



L'Evoluzione Normativa e la Strumentazione per lo Studio della Qualità dell'Aria

ARPA Lazio
17/05/2018

Caratteristiche Statiche e Dinamiche dei Sensori

ing. Roberto Sozzi

LA MISURA DELLE VARIABILI DEL PBL

(variabili meteorologiche,
micrometeorologiche e Qualità
dell'Aria)

Quando:

- si individua un punto nello spazio ed un istante
- Si introduce nel fluido in moto in questo punto un apparato fisico
- che è in grado di altera una propria caratteristica fisica o chimica in funzione di una delle variabili che caratterizzano lo stato ed il moto del PBL (**vento, temperatura, concentrazione specie inquinanti**)

allora si è eseguita una **misura** della variabile considerata.

... quindi ...

Misura

=

***quantificazione** di una variabile mediante l'impiego di **sistemi fisici** in grado di variare 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 atmosferica. **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 atmosferica 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

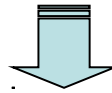
E' un apparato che:

- ➡ Varia una propria caratteristica fisica o chimica (resistenza elettrica, capacità, moto rotatorio, ecc.) al variare di una variabile atmosferica.
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 atmosferica 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

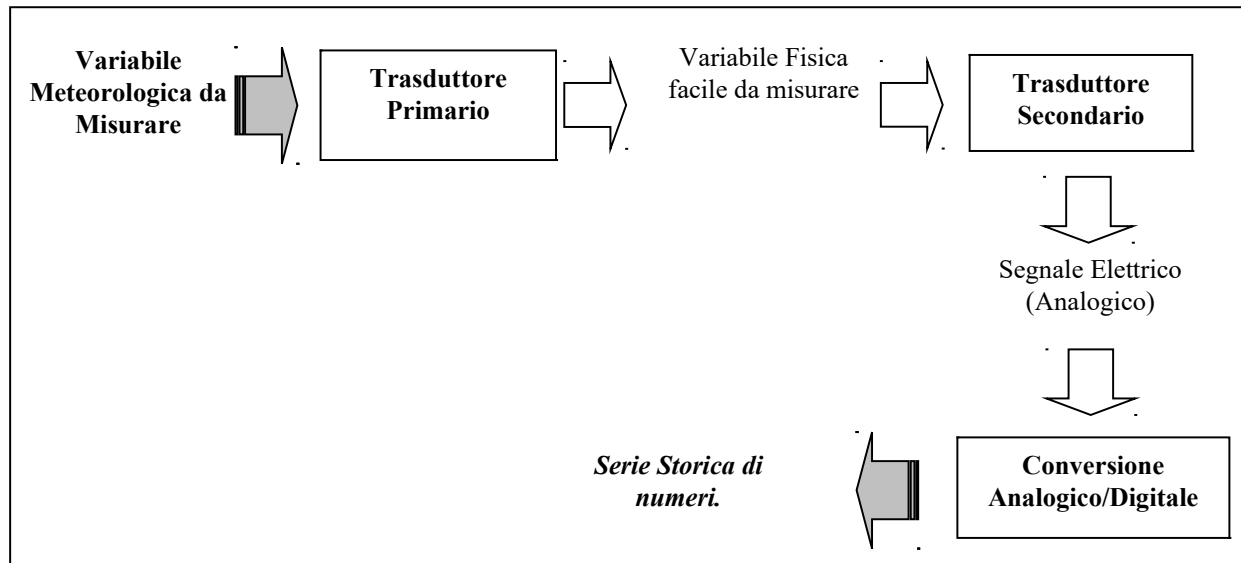
Misura reale → affetta da di errori

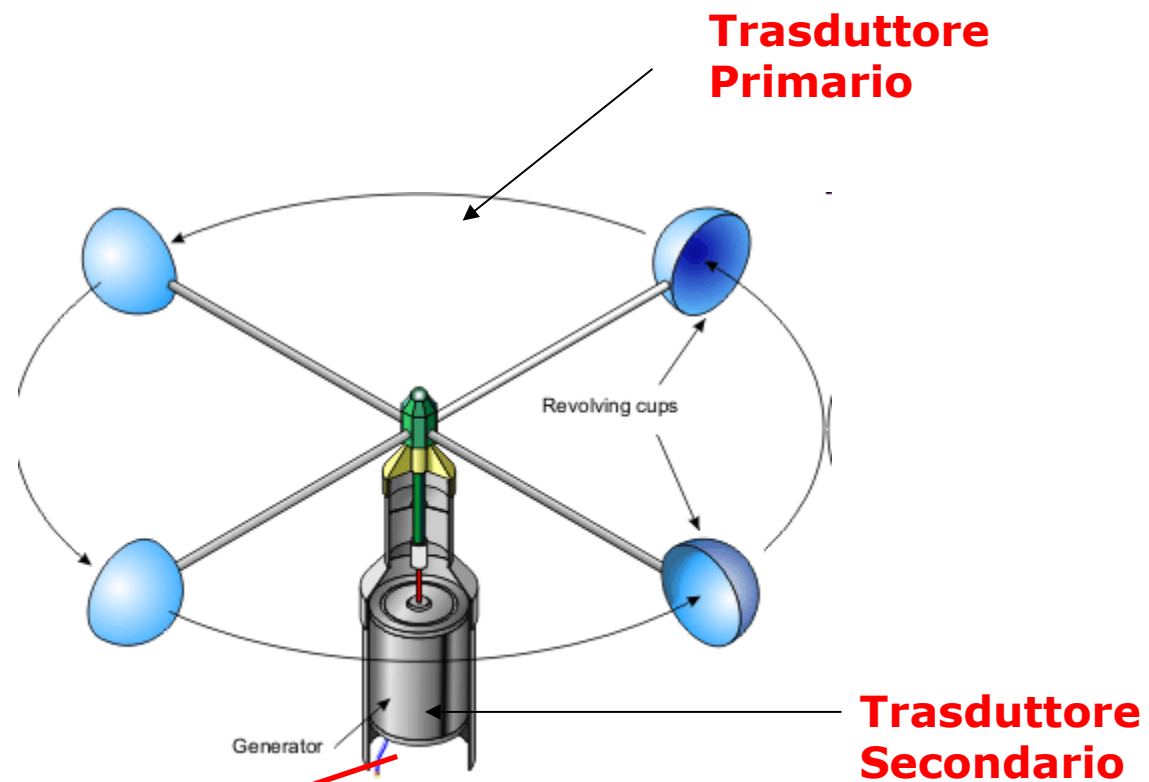
Catena di misura

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



di ottenere una misura





**Alla
Conversione
A/D**

Caratteristiche di uno strumento di misura

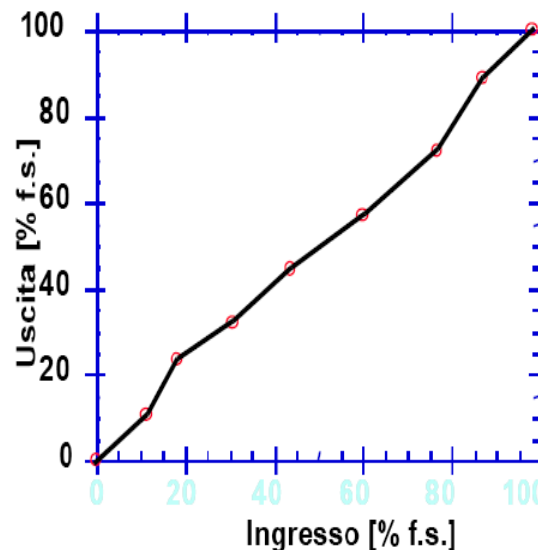
- ⇒ **Caratteristiche statiche**: proprietà intrinseche al sensore che non dipendono dalla variazione nel tempo del segnale cui è sensibile (precisione, sensibilità, linearità, risoluzione, ecc.)
- ⇒ **Caratteristiche dinamiche**: proprietà che descrivono la risposta del sensore in funzione dell'andamento 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**.

Caratteristica Principale $\Rightarrow$ Curva di Taratura

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 considerato 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.



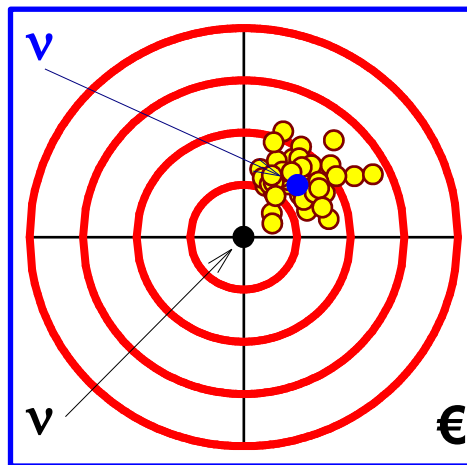
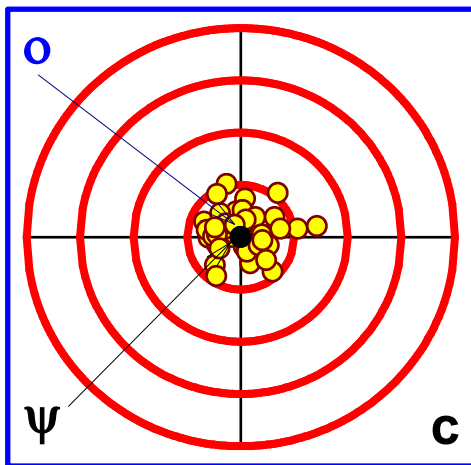
Precisione

Accuratezza

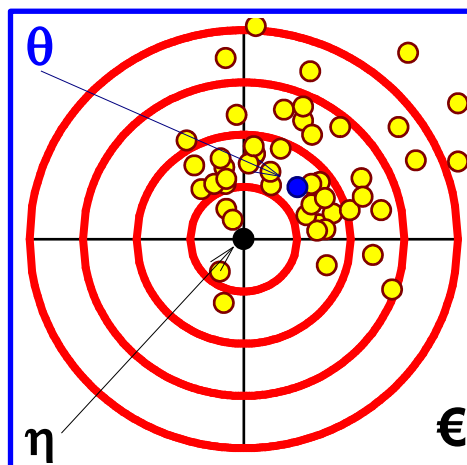
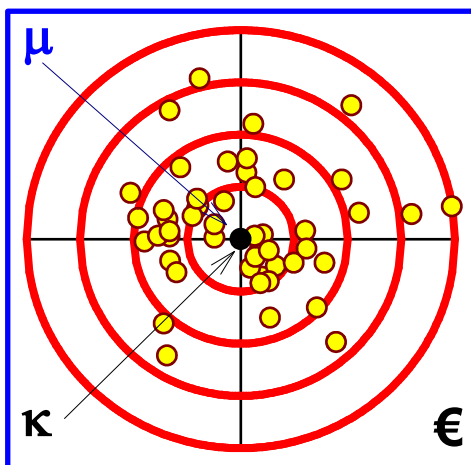
elevata

scarsa

Elevata



Scarsa



- 1- preciso ed accurato
- 2- preciso ed inaccurato
- 3- impreciso ed accurato
- 4- impreciso ed inaccurato

Caratteristiche Dinamiche di un sensore

**Comportamento del sensore/analizzatore
quando il segnale di Input varia nel tempo**

Se:

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

⇒ **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 risposta dinamica 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.

⇒ Sensore ideale per le misure micrometeorologiche e per la misura delle fluttuazioni di concentrazione (odori, incidenti con fuoriuscita di sostanze tossiche, ecc.).

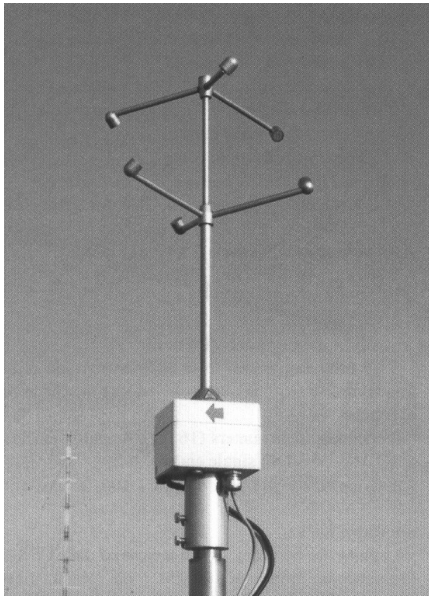
Esempi di sensori del Primo Ordine

Anemometro Sonico Biassiale



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 due input tipici:

- l'**ingresso a gradino** e
- l'**ingresso sinusoidale**.

Analisi del suo comportamento dinamico

Risposta ad un ingresso a gradino

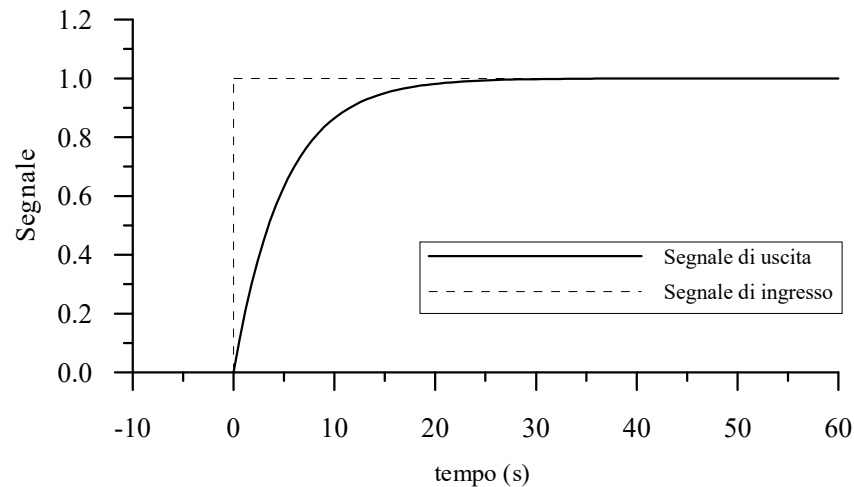
⇒ y = variabile da misurare → andamento temporale a gradino

⇒ x = risposta del sensore

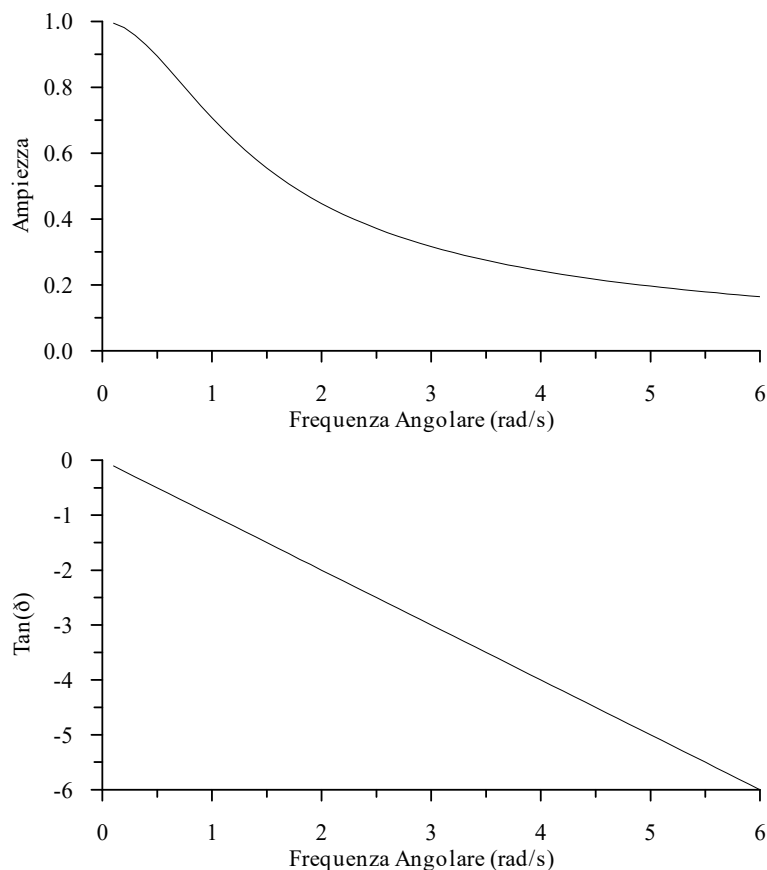
$$y = \begin{cases} 0 & \text{per } t < 0 \\ y_0 & \text{per } t \geq 0 \end{cases}$$



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



Risposta ad un ingresso periodico



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

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

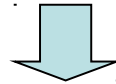
$$\Phi = 1 / \sqrt{1 + \tau^2 \Omega^2}$$

$$\text{tg}(\delta) = -\Omega \tau$$

La risposta del sensore ad un segnale sinusoidale in input:

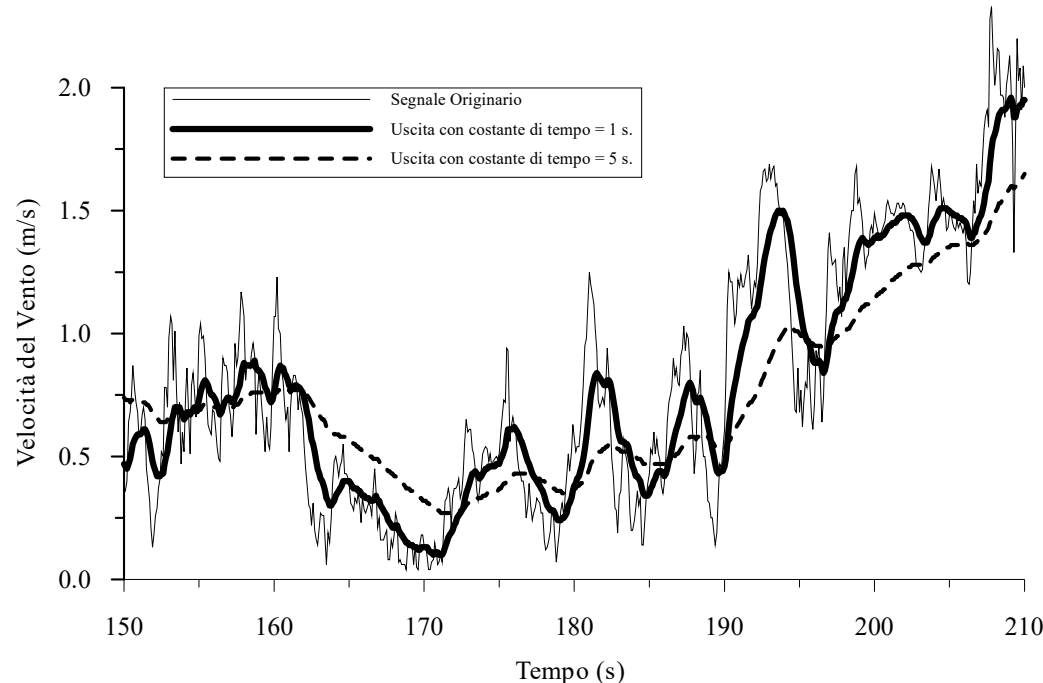
- ancora sinusoidale, ma
- con sfasamento δ rispetto al segnale di input e
- con ampiezza variata Φ diversa da quella del segnale di input
- sia δ che Φ dipendono dalla frequenza angolare Ω del segnale in ingresso

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

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

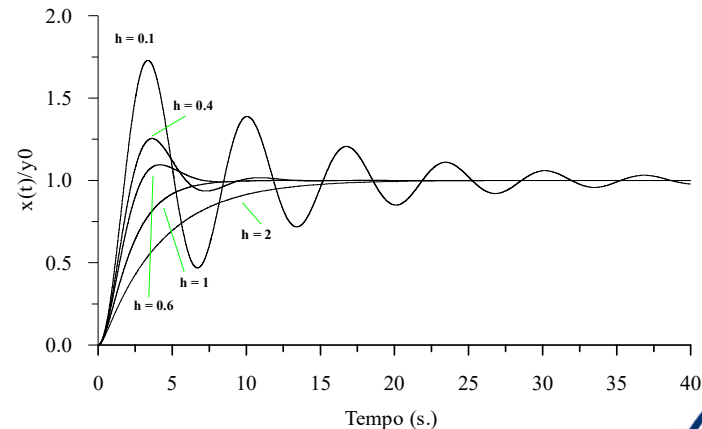
Risposta ad un segnale a gradino:

Parametri fondamentali sono ω (**frequenza caratteristica**) e h (**rapporto di smorzamento**)

$$\omega = \sqrt{a_0/a_1} \quad h = \sqrt{\frac{a_1^2}{4a_0a_2}}$$

Se $h < 1$ la risposta al gradino è **oscillante**

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



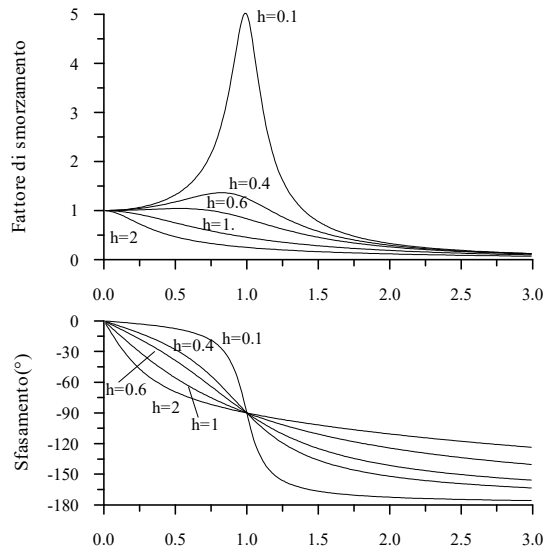
Risposta ad un segnale armonico

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

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

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

$$\operatorname{tg}(\delta) = \frac{-2ha}{1-a^2}$$



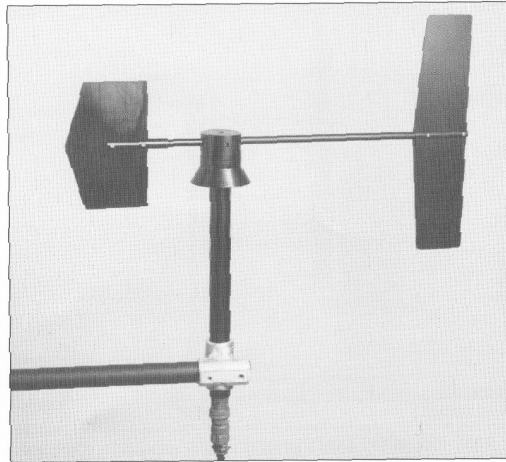
Se **$h > 1$** il sensore si comporta in modo simile ad un sensore di ordine 1 (filtro passa-basso)

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

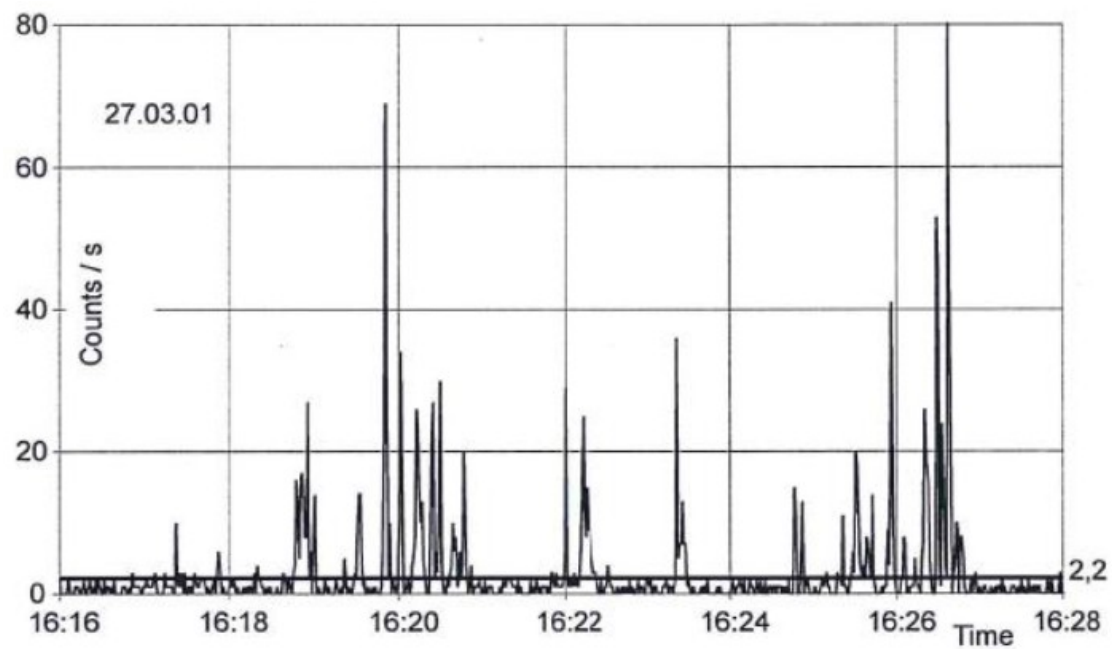
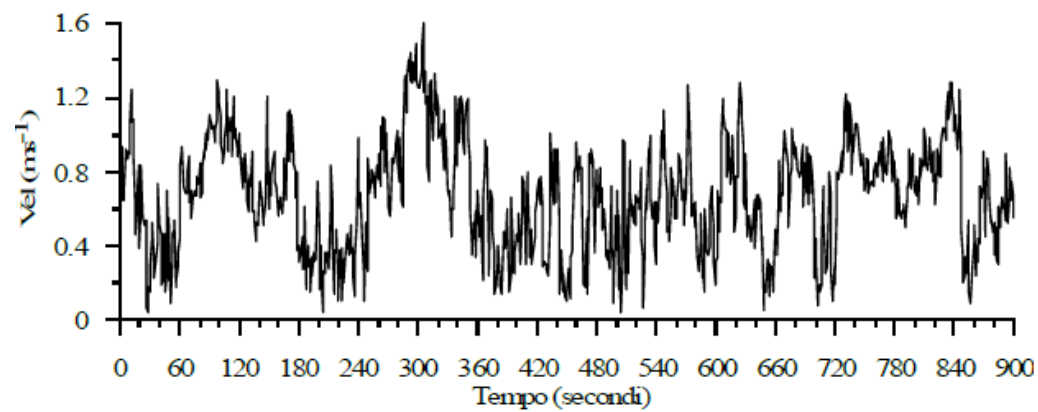


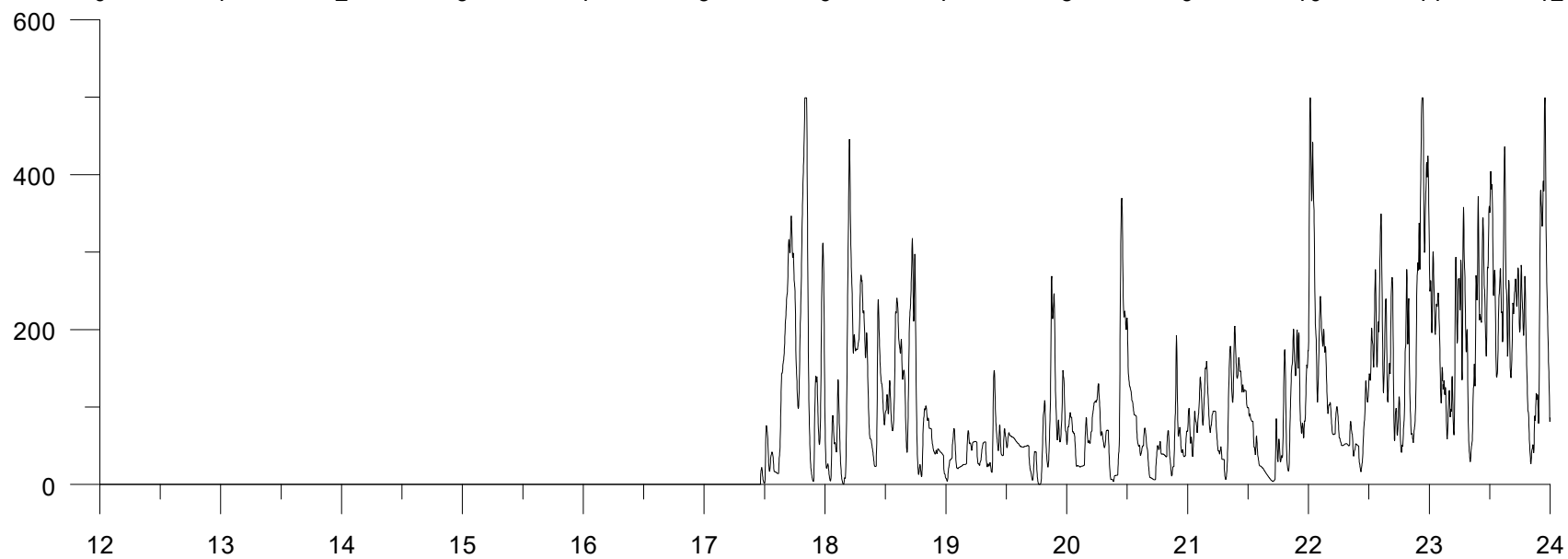
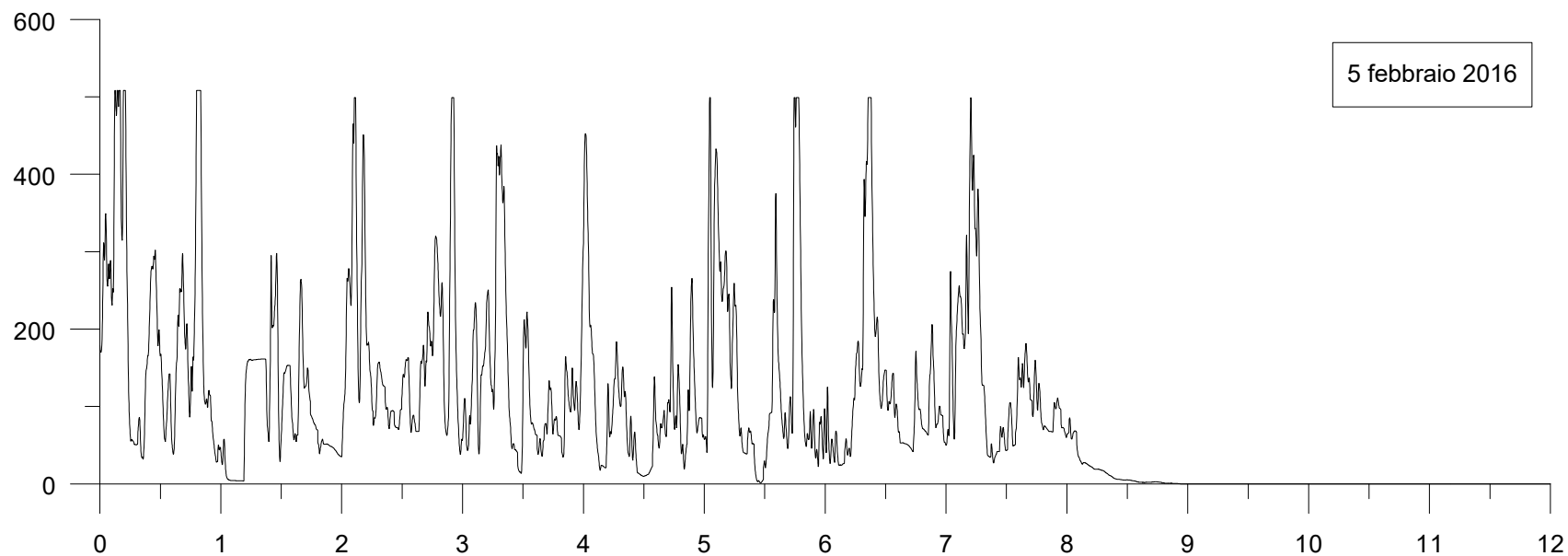
Totale e imprevedibile deformazione del segnale

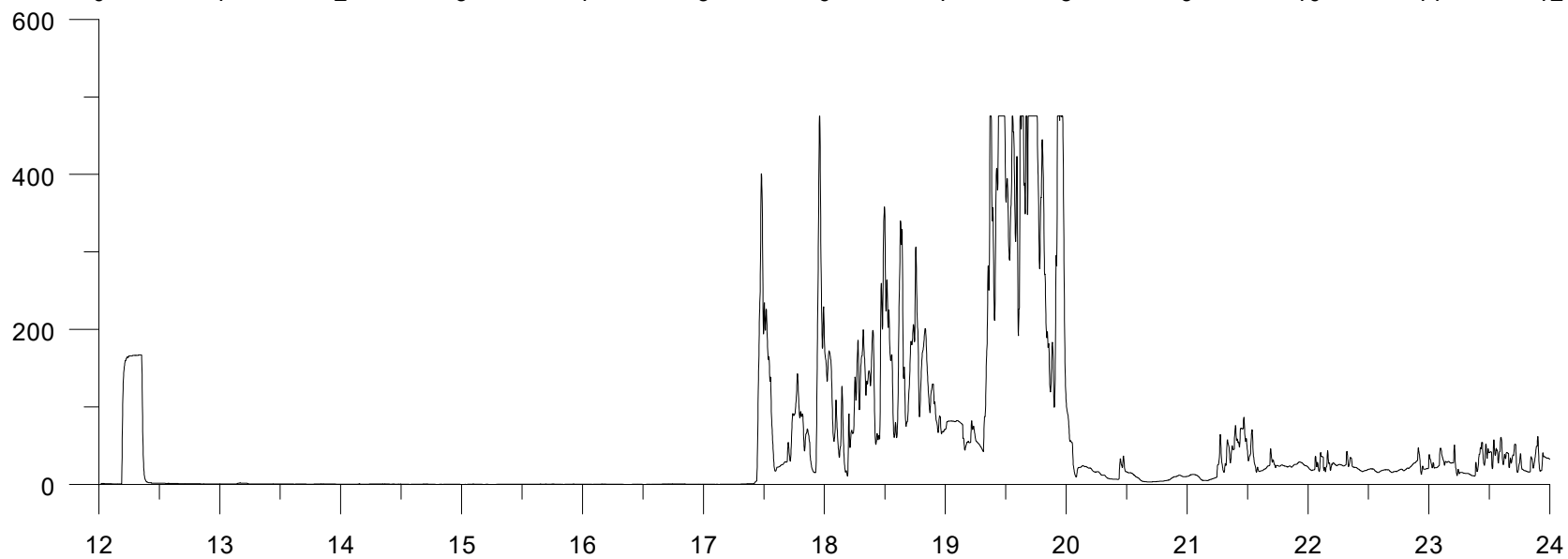
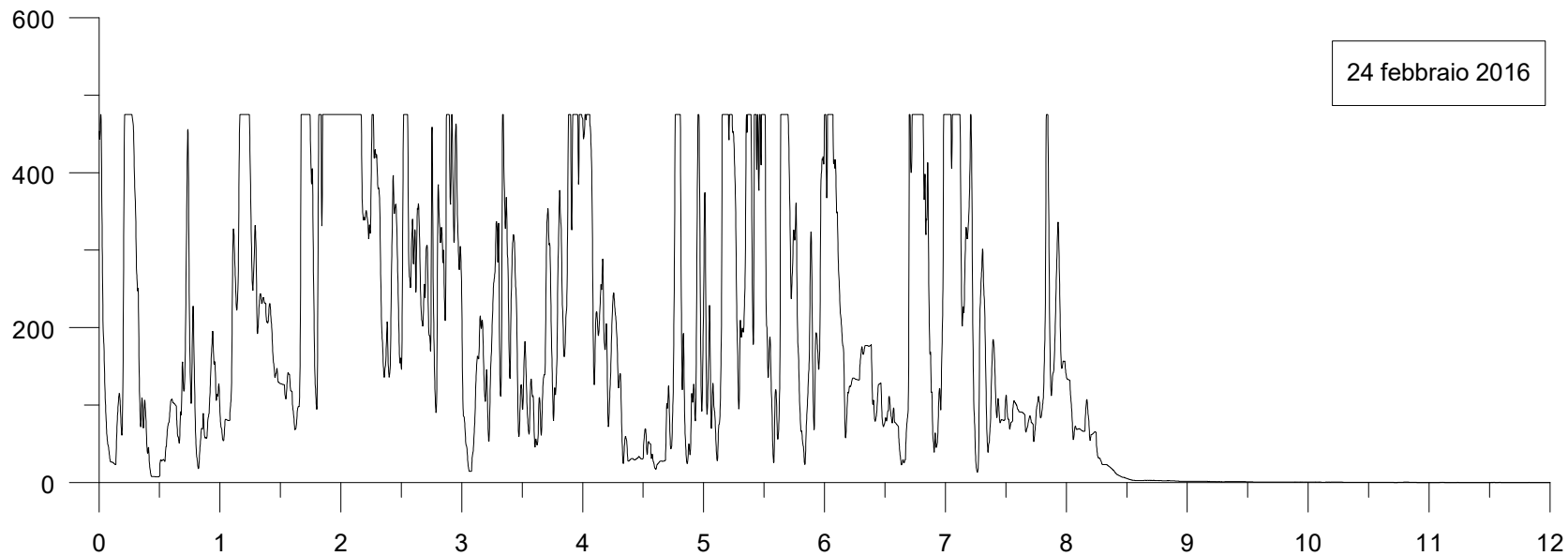
Esempio di sensori del Secondo Ordine



Misuratore della Direzione di provenienza del vento







Riassumendo

Un sensore di ordine 0 è un sensore ideale senza distorsioni nel segnale di uscita. 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.