

Meteorologia e Micrometeorologia per l'inquinamento atmosferico

Parte 1

Misure nel PBL

dott. Roberto Sozzi dott. Andrea Bolignano



1. INTRODUZIONE

- a) Riepilogo delle caratteristiche fisiche del Planetary Boundary Layer
- b) Variabili che ne caratterizzano lo stato e l'evoluzione nel tempo
- c) L'apporto solare e le sue conseguenze
- d) Visione fenomenologica del PBL convettivo e stabile
- e) Caratteristiche della turbolenza del PBL



MICROMETEOROLOGIA



Parte della Meteorologia che studia la porzione di Troposfera in cui si ha:



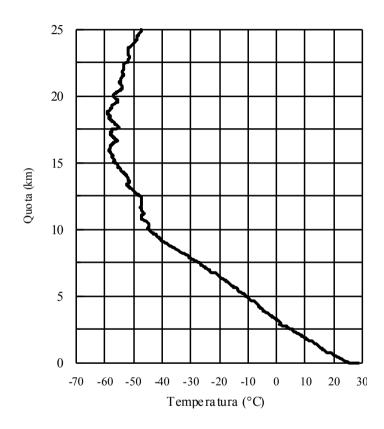


- l'emissione delle sostanze inquinanti
- il loro trasporto
- la loro diffusione
- la loro parziale eliminazione
- la loro trasformazione chimica

Planetary Boundary Layer

- Possiede caratteristiche fisiche e chimiche nettamente distinte dal resto della Troposfera
- Si estende dal suolo fino ad una quota che varia durante il giorno e da giorno a giorno (estensione massima di 1 – 2 km nelle ore diurne e soleggiate)

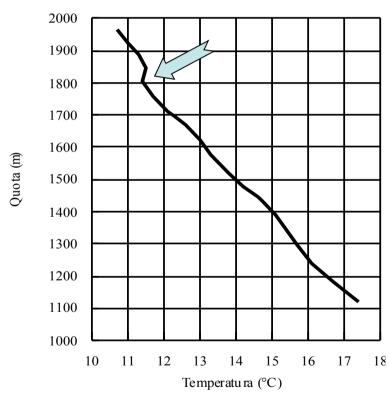




Profilo verticale di temperatura nella Troposfera

(Sondaggio Diurno)

Individuazione preliminare del PBL





⇒ Il PBL è un sistema fisico gassoso semiconfinato

- Il confinamento è determinato dalla presenza di un suolo rugoso su cui scorrono con attrito le masse d'aria.
- Lo si studia impiegando le leggi della Fluidodinamica (leggi di conservazione della massa, della quantità di moto, dell'energia)

⇒ Principali variabili che ne definiscono lo stato

<u>Movimento</u> → vettore velocità dell' aria in un certo punto dello spazio- tempo (definizione euleriana)

u componente S-N (positivo verso N)

v componente W-E (positiva verso E

w componente basso-alto (positiva verso l'alto)

⇒ Temperatura dell'aria

<u>Definizione convenzionale</u>

Temperatura potenziale

$$\vartheta = T \left[\frac{1000}{p} \right]^{R/C_p}$$

$$\vartheta \cong T + 0.0098 \cdot z$$

Nell'aria è <u>sempre</u> presente dell'**acqua** soprattutto allo stato gassoso (vapor d'acqua) ⇒ **Aria Umida**.

Contenuto di vapor d'acqua

- **Tensione di vapore e** (pressione parziale di vapor d'acqua, mb). Massimo valore tensione di saturazione = pressione di saturazione e_s .
- Umidità relativa RH (%): 100 e/e_s
- •Umidità assoluta a: massa di acqua in 1 m³ di aria
- •Umidità specifica q: grammi di acqua per grammo di aria umida
- •Rapporto di mescolanza r: grammi acqua per grammo di aria secca

T_v è la **temperatura virtuale**

$$T_v = T(1 + 0.608q)$$

 θ_v è la temperatura potenziale virtuale

$$\theta_{v} = \theta (1 + 0.608q)$$

Relazione tra il gradiente verticale di T e di θ

$$\frac{d\vartheta}{dz} = \frac{dT}{dz} + 0.0098$$

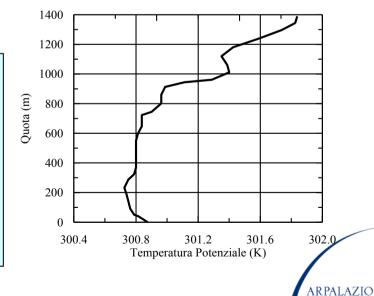
ad un gradiente di temperatura normale di -0.0098 K/m corrisponde un gradiente di temperatura potenziale di 0 K/m

La <u>temperatura potenziale</u> *può* essere considerata come una <u>nuova</u> <u>definizione di temperatura</u>

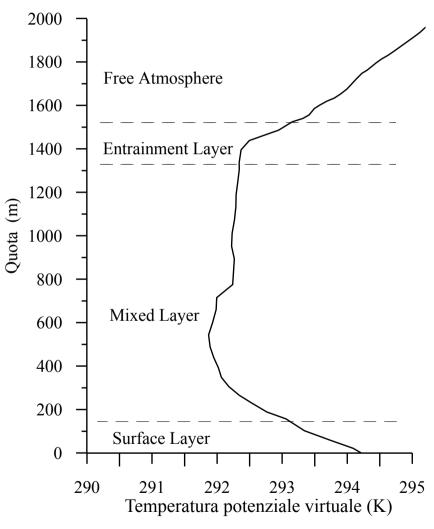
Se la si applica al profilo verticale di temperatura (relativo a un'ora diurna e soleggiata) visto in precedenza, si ottiene sorprendente-

mente ciò che appare nella figura

Prima non si notava alcunché di particolare, **ora** si nota chiaramente una **porzione di atmosfera** in cui possono essere individuati **tre strati** che corrispondono a zone con diversi gradienti verticali di temperatura potenziale.



Il PBL convettivo è particolarmente sviluppato nelle ore diurne in un giorno sereno e soleggiato. Esso presenta una tipica struttura a tre strati visibili dal profilo della temperatura potenziale:



SL: strato caratterizzato da un gradiente di temperatura negativo.

Ogni particella rilasciata al suolo con velocità iniziale ascendente, incrementerà il proprio moto

ML: strato caratterizzato da un gradiente di temperatura prossimo allo zero.

In esso si instaura una circolazione ad area limitata di strutture coerenti;

EL: strato caratterizzato da un gradiente di temperatura positivo. Costituisce di fatto una barriera fisica ai movimenti verticali delle strutture coerenti.



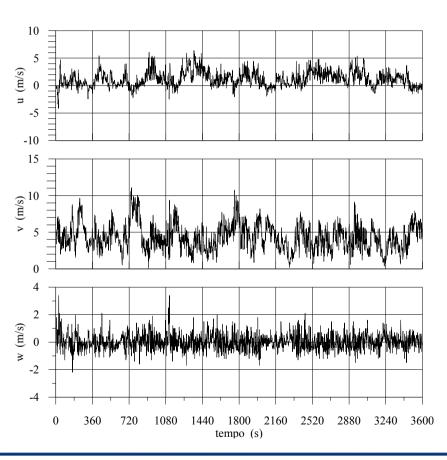
Altre variabili:

Pressione atmosferica (hPa, mb)

Contenuto di altre sostanze gassose o particellari

Tutte le variabili meteorologiche nel PBL (<u>anche la concentrazione di</u> <u>sostanze inquinanti</u>) presentano un andamento altamente irregolare nello spazio e nel tempo





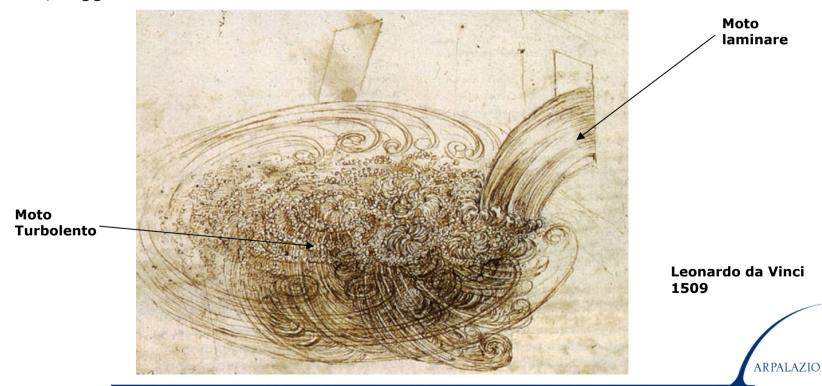
Moto Turbolento

Le osservazioni sperimentali dei fluidi di interesse geofisico (mare, atmosfera) ed ingegneristico (fluidi in condotti) evidenziano un regime di movimento ben lontano da quello laminare.

Tale regime di moto risulta estremamente irregolare e apparentemente privo di logica.

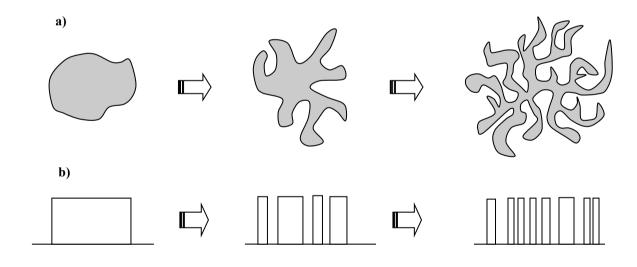
In generale, in esso possiamo individuare un comportamento sostanzialmente regolare cui si sovrappongono disturbi di dimensione e durata variabile.

I disturbi a scala maggiore tendono a frantumarsi in disturbi a scala sempre più piccola, suggerendo una sorta di cascata dimensionale.

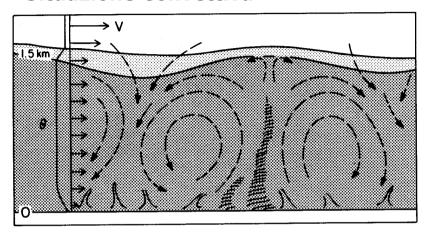


Proprietà generali della turbolenza

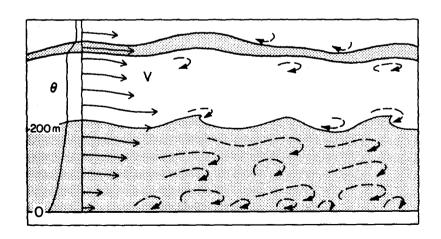
- l'irregolarità: che caratterizza il campo delle principali variabili che ne descrivono il moto. Queste irregolarità hanno le caratteristiche proprie di un fenomeno stocastico e suggeriscono che un metodo di indagine possibile potrebbe essere proprio quello statistico.
- la **diffusività**: le irregolarità caratteristiche di un moto turbolento determinano un **rapido rimescolamento** di porzioni di fluido con caratteristiche chimiche e fisiche differenti e quindi un incremento del tasso di trasferimento di massa, quantità di moto e calore.



Situazione Convettiva



Situazione Stabile



Elemento Caratteristico del moto turbolento nel PBL

- Moto medio di traslazione
- Disturbi nel moto di origine turbolenta (Vortice/Eddy)

Energy Cascade

Moto Medio



Destabilizzazione



Vortici di Grandi Dimensioni

(sono i primi che si formano e traggono la propria energia dal moto medio)



Destabilizzazione e frammentazione



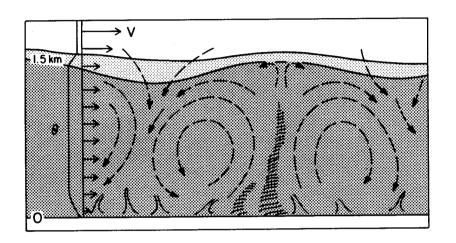


Moto Medio

Vortici di Dimensioni Inferiori

(la loro energia deriva dai vortici di dimensione immediatamente superiore) Il processo di destabilizzazione e di frammentazione continua producendo vortici sempre più piccoli finché tutta l'energia si dissipa in calore per l'azione della viscosità

Vortice (Eddy): porzione di PBL di dimensioni finite (L) in cui si localizza un disturbo del moto e/o un disturbo nelle proprietà chimiche e fisiche del fluido.



I vortici a maggiori dimensioni (es quelli convettivi) possono avere forme asimmetriche dovute all'azione del moto medio da cui hanno tratto la propria energia

Energy Cascade → Produzione di una sequenza di vortici i =1,.., N con dimensione L_i e velocità caratteristica V_i progressivamente inferiori.



Vortice i Votice i+1

$$L_i > L_{i+1}$$

$$V_i > V_{i+1}$$



Più si procede nella frammentazione dei vortici, più i vortici secondari che si vengono a generare tendono ad essere isotropi.



Grandezza Caratteristica dei Vortici

Numero di Reynolds

$$Re_i = \frac{L_i V_i}{v}$$

v È la viscosità cinematica dell'aria pari a 1.5 10^{-5} m 2 s $^{-1}$.

Si vede immediatamente come per i > j, $Re_i < Re_j$.



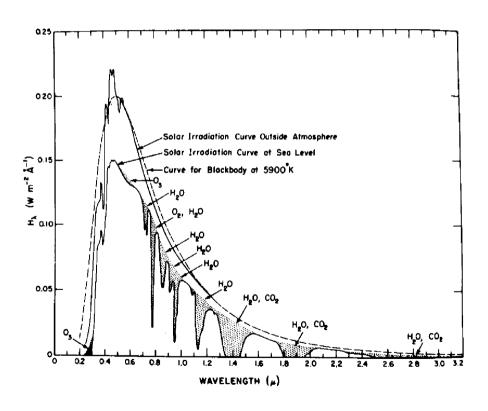
Il fattore che determina la struttura e l'evoluzione dell'intero PBL (e quindi della vita sul pianeta Terra) è:

La disponibilità o l'indisponibilità della radiazione solare incidente sulla superficie terrestre



Bilancio Energetico del PBL

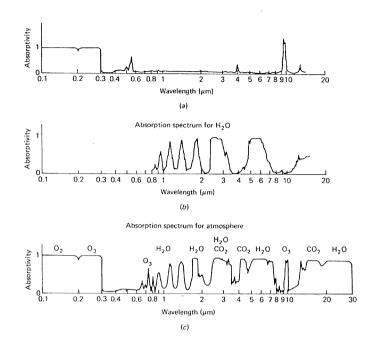
Il PBL è una macchina termica gigante che trasforma l'energia solare in movimento dell'aria. Il sole è, quindi, la principale fonte di energia del PBL.



Il sole emette <u>radiazione</u> <u>elettromagnetica</u> nell'intervallo $0.1 \div 1~\mu m~(\mbox{visibile})$ come un <u>corpo</u> nero a Temperatura di 6000K. (<u>radiazione</u> ad onda corta).



Solo un ristretto numero di gas presenti in aria può assorbire direttamente una porzione di questa energia (~7%).

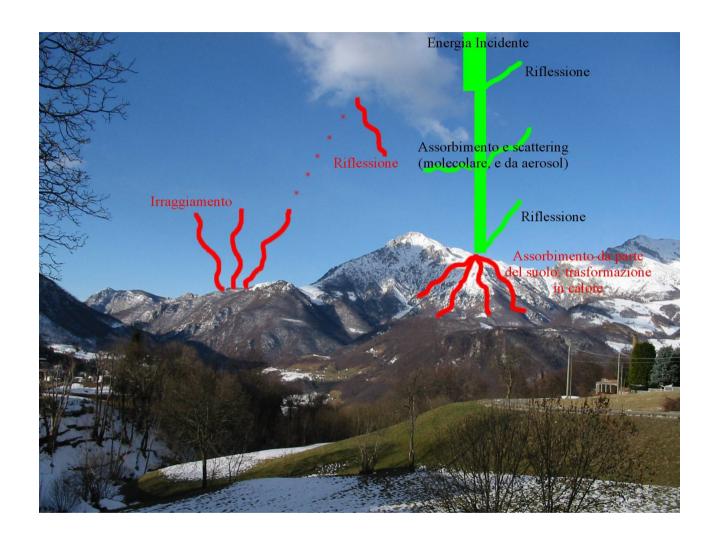


Una parte di radiazione solare è assorbita e riflessa dalle nubi (≈ 27%)

Un'altra parte è riflessa dalle particelle sospese (≈17%)
Un'altra parte è riflessa direttamente dal suolo (albedo ≈6%)

<u>Circa il 43% della radiazione solare arriva</u> <u>direttamente al suolo!</u>



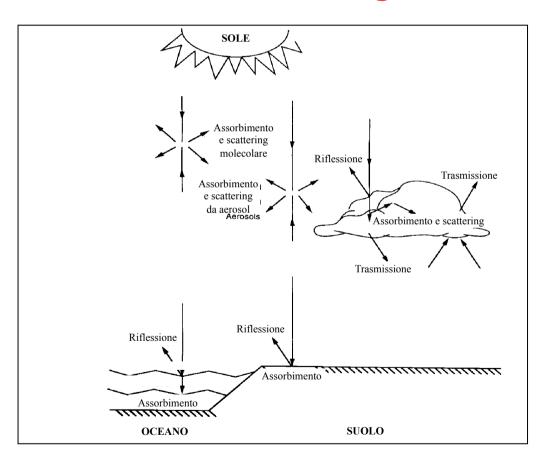


Radiazione Solare incidente Radiazione riflessa dal suolo \Rightarrow Albedo = $-\alpha$ Rg

⇒ Radiazione Globale Rg

 $(\alpha = coefficiente di albedo)$

Energia solare trasferita al suolo:



 $E = (1-\alpha) Rg$

Ci sono <u>due reazioni</u> del sistema fisico al trasferimento di radiazione solare:

- ⇒ L' <u>atmosfera</u> (<u>corpo caldo</u>) ⇒ <u>radiazione</u> <u>all' infrarosso</u> **I** ↓ verso la superficie terrestre.
- ⇒ Il <u>suolo</u> (corpo caldo)
 ⇒ radiazione infrarossa I↑
 verso l'atmosfera

Questi due contributi energetici sono ad onda lunga.

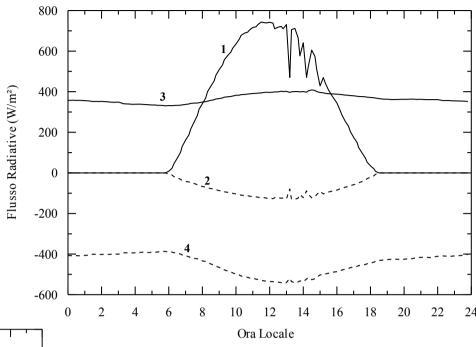
La quantità di <u>energia disponibile al suolo</u> (**Radiazione Netta**) è pari a:

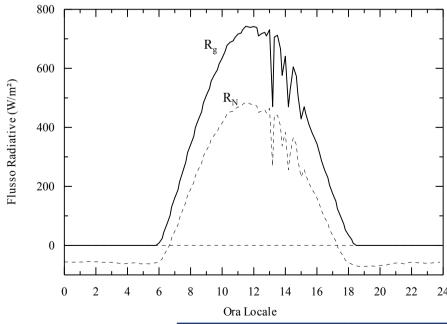
$$R_N = (1-\alpha) Rg + I \downarrow - I \uparrow$$





- 2 Albedo
- 3 Infrarosso dal cielo
- 4 infrarosso terrestre





A fronte di questa disponibilità energetica si ha che:

⇒ Una parte di energia disponibile viene trasmessa per conduzione al suolo

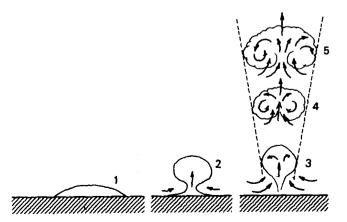
(Flusso di Calore nel suolo G)

⇒ una parte viene usata per evaporare l'acqua presente nel suolo e nella vegetazione

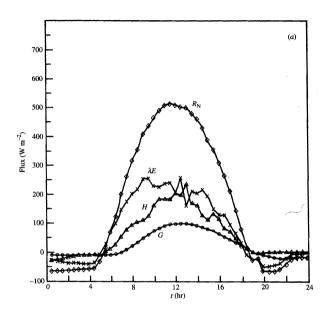
(Flusso Turbolento di Calore Latente H_E)

⇒ il resto viene emessa dal suolo e trasmessa ai primi millimetri d'aria e si trasforma in movimenti irregolari delle masse d'aria del PBL

(Flusso Turbolento di Calore sensibile Ho)



Meccanismo a bolle di Oke per il trasferimento di H_0 all'aria del PBL



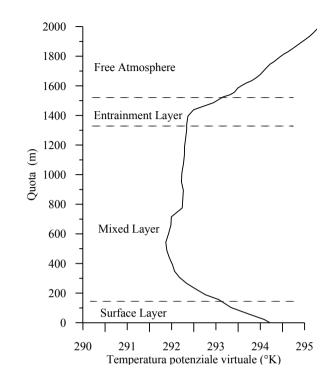
- \Rightarrow R_N è positiva nelle ore diurne fino a che R_g \ge 20 W/m²
- \Rightarrow R_N è sempre negativa di notte nelle aree rurali
- \Rightarrow G è una frazione di R_N
- \Rightarrow La ripartizione tra H_E e H_0 dipende dal tipo di suolo e dalla umidità presente sullo stesso.

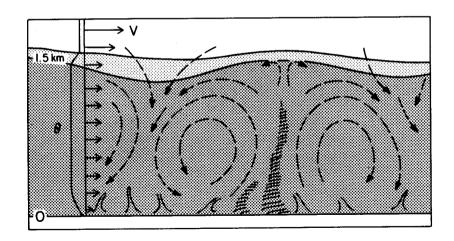
L'aria che <u>passa</u> sopra la *superficie terrestre* **scambia energia** ed altera le proprie caratteristiche fisiche:

- \Rightarrow riceve dal suolo H_0 e H_E e queste sono le **sorgenti** di **energia convettiva**.
- ⇒ a causa della rugosità del suolo, l'aria perde energia per attrito (perdita di energia meccanica). Si genera quindi, come per tutti i fluidi turbolenti in moto su una superficie rugosa, una turbolenza meccanica.
- ⇒ nelle <u>ore diurne</u> quando R_N>0 la <u>turbolenza dovuta all' attrito è</u> quasi sempre minore di quella dovuta alla convezione (<u>Situazioni convettive</u>)
- ⇒ nelle <u>ore notturne</u> (Rn<0), c'è solo una perdita globale di energia (<u>Situazioni Stabili</u>).
- ⇒ lo stato del PBL è differente di giorno e di notte
- ⇒ anche il modo con cui si disperdono gli inquinanti è diver- so nei due casi.

Situazioni Convettive

Profilo di temperatura potenziale





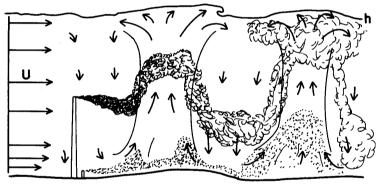
Struttura dei vortici turbolenti



Si vengono ad <u>instaurare</u>:

- ⇒ un flusso ascendente (updraft)
- ⇒ un flusso discendente (dowdraft)

Gli inquinanti emessi vengono catturati dai flussi ascendenti e discendenti e presentano pennacchi caratteristici.





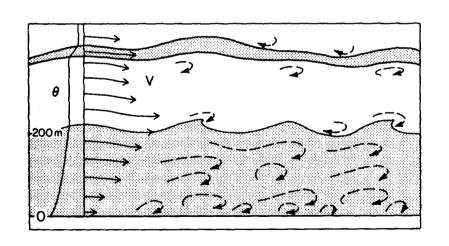
Estensione verticale del PBL → Altezza di Rimescolamento (secondo la nomenclatura usata tra i modelli della dispersione degli inquinanti)

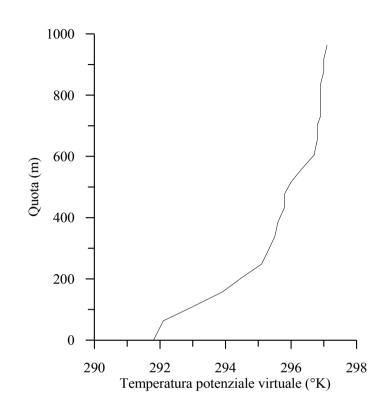
Presenta un' evoluzione diurna caratteristica:

- ⇒ è minima nelle prime ore della mattina (dovuta soltanto alla turbolenza meccanica)
- ⇒ <u>aumenta</u> con l'arrivo di energia solare fino al tramonto ed in particolare in modo proporzionale all'integrale nel tempo del Flusso Turbolento di calore sensibile.
- ⇒ <u>decade</u> molto rapidamente al tramonto con il venir meno dell'apporto energetico solare.

Situazioni Stabile

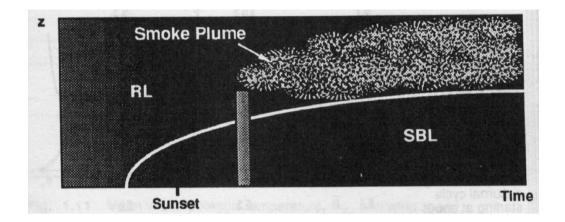
Profilo di temperatura potenziale

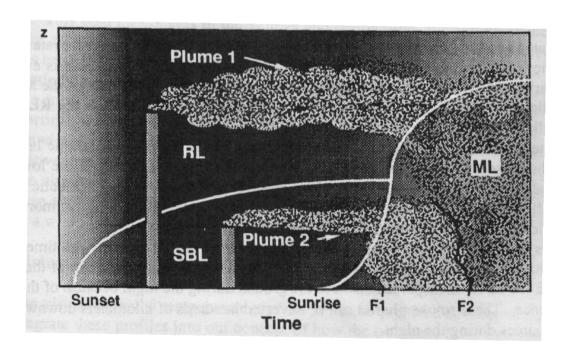




Struttura dei vortici turbolenti

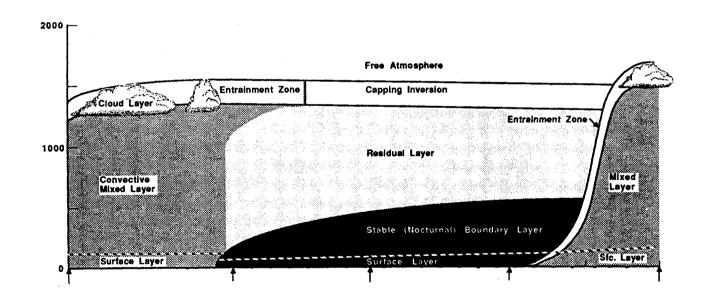








Evoluzione Giornaliera dell' altezza di Rimescolamento



I PARAMETRI CARATTERISTICI DELLA TURBOLENZA

necessari alla sua quantificazione da determinarsi sulla base delle osservazioni nel PBL



Se si misurano le tre componenti del vento e la temperatura con sensori a risposta rapida si vede che:



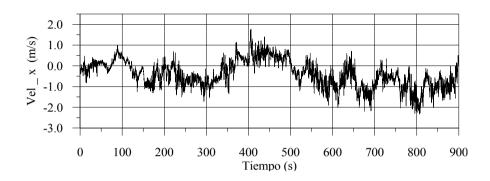
L'andamento nel tempo (e nello spazio) delle variabili meteorologiche presenta un andamento abbastanza regolare cui si sovrappongono irregolarità elevate che paiono "rumore" con caratteristiche di un segnale casuale.

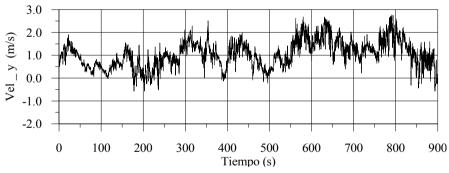


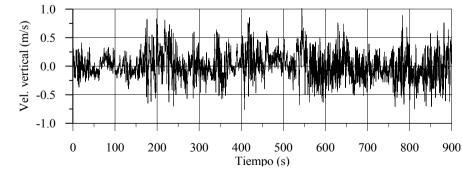
Segnale = <u>andamento medio regolare</u> + <u>fluttuazioni irregolari</u> (<u>turbolente</u>)

Caratteristica esteriore rilevante della turbolenza nel PBL ed in tutti i fluidi turbolenti di interesse geofisico.

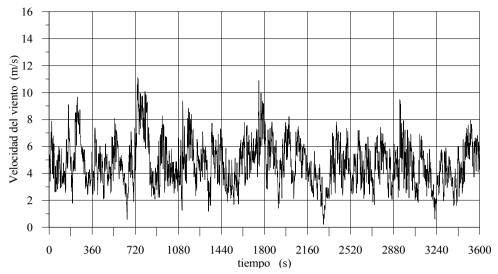
La <u>quantificazione</u> della Turbolenza deve essere necessariamente <u>dedotta</u> dall' **analisi delle fluttuazioni (irregolarità)** contenute nel segnale.







Si può osservare che:



- le fluttuazioni sono apparentemente aleatorie,
- è possibile definire un *valore tipico* (4.8 m/s)
- le fluttuazioni stanno in un *intervallo limitato* variabile nel tempo $(\underline{turbolenza} \Rightarrow \underline{fluttuazioni} \Rightarrow \underline{dev.std.} 1.7 \text{ m/s})$
- esiste una grande varietà di scale sovrapposte:
 - Tempo tra picchi piccoli : circa 1 minuto
 - Tempo tra picchi più elevati: circa 5 minuti
 - Altre variazioni: circa 10 minuti
 - La variazione più piccola: 10 secondi

Ogni scala temporale è associata a vortici di dimensione differente.

Ipotesi di Reynolds

Ogni segnale meteorologico è la sovrapposizione di un andamento medio regolare e di fluttuazioni turbolente apparentemente casuali aventi media nulla.

$$A(t) = \overline{A} + A'(t)$$

Un esempio è la componente u del vento:

$$u(t) = u'(t)$$

Per poter applicare questa ipotesi è necessario:

- ⇒ <u>definire</u> in modo corretto il <u>tempo di mediazione</u> (non inferiore a 15 minuti e non superiore a 1 ora).
- ⇒ che si misuri con un <u>sensore a risposta rapida</u>.

Per come sono realizzate le attuali stazioni meteorologiche, non è possibile acquisire un <u>segnale continuo</u> ma

un insieme di valori A_i ad ogni istante t_i che si considera.

Normalmente gli istanti di campionamento sono equispaziati.

Siano note in un periodo temporale P le misure elementari di una variabile generica A (es. temperatura potenziale virtuale)

$$A_i i=1,2,...,N$$

agli istanti temporali t_i tali che:

$$t_{i+1}$$
- t_i = Δt , $P=N\cdot\Delta t$

Da queste misure elementari (realizzazioni della variabile stocastica A), è possibile definire:

- il valore medio
- i momenti di ordine superiore che, spesso, si riducono alla sola varianza, e che sono uno degli indicatori della turbolenza del PBL



Indicatori statistici della turbolenza del PBL Valore Medio Campionario

$$\overline{A} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} A_i$$

Il valore Medio è sicuramente la prima informazione importante per:

- ogni variabile meteorologica che caratterizza il PBL
- la concentrazione di ogni specie chimica presente nel PBL

Essa rappresenta il comportamento medio della variabile durante il periodo di mediazione e, per l'ipotesi di Reynolds, anche l'informazione deterministica ad essa associata.



Indicatori statistici di turbolenza del PBL

 \Rightarrow **standard deviation** che, per esempio per la componente u del vento, è:

$$\sigma_{u} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} \left(u_{i} - \overline{u} \right)^{2}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} \left(u' \right)^{2}}$$

Il quadrato della deviazione standard è la varianza.

E' possibile definire la varianza anche per le altre due componenti del vento, per la temperatura ed in genere per ogni variabile

⇒ dalla <u>varianza delle tre componenti del vento</u>, è calcolabile l'**energia cinetica turbolenta** (energia posseduta dall'aria a causa della turbolenza presente) definita come:

$$TKE = \frac{1}{2} \left\{ \sigma_u^2 + \sigma_v^2 + \sigma_w^2 \right\}$$

Tra due variabili si può definire la covarianza.

Considerando, per esempio,

la temperatura potenziale θ e la componente w del vento:

$$\overline{w'\theta'} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left\{ \left(\theta - \overline{\theta} \right) \cdot \left(w - \overline{w} \right) \right\} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left\{ \theta' w' \right\}$$

Si può dimostrare che:

la <u>covarianza tra una delle componenti del</u> vento ed una variabile scalare

(temperatura e umidità) rappresenta (a meno di una costante)

il <u>flusso turbolento</u> della variabile scalare nella direzione della componente del vento.

ARPALAZIC



Flusso Turbolento di Calore Sensibile

$$H_0 = \rho C_p \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w' \theta'$$



$$\begin{array}{lll} \partial\theta/\partial z < 0 & \Rightarrow & H_0 > 0 & \Rightarrow \text{Situazione Convettiva} \\ \partial\theta/\partial z = 0 & \Rightarrow & H_0 = 0 & \Rightarrow \text{Situazione Adiabatica} \\ \partial\theta/\partial z > 0 & \Rightarrow & H_0 < 0 & \Rightarrow \text{Situazione Stabile} \end{array}$$

Flusso Turbolento di Calore Latente

$$H_E = \overline{w'q'}$$

<u>Covarianze tra</u> <u>le componenti u e v del vento e la componente w</u>

(a meno di una costante)

<u>sforzo di taglio orizzontale</u> dovuto all'attrito delle masse d'aria sulla superficie terrestre.

In particolare lo **sforzo di taglio** è dato da:

$$\tau = \rho \cdot u_*^2$$

dove u_* (*friction* velocity) è la velocità di scala definita come:

$$u_*^2 = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N u'_i w'_i\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N v'_i w'_i\right)^2\right]}$$



Parametri che caratterizzano la turbolenza del PBL

⇒Forzante Convettiva: Flusso Turbolento Calore Sensibile

$$H_0 = \rho \cdot C_p \cdot \overline{w'\theta'}$$

⇒Forzante Meccanica: *Friction velocity*

$$u_* = \sqrt[4]{\overline{u'w'}^2 + \overline{v'w'}^2}$$

⇒ Altezza di Rimescolamento z_i



Parametri Accessori

Temperatura di Scala T*

$$T_* = -\overline{w'\theta'}/u_*$$

Lunghezza di Monin-Obukhov

$$L = -\frac{\overline{T}}{kg} \frac{u_*^3}{w'\theta'}$$

Velocità convettiva di scala

$$w_* = \left(\frac{g}{T} \frac{H_0}{\rho C_p} z_i\right)^{1/3}$$

RIASSUMENDO

Condizioni Convettive:

$$u_* > 0$$

$$u_* > 0$$
 $H_0 > 0$ $T_* < 0$ L<0

$$T_* < 0$$

Condizioni Adiabatiche:

$$u_*>0$$

$$u_*>0$$
 $H_0=0$ $T_*=0$ $L \rightarrow \pm \infty$

$$T_*=0$$

Condizioni Stabili:

$$u_*>0$$

$$u_*>0$$
 $H_0<0$ $T_*>0$ $L>0$

$$T_* > 0$$

2. LA MISURA DELLA TURBOLENZA

Introduco nel fluido in moto un <u>apparato fisico</u> in grado di <u>mutare</u> <u>una propria caratteristica</u> fisica o chimica <u>in funzione</u> di una delle variabili che caratterizzano lo stato ed il moto del PBL.

Sono in grado (processo di <u>taratura</u>) di porre in relazione in maniera quantitativa la variazione della proprietà dell'apparato con il valore vero della variabile cui si è interessati.

Questo apparato deve <u>catturare</u>, attraverso la variazione di una propria proprietà la variabile meteorologica (o chimica), cioè il segnale micrometeorologico, cui si è interessati e ciò dovrà quantificare nella maniera più precisa possibile i valori e le variazioni nel tempo del segnale stesso.



La differenza quadratica media tra i valori misurati durante un dato periodo (periodo di mediazione) ed i rispettivi valori veri dovrà essere la più piccola possibile e ciò dovrà valere anche ad ogni istante.

... quindi ...

Misura

quantificazione di una variabile mediante l'impiego di **sistemi fisici** in grado di <u>variare</u> una propria caratteristica a seconda del valore assunto dalla variabile considerata.

Misura = F(Variabile da Misurare)

I sistemi di misura reali presentano errori intrinseci sia di tipo statico e che di tipo dinamico.



Sistema di Misura Ideale

E' un apparato che:

- Varia una propria caratteristica fisica o chimica (resistenza elettrica, capacità, moto rotatorio, ecc.) al variare di una variabile meteorologica. Relazione funzionale tra la variabile da misurare e la risposta del sistema.
- Non induce perturbazioni alla variabile da misurare
- La relazione funzionale tra input (la variabile meteorologica da misurare) e l'output del sistema (la variazione di una sua caratteristica fisica o chimica) è di tipo analitico e completamente deterministica
- Ha un sistema di trasduzione dalla variazione di una proprietà del sistema ad un valore numerico (reale) senza perturbazioni
- Ha dimensioni geometriche trascurabili in modo da garantire una misura puntuale di tipo euleriano

Misura ideale → priva di errori

Sistema di Misura Reale

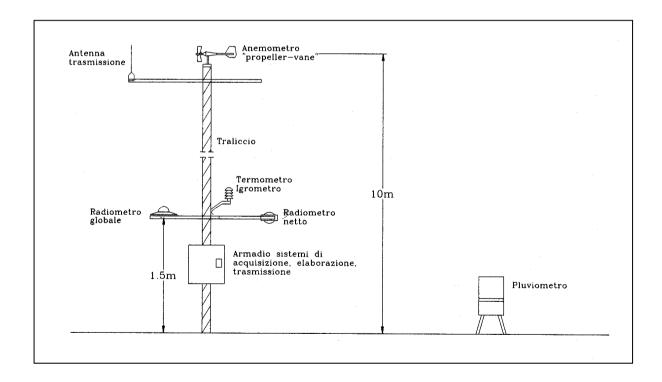
E' un apparato che:

- Varia una propria caratteristica fisica o chimica (resistenza elettrica, capacità, moto rotatorio, ecc.) al variare di una variabile meteorologica. Relazione funzionale tra variabile da misurare e risposta del sistema
- Può indurre perturbazioni alla variabile da misurare
- La relazione funzionale tra l'input (la variabile meteorologica da misurare) e l'output del sistema (la variazione di una sua caratteristica fisica o chimica) è affetta da perturbazioni non facilmente identificabili (casuali) e quindi è sempre di tipo analitico ma non completamente deterministica
- Anche il **sistema di trasduzione** dalla variazione di una proprietà del sistema ad un valore numerico presenta **perturbazioni casuali** che si aggiungono alle precedenti
- Ha dimensioni fisiche finite e quindi non può garantire una misura puntuale

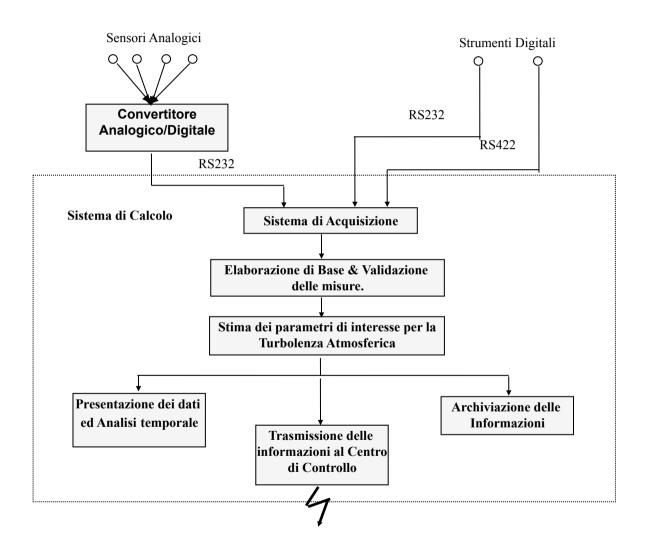
Misura ideale → affetta da di errori

Stazione Meteorologica al suolo

Insieme di sensori collocati nei pressi dell'interfaccia ariasuolo (2÷10 metri dal suolo) organizzati in modo da fornire misure e/o stime di tutti i parametri caratterizzanti il *SL* nella località in cui è posta la stazione.



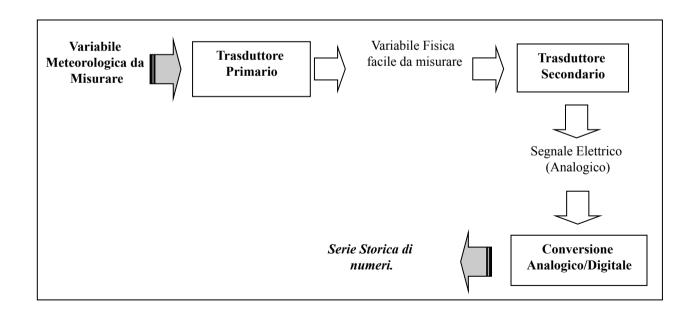
Architettura Funzionale di una Stazione Meteorologica

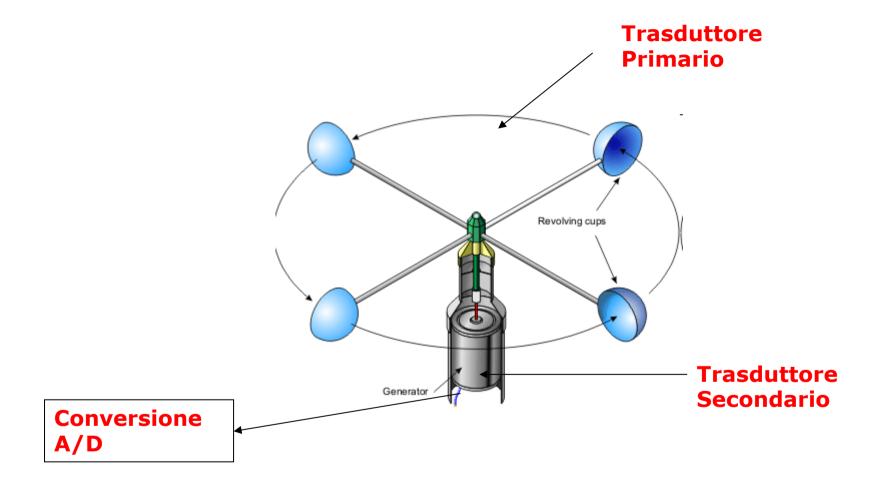


Catena di misura

<u>Percorso fisico/logico</u> che consente di ottenere il valore numerico che quantifica una variabile di interesse, cioè:







Caratteristiche di uno strumento di misura

⇒ Caratteristiche statiche: proprietà intrinseche al sensore che non dipendono dalla variazione nel tempo del segnale cui è sensibile (precisione, sensibilità, linearità, risoluzione, ecc.)

⇒ Caratteristiche dinamiche: proprietà che descrivono la risposta del sensore in funzione dell'andamento nel tempo del segnale meteorologico di ingresso.

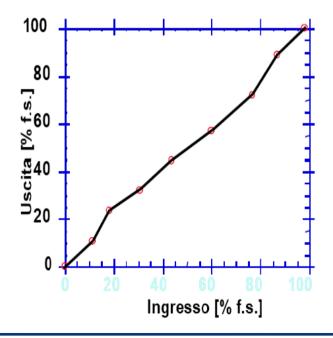


Caratteristiche statiche

Insieme di indicatori che definiscono il **comportamento del sensore** quando l'**input** (variabile da misurare, meteorologica o concentrazione di una sostanza in aria) è costante.

<u>Caratteristica Principale</u> ⇒ <u>Curva di Taratura</u>

Relazione matematica che lega tra loro l'input (valore vero della variabile da misurare) con l'output (valore assunto da una proprietà del sensore)



Le caratteristiche che deve avere la relazione matematica che descrive quantitativamente la Curva di Taratura sono le seguenti:

- deve essere una relazione esplicita e non implicita
- deve essere monotona (crescente o decrescente), cioè con derivata prima che non cambia di segno
- possibilmente non deve essere troppo diversa da una retta.

Dalla Curva di Taratura si possono ottenere:

Sensibilità: è il rapporto tra una variazione dell'output dovuto ad una variazione di input, cioè la pendenza della curva di Taratura. Se la curva di taratura è lineare, la sensibilità del sensore è costante

Offset (Spiazzamento): valore dell'output quando l'input è nullo

Range: intervallo di variabilità della grandezza da misurare conside-

rato dalla Curva di Taratura

Span: estremo superiore del range – estremo inferiore del range

Altre caratteristiche importanti sono:

Risoluzione: minima variazione della variabile da misurare in grado di

provocare una variazione dell' output.

Soglia: minimo ingresso misurabile a partire da zero

Stabilità: capacità di un sensore di mantenere prestazioni vicine alla

Curva di Calibrazione.

Precisione: grado di concordanza tra i valori misurati nelle medesime

condizioni. In sostanza, se faccio N misure ripetute col medesimo sensore nelle medesime condizioni, una buona precisione implica che tutte le misure siano vicine tra loro. Ciò non significa che esse siano anche vicine al valore vero

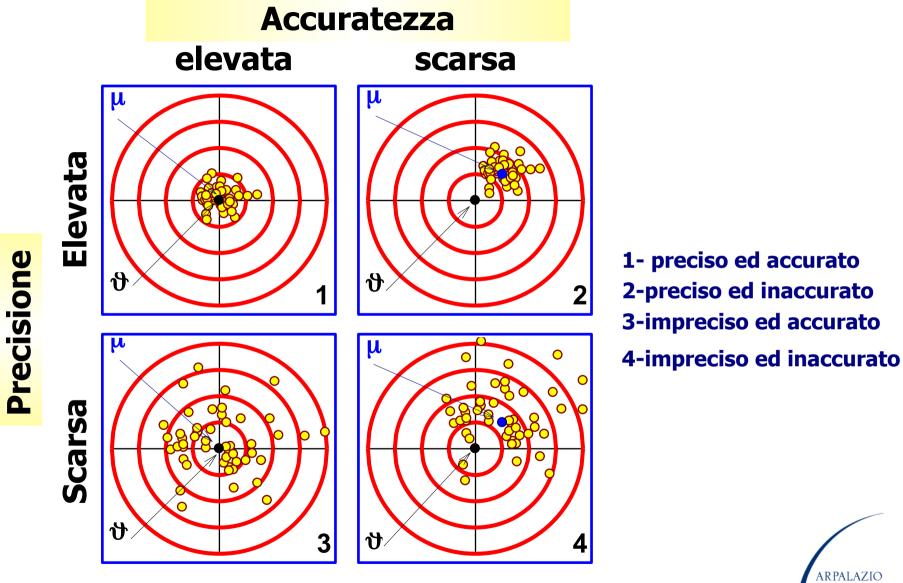
della variabile da misurare.

Accuratezza: grado di concordanza tra un valore misurato ed il valore

vero della variabile oggetto della misura.





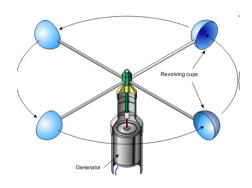


Caratteristiche Dinamiche dei Sensori Primari

Consideriamo un esempio

Misura della Velocità orizzontale del vento con un Anemometro a Coppe

<u>Principio di misura</u>: trasferimento di quantità di moto dall'aria in movimento a coppe poste rigidamente attorno ad un punto di rotazione centrale.



D = diametro frontale di una coppa

A = area frontale di una coppa = $\pi D^2/4$

R = distanza dal baricentro di ogni coppa dal punto di rotazione comune

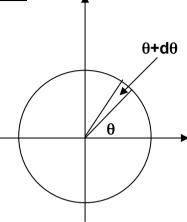
Costruzione di un modello matematico semplificato dell'anemometro a coppe





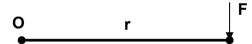
A) Moto circolare di un punto materiale rispetto a O

Velocità angolare $\omega = d\theta/dt$



B) Momento della forza F dovuta all'azione del vento su una coppa

$$|T_d = r \cdot F|$$



C) <u>Momento della forza R derivante dalla resistenza alla rotazione</u> <u>delle coppe</u> (resistenza aerodinamica, attrito dei cuscinetti, ecc.)

$$T_r = r \cdot R$$



D) Momento della quantità di moto di un anemometro a coppe

Per prima cosa va definito il **momento d'inerzia J** dell'anemometro. Essendo a simmetria assiale, se m è la massa di ciascuna coppa ed N è il numero di coppe, si ha che:

 $J = N \cdot m \cdot r^2$

Il Momento della Quantità di Moto dell'anemometro in rotazione sarà:

$$B = J \cdot \omega$$

E) Secondo principio della Dinamica

La derivata rispetto al tempo del momento della quantità di moto di un corpo rigido rispetto ad un punto di rotazione O è pari al momento della risultante delle forze che agiscono su di esso, calcolato rispetto al medesimo punto.

$$J\frac{d\omega}{dt} = T_d - T_r$$

L'espressione di T_d e T_r dipende:

- principalmente dalla velocità orizzontale del vento U
- ma anche dalla geometria dell'anemometro, dal numero di coppe e dalla loro forma

Comunque, in generale si avrà che:



Modello Dinamico dell' Anemometro a Coppe

$$J\frac{d\omega}{dt} = \rho ArU^2 \cdot \text{Funzione}(U, \omega, r, A, ...)$$

Quindi un anemometro a coppe risponde ad una velocità del vento U con una rotazione delle coppe attorno all'asse di rotazione O.

Tale risposta è descritta da una relazione differenziale ordinaria alle derivate totali del primo ordine che lega tra loro U e ω .

Pur restando una relazione differenziale del primo ordine, la sua struttura di dettaglio (es. i coefficienti presenti) dipendono dalla geometria e dal numero delle coppe.

Se costruiamo un modello matematico per una termoresistenza (sensore primario per la misura della temperatura dell'aria) per un barometro o per altri tipi di sensori, otterremo sempre delle relazioni differenziali che legano tra loro la grandezza meteorologica di interesse e la caratteristica fisica o chimica del sensore che varia in corrispondenza di questa variabile meteorologica.

Quindi, in generale:





Se:

 \Rightarrow **y** segnale meteorologico = valore <u>vero</u> assunto da una variabile di interesse in un punto P(x,y,z) dello spazio (es. entro il SL) e ad un istante t

 \Rightarrow **x** risposta del sensore, cioè il valore numerico che fornisce un generico sensore quando viene impiegato nella misura della variabile y in un dato punto P(x,y,z) e ad un certo tempo t

la <u>risposta dinamica</u> di un sensore è data dall'equazione differenziale seguente:

$$a_n \frac{d^n x}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = F(y, t)$$

n = Ordine del sensore = grado dell'equazione differenziale.

In pratica vanno considerati solo i sensori di:

- Grado 0 (i migliori)
- Grado 1
- Grado 2



Sensore di Ordine 0

$$x = y(t)$$

Relazione algebrica tra risposta del sensore e variabile da misurare.

- ⇒ Non presenta distorsioni o ritardi di risposta.
- ⇒ <u>Sensore ideale per le misure micrometeorologiche</u>.



Esempi di sensori del Primo Ordine







Anemometro Sonico Triassiale

E' anche un termometro ed è l'unico sensore in grado di misurare direttamente i parametri che caratterizzano la turbolenza atmosferica



Sensore di Ordine 1

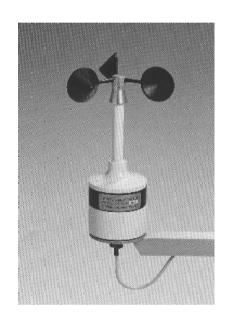
La Relazione dinamica si riduce ad un'equazione differenziale ordinaria di primo grado

$$\tau \frac{dx}{dt} + x = y(t)$$

Per comprendere meglio come varia la risposta di un sensore di ordine 1 alla variazione nel tempo del segnale meteorologico, è opportuno studiare la sua **equazione caratteristica** per <u>due input tipici</u>: l'ingresso a gradino e l'ingresso sinusoidale.



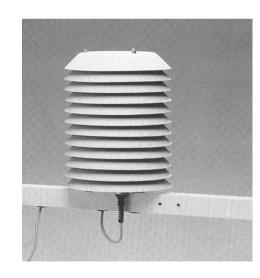
Esempi di sensori del Primo Ordine



Anemometro a Coppe



Termoigrometro



Analisi del suo comportamento dinamico

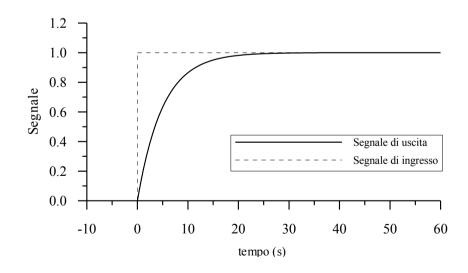
Risposta ad un ingresso a gradino

- \Rightarrow y = variabile da misurare \rightarrow andamento temporale a gradino
- \Rightarrow x = risposta del sensore

$$y = \begin{cases} 0 & \text{per } t < 0 \\ y_0 & \text{per } t \ge 0 \end{cases}$$



$$x(t) = y_0 \left(1 - e^{-t/\tau} \right)$$

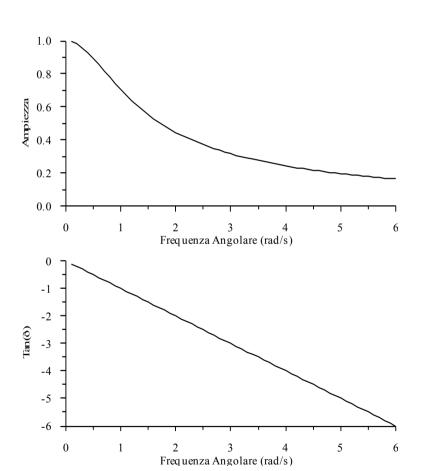


Risposta ad un ingresso periodico

$$y(t) = y_0 \sin(\Omega t)$$

$$x(t) = y_0 \cdot \Phi \cdot \sin(\Omega t + \delta)$$

$$\Phi = 1/\sqrt{1 + \tau^2 \Omega^2}$$



La risposta del sensore ad un segnale sinusoidale in input:

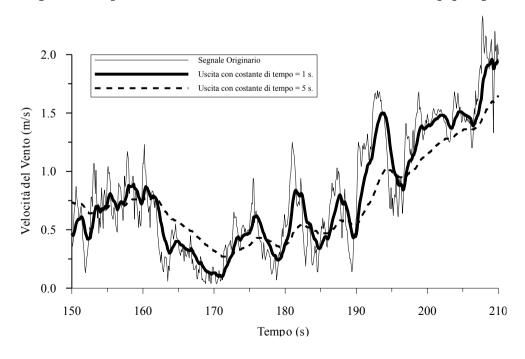
- ancora sinusoidale, ma
- con <u>sfasamento</u> δ rispetto al segnale di input e
- sia δ che Φ dipendono dalla frequenza angolare Ω del segnale in ingresso

Se si considera un segnale meteorologico del tutto generale come quello illustrato dalla riga continua sottile nella figura, le caratteristiche dinamiche di un sensore del primo ordine comportano che l'output di tale sensore risulti più o meno distorto rispetto al segnale di input



Filtro passa basso

(Esempio di due anemometri a coppe)



Sensore di grado 2

La Relazione dinamica si riduce ad un'equazione differenziale ordinaria di secondo grado

$$a_2 \frac{d^2x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = y(t)$$

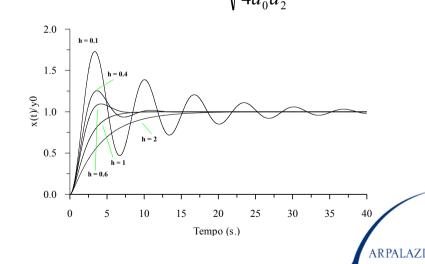
Risposta ad un segnale a gradino:

Parametri fondamentali sono ω (frequenza caratteristica) e h

(rapporto di smorzamento)

Se h<1 la risposta al gradino è oscillante

Se h>1 la risposta al gradino è da filtro passa-basso

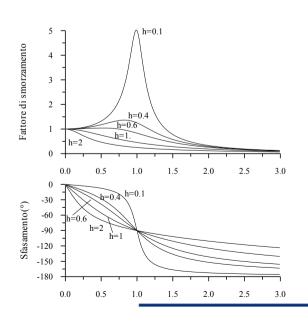


Risposta ad un segnale armonico

La risposta del sensore è apparentemente ancora armonica con ampiezza e sfasamento fortemente dipendenti dalla frequenza del segnale.

$$x(t) = \frac{y_0}{a_0} \cdot \Phi \cdot \sin(\Omega t + \delta)$$

$$\Phi = \frac{1}{\sqrt{(1-a^2)^2 + 4h^2a^2}} \qquad tg(\delta) = \frac{-2ha}{1-a^2}$$



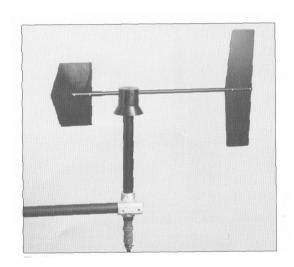
Se **h>1** il sensore si comporta in modo simile ad un sensore di ordine 1 (filtro passa-basso)

Se h<1, a frequenze Ω inferiori a quella caratteristica ω il sensore presenta una risposta amplificata che raggiunge il massimo quando $\Omega=\omega$



Totale e imprevedibile deformazione del segnale

Esempio di sensori del Secondo Ordine



Misuratore della Direzione di provenienza del vento



Riassumendo

Un sensore di ordine 0 è un sensore ideale <u>senza distorsioni nel</u> <u>segnale di uscita</u>. Praticamente è l'unico tipo di sensore in grado di realizzare misure micrometeorologiche corrette.

Un sensore di ordine 1 si comporta come un filtro passa-basso e perde sempre una parte del segnale, in particolare la parte ad alta frequenza. Un tale sensore può essere impiegato per misure meteorologiche (valori medi), mentre per misure micrometeorologiche può essere impiegato solo se non esistono alternative e dopo aver applicato opportune correzioni.

Un sensore di ordine 2 è un sensore critico, dato che introduce sempre in uscita qualcosa di oscillante e di artificiale che altera senza rimedio il segnale meteorologico originale. Non andrebbe mai usato.

3. I principali sensori meteorologici impiegati nello studio del PBL

Misura del vento

Anemometro Convenzionale Meccanico

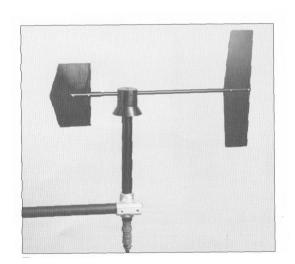
Composto da due parti:

- ⇒ Anemometro a coppe
- ⇒ Sensore a banderuola

spesso integrati in un unico sensore.



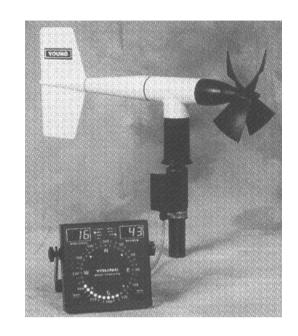
Sensore Ordine 1



Sensore Ordine 2

Anemometro Gill monopropeller

Sensore Ordine 1





Anemometro Gill Triassiale

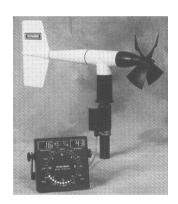
Sensore Ordine 1



Sensori della velocità del vento

Gli anemometri presentati nelle figure precedenti sono tutti di <u>tipo</u> meccanico.

- 1) L'equipaggio mobile è costituito:
- da un equipaggio mobile costituito da bracci incernierati in un lato al perno di rotazione e nell'altro fissati ad una coppa;
- da un' elica che ruota nel piano verticale.

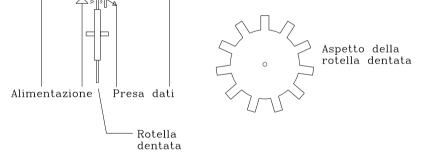






- 2) La rotazione dell'equipaggio mobile è <u>convertita</u> in un segnale elettrico continuo (<u>segnale analogico</u>):
 - ⇒ in generale in un segnale di tensione (spesso non superiore a 1
 V) da una dinamo tachimetrica.

⇒ oppure un <u>fotochopper</u> trasforma la velocità di rotazione delle coppe in impulsi luminosi che vengono poi convertiti in impulsi elettrici per unità di tempo, proporzionali alla velocità di rotazione delle coppe ;



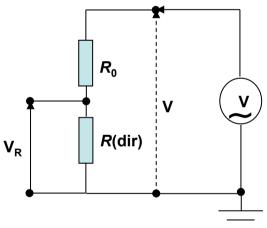
3) Il segnale analogico viene inviato in un data-logger che lo campiona e lo trasforma in un segnale digitale (cioè un insieme di numeri).

Misuratore della direzione di provenienza del vento

Il misuratore della direzione di provenienza del vento è costituito sostanzialmente da una banderuola incernierata su di una **resistenza variabile** (potenziometro) R(dir) il cui valore varia a seconda dell' orientamento presentato dalla banderuola.

La resistenza R(dir) è inserita in un **circuito elettrico resistivo** (un partitore resistivo) con lo scopo di <u>trasformare la resistenza variabile in una tensione variabile</u>. Il più semplice circuito di questo tipo è quello qui sotto disegnato (R_0 è una resistenza con dato valore fisso) e la resistenza V_R è legata alla resistenza R(dir) dalla relazione seguente:

$$V_R = \frac{R(dir)}{R_0 + R(dir)} \cdot V$$

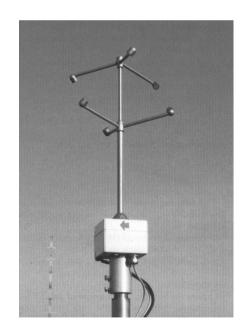


Il segnale analogico di tensione viene infine acquisito da un data-logger che lo trasforma in un segnale digitale.

Anemometro Sonico Biassiale

Sensore di Ordine 0





Anemometro Sonico Triassiale

Sensore di Ordine 0

E' anche un termometro ed è l'unico sensore in grado di misurare direttamente i parametri che caratterizzano la turbolenza atmosferica



Principio di Funzionamento

In <u>aria ferma</u>

Un impulso sonoro generato in un fluido in quiete genera una variazione locale di pressione e di densità che si propaga con la velocità del suono c data dalla relazione sequente:

$$c^{2} = \frac{C_{pa}}{C_{va}} \cdot R \cdot T \cong 402.7 \cdot T \cdot \left(1 + 0.32 \cdot \frac{e}{P}\right)$$

 C_{pa} = calore specifico a pressione costante C_{va} = calore specifico a volume costante

R = costante dei gas

Come si vede, la velocità del suono dipende

- dalla **temperatura dell'aria** T,
- dall' umidità dell' aria (tensione di vapore) e
- dalla pressione barometrica P



Esempio

Consideriamo una situazione in cui:

La Distanza Emettitore – Trasmettitore = 20 cm La Temperatura dell'aria = 20°C L'Umidità dell'aria = 0%

$$c = \sqrt{402.7 \cdot 273.15} = 343.6 \ m \cdot s^{-1}$$
$$t = \frac{0.2 \ m}{343.6 \ m \cdot s^{1}} = 582.1 \ \mu s$$

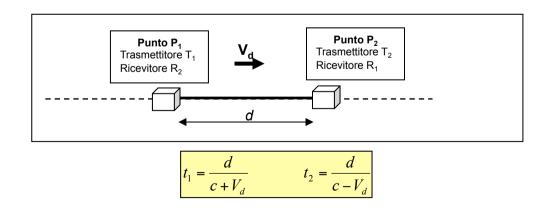
Nel caso in cui il fluido (l'aria) non sia in quiete, ma in movimento con velocità V_d (parallela al segmento che unisce l'emettitore al trasmettitore)



La velocità dell'impulso sonoro viene alterata

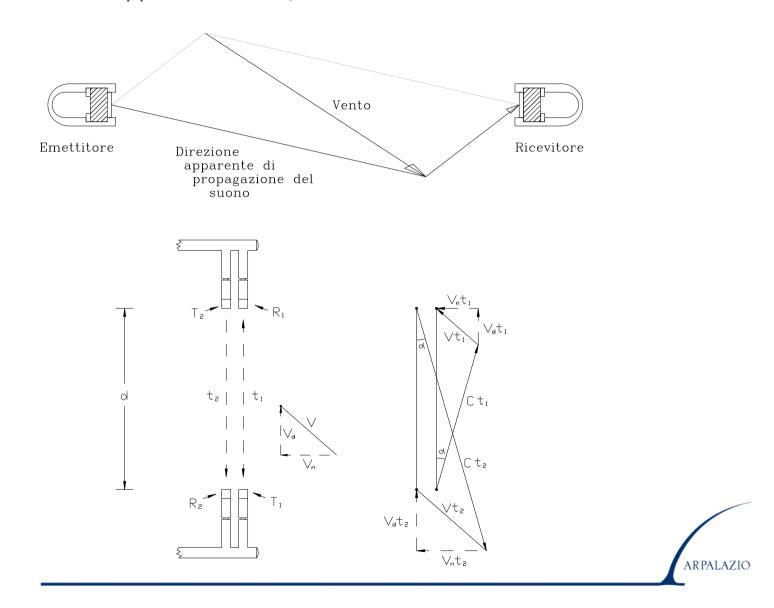
E' come se l'impulso sonoro si comportasse come un punto materiale la cui velocità risulta la somma algebrica della velocità del suono in quiete e della velocità del fluido.

Consideriamo **due coppie** emettitore/ricevitore che inviano due impulsi in <u>direzioni opposte</u>. Siano t_1 e t_2 i tempi che i due impulsi impiegano per coprire la distanza d tra le due coppie





Consideriamo, ora, il caso in cui la velocità del vento non sia parallela all'asse delle due coppie emettitore/trasmettitore



Le due componenti del vento sono:

 V_d = componente diretta lungo l'asse che congiunge le due coppie E/T

 V_n = componente diretta perpendicolarmente all'asse E/T

Se misuro t_1 e t_2 , dalle relazioni seguenti che derivano da considerazioni geometriche fatte sulle figure precedenti, si ha che:

$$\Delta t = \frac{2V_d d}{c^2 - V^2}$$

$$V^2 = V_d^2 + V_n^2$$

Visto che $c^2 >> V^2$, la relazione precedente si può semplificare in:

$$\Delta t = (2d/c^2) \cdot V_d$$

Da questa relazione è immediato ottenere V_d.

Se possiedo <u>tre</u> coppie E/T con <u>percorsi diversi non complanari</u>, <u>posso ottenere le tre componenti del vento.</u>

Questo era il metodo adottato dai primi anemometri sonici triassiali

Il problema era la necessità di conoscere c (la velocità del suono) che dipende però dalla temperatura, pressione ed umidità dell'aria (continue calibrazioni del sensore)

ARPALAZIC

Metodo Moderno

Invece di considerare i tempi di percorrenza del path, consideriamo i loro reciproci.

Sottraendo tra loro il reciproco di t₁ e t₂ si ha che:

$$\boxed{\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} = \frac{2}{d} V_d}$$

$$\boxed{\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} = \frac{2}{d} V_d} \qquad V_d = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right)$$

- E' quindi immediato individuare V_d che dipende solo dal path d
- Avendo a disposizione tre coppie E/T poste su percorsi sghembi non complanari è possibile individuare le tre componenti del vento (dopo opportune rotazioni per riportarsi ad un sistema di riferimento strumentale ortogonale)



Sommando tra loro il reciproco di t_1 e t_2 si ha che:

$$\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} = \frac{2}{d} \left(c^2 - V_n^2 \right)$$

$$\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} = \frac{2}{d} \left(c^2 - V_n^2 \right)$$

$$c^2 = \frac{d}{4} \left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right)^2 + V_n^2$$

Pertanto, in questo modo, è possibile determinare l'effettiva velocità di propagazione del suono.

Ricordando che la velocità del suono dipende dalla temperatura e dall'umidità dell'aria e dalla pressione barometrica secondo la relazione:

$$c^{2} = \frac{C_{pa}}{C_{va}} \cdot R \cdot T \cong 402.7 \cdot T \cdot \left(1 + 0.32 \cdot \frac{e}{P}\right)$$

cioè:

si ha che:

$$T_s = \frac{d^2}{1612} \left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right)^2 + \frac{v_n^2}{403}$$

- \Rightarrow Se si conosce il path d ed t_1 e t_2 per tre path non complanari si ottengono le tre componenti del vento
- ⇒ Note le tre componenti del vento, si conosce la velocità del suono c
- ⇒ Nota la velocità del suono si ottiene una temperatura dell'aria prossima alla temperatura virtuale (temperatura sonica).

Quindi:

- ⇒ Un anemometro sonico è un sensore delle componenti cartesiane del vento di Ordine 0, quindi con caratteristiche dinamiche praticamente perfette.
- \Rightarrow Ha una precisione estremamente elevata nella misura del vento(0.01 m·s⁻¹)
- ⇒ Può funzionare con una frequenza di campionamento effettiva molto elevata (10÷40 Hz) fornendo un numero di campioni statisticamente significativo
- ⇒ E' anche un termometro veloce, sempre di Ordine 0 e sempre con la stessa frequenza di campionamento usata per le componenti del vento
- ⇒ Misura la temperatura con elevata precisione (0.01 K)

E' quindi lo strumento ideale per le misure di turbolenza nel SL



Anemometro Sonico a geometria non ortogonale

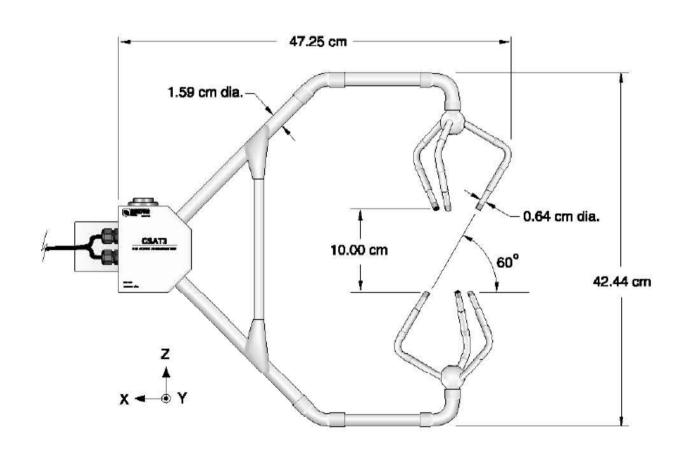




Anemometro Sonico a geometria ortogonale

Nelle realizzazioni attualmente disponibili la frequenza sonora sta nella banda degli ultrasuoni (40 kHz) per garantire una maggiore direzionalità agli impulsi e minori disturbi esterni.

Geometria ad orientamento preferenziale



La maggior parte degli anemometri ultrasonici triassiali disponibili consente di acquisire anche segnali di tensione esterni provenienti da altri sensori.

Esistono sensori all'infrarosso in grado di misurare con una dinamica simile a quella dell'anemometro ultrasonico il contenuto di vapor d'acque e di CO₂ dell'aria.



E' possibile ottenere dalla combinazione dei due sensori collegati tra loro e sincronizzati dall'anemometro ultrasonico, serie storiche sincronizzate ad elevata frequenza di di (u,v,w), di temperatura sonica, di H₂O e di CO₂.





Misure di Temperatura dell'aria

Tutti i sensori di temperatura usati nelle stazioni meteorologiche automatiche sono **sensori di tipo elettrico**, cioè <u>strumenti che manifestano</u> <u>effetti elettrici in funzione della temperatura dell'aria cui vengono in</u> contatto.

In pratica si usano sensori differenti ed in particolare:

- ⇒ Sensori che alterano la propria resistenza elettrica in funzione della temperatura dell'aria che li lambisce (termoresistenze e termistori)
- ⇒ Sensori che producono una **differenza di potenziale elettrico** proporzionale alla differenza di temperatura che l'aria presenta in due punti dello spazio (**termocoppie**)





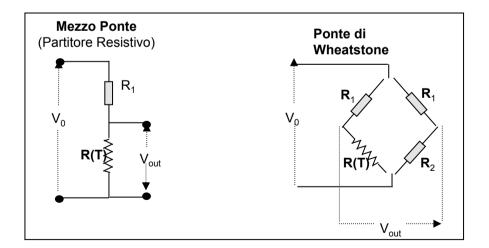
Per evitare che la radiazione solare produca un riscaldamento del sensore primario che falserebbe la misura della temperatura dell'aria, il termometro viene alloggiato in un'apposita protezione (shelter) che limita questo inconveniente.

Termoresistenza

La <u>proprietà elettrica</u> su cui si fonda il funzionamento di una termoresistenza è che:

La resistenza elettrica di un materiale dipende dalla temperatura a cui si trova.

Normalmente l'elemento sensibile di una termoresistenza è una porzione piccola di metallo (per esempio Platino, Rame, ecc.) che costituisce una resistenza in un ponte resistivo (mezzo ponte o ponte di Wheatstone)



La relazione che intercorre tra la resistenza elettrica del metallo e la temperatura in cui è immerso è del tipo:

$$R(T) = R_{T=0} \circ C \left[1 + \alpha T + \beta T^2 \right]$$

dove i coefficienti α e β dependono dal materiale che si sta considerando.

Se, per esempio, si considra il Platino, $\alpha = 3.92 \ 10^{-3} \ e \ \beta = -0.55 \ 10^{-6}$.

Normalmente i sensori utilizzati nelle stazioni automatiche sono costituiti da resistenze di platino che a 0°C presentano una resistenza elettrica di $100~\Omega$. In questo caso essi vengono denominati **PT100**.

Conduttore	α	β
Tungsteno	4.50 10-3	0.5 10-6
Rame	4.30 10-3	-
Platino	3.92 10-3	-0.55 10-6
Nickel	6.70 10-3	-

Termistore

Un'<u>alternativa</u> ad una termoresistenza (costosa, dato che normalmente il metallo impiegato è il platino) è quella di usare un **semiconduttore** (**termistore**).

Anche in questo caso la **resistenza elettrica del termistore è proporzionale alla temperatura dell'aria circostante**, con una relazione funzionale ben differente da quella di una termoresistenza:

$$R(T) = R_{T_0} \cdot \exp[B(T^{-1} - T_0^{-1})]$$

In cui T_0 è la temperatura di riferimento cui corrisponde la resistenza elettrica R_{T0} e B è una costante che dipende dal tipo di semiconduttore impiegato.



Termocoppie

Effetto Seebeck

Due fili di metallo differente che sono connessi in due punti e costituiscono un circuito elettrico, determinano una differenza di potenziale proporzionale alla differenza di temperatura esistente tra questi due punti (giunzioni)

In pratica, si usano solo alcuni tipi di termocoppie, ciascuna caratterizzata dal rapporto A tra la tensione prodotta e la differenza di temperatura esistente tra le due giunzioni (coefficiente di Seebeck in $\mu V/^{\circ}C$):

Tipo J:	fili di <i>Ferro / Rame - Nichel</i>	$A = 50.2 \ \mu\text{V/}^{\circ}\text{C}$
Tipo K:	fili di <i>Nichel- Cromo/ Nichel - Alluminio</i>	$A = 39.4 \ \mu V/^{\circ}C$
Tipo E:	fili di <i>Nichel- Cromo / Rame - Nichel</i>	$A = 58.5 \mu V/^{\circ}C$
Tipo T:	fili di <i>Rame / rame - Nichel</i>	$A = 38.0 \ \mu V/^{\circ}C$

La relazione matematica tra la tensione e la differenza di temperatura tra le giunzioni è del tipo:

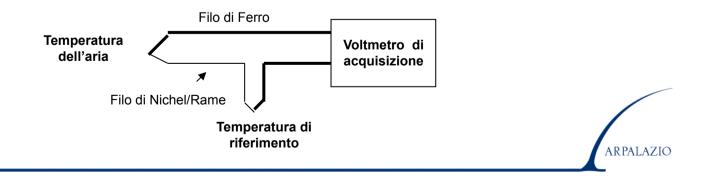
$$V(T - T_0) = S_1(T - T_0) + S_2(T - T_0)^2$$

I coefficienti presenti nella relazione dipendono dal tipo di termocoppia (per es. per termocoppia di tipo J, $S1 = 41 \,\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ e $S2 = 0.04 \,\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$).

Il <u>problema</u> nell'uso di una termocoppia è che **essa è in grado solo di misurare la differenza di temperatura tra due punti** (giunto caldo e giunto freddo) e **non la temperatura assoluta** di un punto.

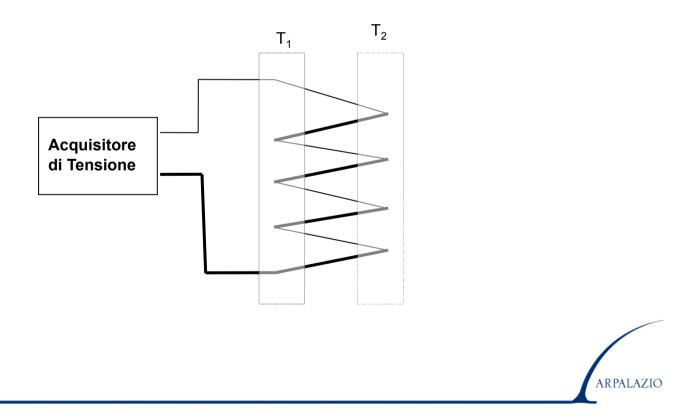
Il **circuito di misura** usato normalmente è quello illustrato qui di seguito, in cui uno delle due giunzioni (**giunto caldo**) è a contatto con l'aria di cui si richiede la temperatura (in generale in maniera indiretta visto che la giunzione viene a rovarsi entro lo shelter di protezione) e l'altra giunzione (**giunto freddo**) viene a trovarso in un punto a temperatura nota e costante (per esempio può essere un bagno con ghiaccio a 0°C o un contenitore ad alta inerzia termica la cui temperatura è misurata da un termistore).

La tensione rilevata dal voltmetro è la differenza di temperatura tra giunto caldo e giunto freddo. Se a tale differenza si aggiunge la temperatura del giunto freddo, si ottiene immediatamente la temperatura asoluta del giunto caldo.



Le termocoppie non servono solo per la misura della temperatura dell'aria, ma possono costituire l'elemento sensibile anche per altri tipi di sensori (radiometri).

Consideriamo una connessione di termocoppie come quella presentata nella figura seguente (**Termopila**) in cui sono connesse tra loro molte termocoppie tutte con i giunti collocati in punti alle temperature T_1 e T_2 .



Ognuna delle termocoppie presenti genera una tensione V_p , proporzionale alla differenza di temperatura T_2 - T_1 .

La connessione delle termocoppie è tale che <u>alla fine</u> la termopila fornisce al sistema di acquisizione una differenza di potenziale pari a:

$$V_{tot} = N \cdot V_p$$

cioè la termopila costituita da N termocoppie produce una tensione pari a N volte quella prodotta da una singola delle termocoppie presenti.

Nelle realizzazioni pratiche (radiometri) in cui si è interessati a misurare la differenza di temperatura tra due punti molto vicini, la termopila può essere costituita da numerosissime termocoppie miniaturizzate.



Misura della Umidità dell'Aria

L'igrometro è un sensore che misura l'umidità relativa e, in una stazione meteorologica automatica, normalmente è costituito da un <u>elemento sensibile</u> che, in pratica, è un condensatore con un dielettrico che varia la propria caratteristica in funzione dell'umidità dell'aria.

Un opportuno cicuito elettrico trasforma la variazione di capacità del condensatore in una tensione, facilmente misurabile.

Misura della Pressione Atmosferica

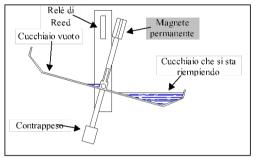
Il **barometro** è il sensore che misura la **pressione atmosferica**. L'elemento sensibile più impiegato nelle stazioni meteorologiche automatiche è costituito da una cella che si deforma in funzione della pressione atmosferica. E' sufficiente misurare questa deformazione meccanica per ottenere il valore della pressione.



Misura della pioggia

Il **pluviometro** è il sensore più utilizzato per misurare la quantità di pioggia giunta al suolo in un dato periodo.

Questo sensore è costituito fisicamente da un cilindro metallico di dimensione nota con un fondo a forma di imbuto che invia l'acqua raccolta ad un **sistema basculante** come quello presentato nella figura sequente.



La bascula ha due possibili posizioni di equilibrio stabile (bascula alla sinistra e bascula alla destra) e passa da una posizione all'altra ogni volta che che il cucchiaio è pieno di acqua.

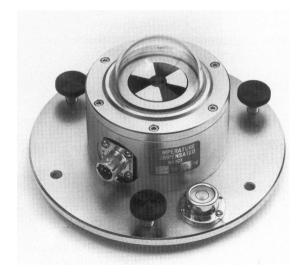
Quando giunge alla nuova posizione di equilibrio, la bascula si svuota ed in corrispondenza a ciò un sistema magneto-elettrico emitte un impulso di tensione che il sistema di acquisizione è in grado di registrare.

Misure di Radiazione

Radiazione Solare Globale

Il **radiometro globale** (**piranometro**) è un sensore che misura la Radiazione Solare Totale (la radiazione ad onda corta, nel visibile).

Il tipo più comune è il **radiometro a termopila**.



L'<u>elemento sensibile</u> dello strumento è costituito da **settori bianchi** (riflettenti) e **settori neri** (assorbenti).

Il principio di funzionamento se basa sul differente grado di assorbimento di energia termica da parte di superfici a colore differente:

- assorbimento minimo da parte delle superfici bianche
- assorbimento massimo da parte delle superfici nere.

Ciò determina una <u>differenza di temperatura tra i vari settori</u> che produce una tensione nella termopila che è annegata nel substrato che costituisce la superficie a settori.

La termopila misura la radiazione che passa attraverso una **cupola di quarzo sintetico** che ha due funzioni specifiche:

- protegge l'elemento sensibile
- permette il transito della sola radiazione visibile (280 2800 nm).



Radiazione Netta

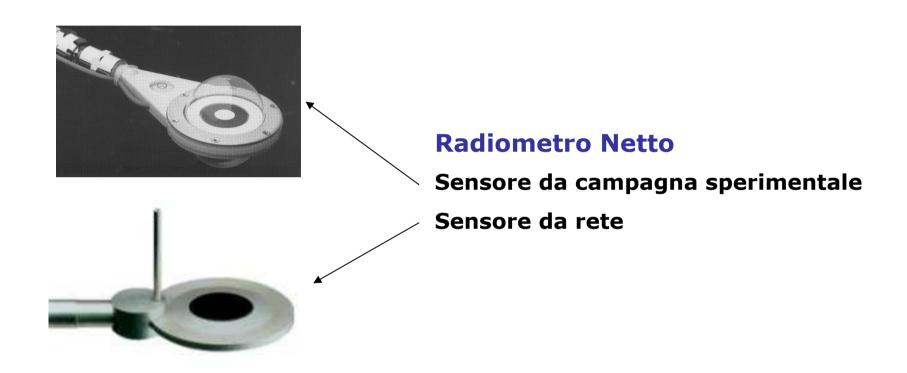
Il <u>radiometro netto</u> è strutturalmente simile al piranometro e sfrutta il medesimo principio di funzionamento, però deve misurare la radiazione netta (quindi il bilancio della radiazione ad onda lunga e ad onda corta)

Le principali differenze rispetto al piranometro sono:

- deve poter vedere tutto lo spettro della radiazione che attraversa l'atmosfera (dal visibile all'infrarosso) e per questo le sue cupole protettive sono di materiale plastico (o di silicone) che, a differenza del quanzo, sono trasparenti all'intero spettro della radiazione;
- deve poter vedere sia la radiazione proveniente dall'alto che quella dal basso, pertanto è costituito da due strumenti identici ma separati, posti sopra le due superfici contrapposte di un piano orizzontale alla superficie. Lo strumento possiede quindi due cupole, una rivolta verso l'alto e l'altra rivolta verso il basso.

Qui di seguito si possono vede due realizzazioni tipiche di radiometro netto





DATALOGGER

E' un sistema informatico HW capace di:

- acquisire l'output dei sensori (misure elementari)
- effettuare le elaborazioni (calcolo di medie, varianze e covarianze)
- memorizzare le misure
- permettere l'eventuale trasmissione delle misure



Tutti i sensori fin qui presentati possono essere inseriti in stazioni di misura poste al suolo.

L'esplorazione della parte alta del PBL è ancora difficoltosa e può essere fatta:

- con sondaggi
- con strumentazione remote-sensing come SODAR e RASS



Sondaggi in quota

Radiosondaggi

Sonda che misura temperatura, umidità e pressione

La sonda viene seguita con sistemi ottici o radar per individuarne la posizione nel tempo e quindi la velocità di spostamento

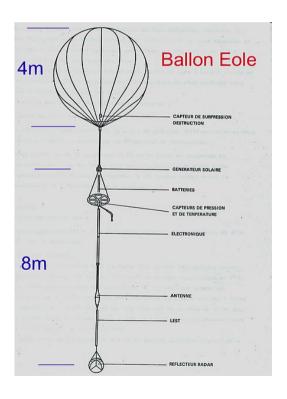


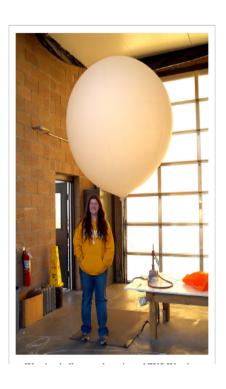


Pallone Pilot

Pallone frenato





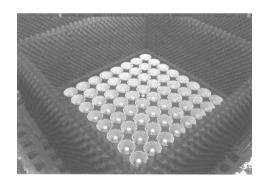


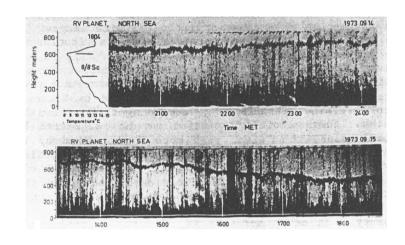
SODAR

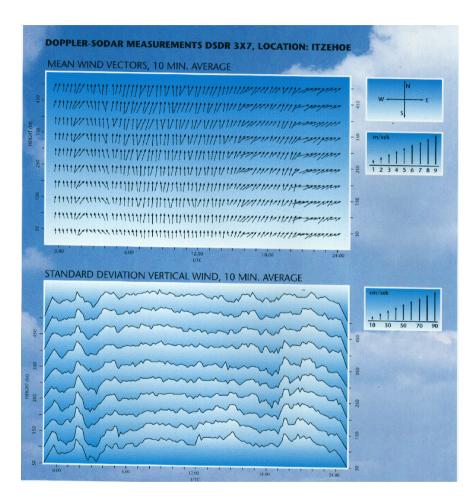
Misura il profilo verticale della velocità e direzione del vento, della deviazione standard della componente verticale della velocità del vento e una variabile proporzionale al livello di turbolenza dell'atmosfera

E' un sistema acustico che emette impulsi sonori in aria e dall'eco di ritorno ottiene una stima dei parametri anemologici e di turbolenza dell'aria.





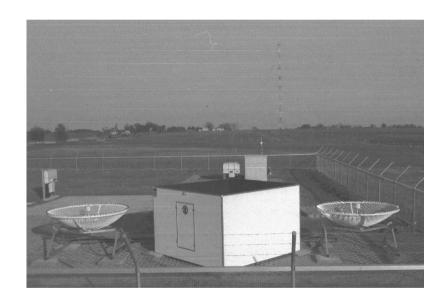




R.A.S.S.

Misura il profilo verticale della temperatura dell'aria

E' costituito da un'antenna verticale SODAR (acustica) + un'antenna che emette onde elettromagnetiche.



Attualmente sono disponibili anche profilatori basati su principi differenti (passivi) in grado di fornire il profilo termico dello Strato Superficiale e di parte dello Strato Rimescolato.