diretta e inversa.



→ la somma delle due trasformazioni non lascia effetti sull'universo

• Una trasf. reversibile è una trasformazione che avviene secondo una successione infinita di stati di equilibrio ovvero una successione di stati per ciascuno dei quali sussiste l'equilibrio tra variabili di stato interne ed esterne al sistema.

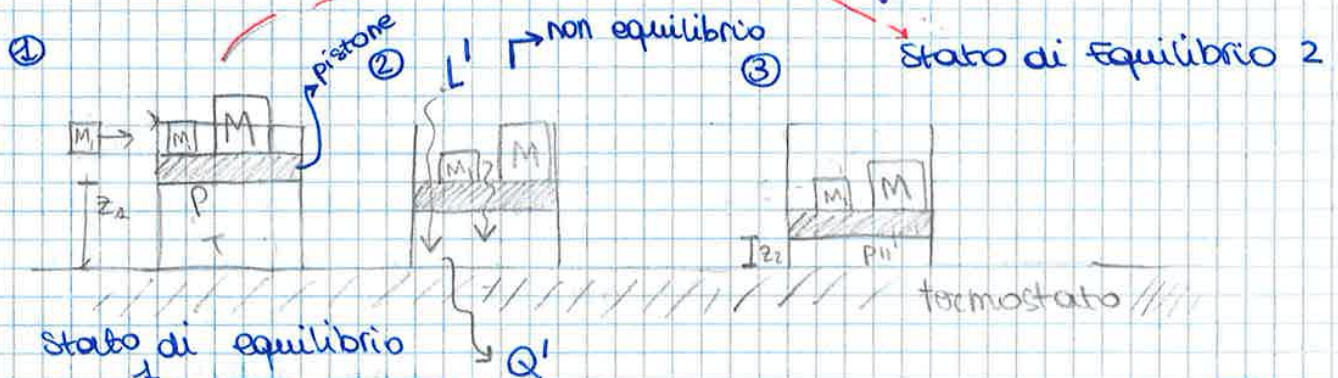
⇒ In ogni istante P_{est} è equilibrata dalla P_{int} e la T esterna è in equilibrio con quella interna.

Affinché tutto ciò si verifichi è necessario che $\vec{a} = 0 \Rightarrow$ le trasformazioni sono lente e gli scambi di calore devono avvenire tra differenze di T che $\rightarrow 0$ e non ci sono attriti che andrebbero a disequilibrare la situazione.



⇒ Più una trasf. è rapida tanto più genera irreversibilità, e le irreversibilità producono dissipazione di energia sottoforma di produzione di calore.

ESPERIENZA DI ZEMANSKY



$z_2 < z_1 \Rightarrow$ la massa m_1 ha perso in termini di E_p e questa perdita si è manifestata con calore ceduto al termostato.

Trasformazione $2 \rightarrow 1$:

$$L'' = - \int \vec{F}_{ext} \cdot d\vec{s} = - \underbrace{|\vec{F}_{ext}|}_{mg} \cdot \underbrace{\cos\theta}_{-1} \cdot \int \underbrace{|ds|}_{dz}_{z_1-z_2}$$

$$L'' = Mg(z_1 - z_2)$$

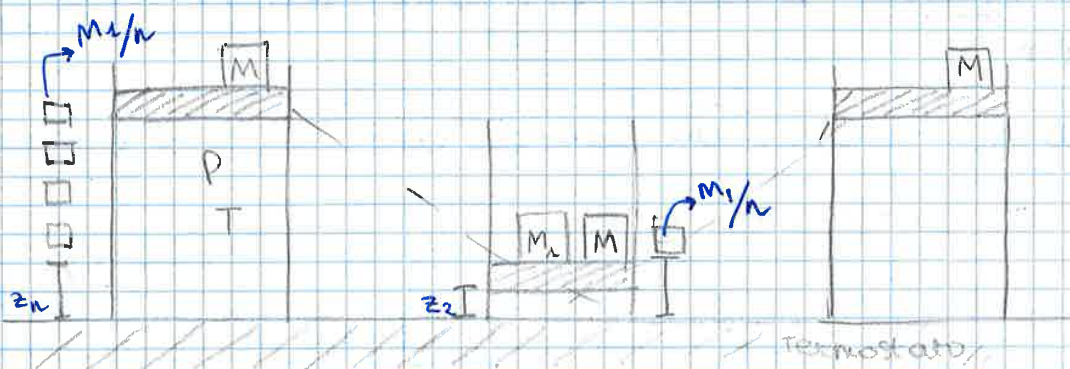
$Q'' =$ calore assorbito dal sistema a causa dell'espansione (>0) + calore prodotto dagli attriti (<0)

↳ Ha lo stesso effetto per $1 \rightarrow 2$ e $2 \rightarrow 1$

$\Rightarrow |L'| > |L''| \Rightarrow$ **PERDITA DI LAVORO UTILE** $L' + L'' = -M_1 g(z_1 - z_2)$
 $|Q'| > |Q''|$ \Downarrow è pari alla perdita di E_p della massa M_1 che passa da z_1 a z_2

$\Rightarrow 1 \rightarrow 2$ e $2 \rightarrow 1$ sono trasformazioni globalmente cicliche (cioè se sommate $i \equiv f$) ma **NON** sono reversibili poiché l'universo non torna nello stato iniziale (m_1 è più basso che all'inizio).

Supponiamo di dividere l'esperimento in tante parti:



• la dissipazione di energia potenziale è pari a

$$L' + L'' = -\frac{M_1}{n} g(z_1 - z_2) \Rightarrow \text{è "n" volte più piccolo di prima}$$

Per $n \rightarrow \infty \Rightarrow L' + L'' \rightarrow 0$ cioè **non** ci sono dissipazioni

\Rightarrow la trasformazione è reversibile