

Q
U
A
D
D
E
R
N
I
-
T
E
C
N
I
C
I



L'anemometro meccanico, e l'osservazione del vento debole

L'anemometro meccanico e l'osservazione del vento debole.

Si sente spesso dire che gli anemometri ultrasonici sono immuni alle "calme di vento", mentre gli anemometri meccanici non lo sono. Questa affermazione ha un peso importante nello studio della qualità dell'aria, in cui l'artefatto delle calme di vento non può essere accettato. Come estrema conseguenza i dati prodotti da anemometri a coppe non potrebbero essere utilizzati negli studi sulla qualità dell'aria.

Quali sono le basi di questa affermazione? Che effetto ha, di preciso, l'esistenza di una "soglia di attivazione" finita sulla misura del vento?

In questo Quaderno tentiamo di arrivare ad una possibile risposta, utilizzando, come strumento nel confronto tra anemometri a coppe e anemometri ultrasonici, un "simulatore di anemometro a coppe" e impiegandolo, in numerosi casi, per vedere che effetto ha sulla misura del vento.

I risultati mostrano che, in condizione di vento debole, tipica di alcune zone come la Pianura Padana, gli anemometri a coppe distorcono le misure, introducendo errori anche importanti. Questa tendenza è tanto più pronunciata, quanto più alta è la soglia di attivazione e minore la velocità media scalare del vento.

La conclusione è che i dati prodotti da un anemometro a coppe, in condizioni di vento debole, *non* sono adatti per gli studi sulla qualità dell'aria.

Il vento, misurato da un anemometro ultrasonico

Il giorno 18 Aprile 2013 presso la stazione meteorologica di Arconate sono state osservate velocità del vento all'apparenza "basse" come da tabella.

La media della velocità del vento calcolata nella medesima stazione nel periodo dal 17 Settembre 2012 al 22 Aprile 2015 è pari a 1.31 m/s: i valori osservati il 18 Aprile 2013 non sono così lontani, e sette di loro hanno valori addirittura maggiori. Nella Pianura Padana, giornate come il 18 Aprile 2013 non sono affatto rare, anzi, rappresentano la media.

Un particolare interessante della stazione di Arconate, e che riguarda direttamente le medie orarie del vento, è che le misure sono eseguite mediante un anemometro "ultrasonico tri-assiale". Nello specifico si tratta di un anemometro modello USA-1 prodotto da Metek GmbH.



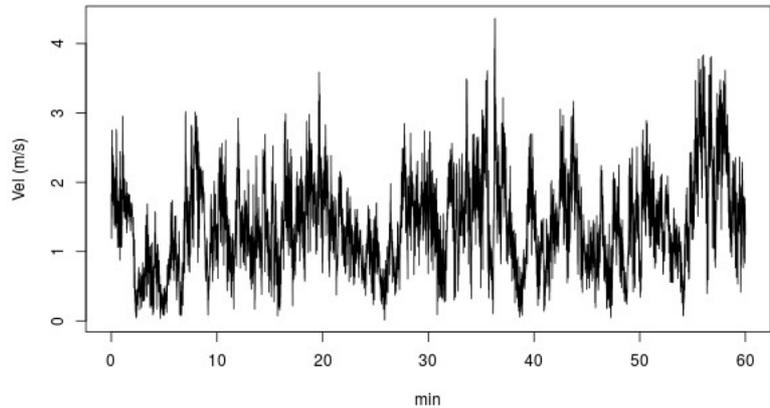
Anemometro triassiale USA-1

Data/ora	Velocità media (m/s)
2013-04-18 00:00:00	1,47
2013-04-18 01:00:00	1,23
2013-04-18 02:00:00	1,32
2013-04-18 03:00:00	0,83
2013-04-18 04:00:00	1,29
2013-04-18 05:00:00	1,25
2013-04-18 06:00:00	1,49
2013-04-18 07:00:00	0,86
2013-04-18 08:00:00	1,12
2013-04-18 09:00:00	1,18
2013-04-18 10:00:00	1,36
2013-04-18 11:00:00	1,31
2013-04-18 12:00:00	1,34
2013-04-18 13:00:00	1,16
2013-04-18 14:00:00	1,25
2013-04-18 15:00:00	1,07
2013-04-18 16:00:00	1,35
2013-04-18 17:00:00	1,36
2013-04-18 18:00:00	0,20
2013-04-18 19:00:00	0,38
2013-04-18 20:00:00	0,72
2013-04-18 21:00:00	0,75
2013-04-18 22:00:00	0,35
2013-04-18 23:00:00	0,74
Media giornaliera	1,06

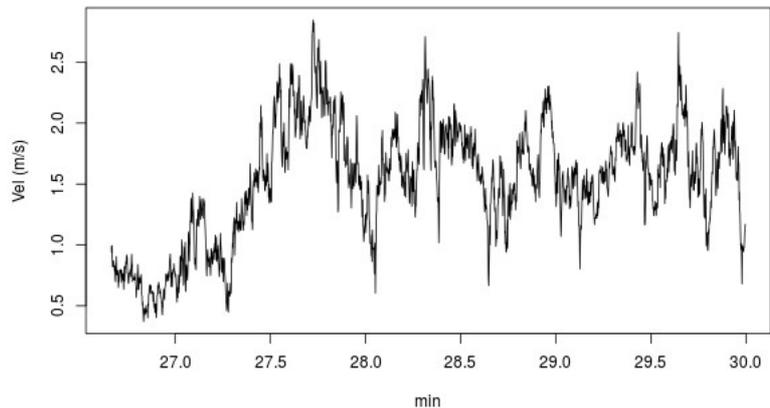
L'anemometro ultrasonico tri-assiale, misura con grande precisione il vento con una risoluzione di 1 cm/s, ad un rateo di campionamento che nel caso della stazione di Arconate è pari a 10 campioni per secondo. Grazie a queste sue caratteristiche, l'anemometro ultrasonico tri-assiale permette la misura del vento con grande precisione anche se questo è "debole", od erratico. Possiamo dire che le medie riportate nella tabella qui di sopra rappresentano molto bene la realtà dei fatti.

Grazie al suo campionamento veloce, con l'anemometro ultrasonico possiamo anche spingerci più lontano. Nel grafico che vediamo qui sotto possiamo osservare le misure eseguite da USA-1 nella stazione di Arconate alle 11 del 18 Aprile 2013, quando la media oraria ha eguagliato esattamente la media di periodo.

E qui possiamo osservare una cosa piuttosto inattesa: le variazioni molto ampie che osserviamo nell'intera serie di dati sembrano ripetersi anche nell'estratto più piccolo – la linea appare visivamente più sottile solo a causa del rateo di campionamento finito dell'anemometro ultrasonico: avessimo misurato a 40 Hz invece che a 10 Hz, la somiglianza qualitativa tra i grafici sopra e sotto sarebbe stata ancora più evidente.



Questa sorta di invarianza di scala visiva ci fa intuire un aspetto fondamentale della natura, che il sonico evidenzia: il "vento", modulo istantaneo del vettore di flusso dell'aria in un dato punto dello spazio, si comporta come un *frattale*, e non come una grandezza continua.



Le equazioni di Navier-Stokes, il modello di vento a tutt'oggi più accurato che abbiamo a disposizione, sono non-lineari, e le loro soluzioni costituiscono un esempio da manuale di comportamento "caotico". Caos deterministico e dimensione frattale si riscontrano spesso in uno stesso fenomeno: la dipendenza tra i due non è necessaria, ma è raro trovare fenomeni caotici non frattali, o frattali e non caotici.

I sensori standard di velocità del vento

Oggi, il sensore di gran lunga più usato per misurare la velocità del vento è l'anemometro meccanico a coppe, una minuscola turbina ad asse verticale costruita con tolleranze molto ristrette e cure particolari.

Tutti gli anemometri a coppe disponibili sul mercato hanno in comune una caratteristica costruttiva: la girante ha una massa finita, e ciò comporta la presenza di un *momento di inerzia* diverso da zero. La presenza di questo momento di inerzia non trascurabile fa sì che l'anemometro a coppe si opponga alle variazioni di velocità del vento, e in particolare alle più rapide. Detto altrimenti, un anemometro a coppe opera come uno strumento non ideale, che costituisce un analogo meccanico di un *filtro passa-basso*.



In aggiunta, anche i cuscinetti di miglior qualità hanno un certo attrito. Per effetto di ciò, gli anemometri meccanici presentano una *soglia di attivazione* maggiore di 0: se la velocità del vento è più bassa della soglia, l'anemometro rimane perfettamente fermo, e restituisce dunque una misura esattamente uguale a zero.

A fronte di queste caratteristiche costruttive, viene spontaneo domandarsi se un anemometro convenzionale possa funzionare con vento debole, e se sì, con quali limitazioni.

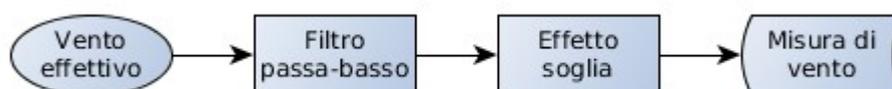
Un simulatore di anemometro convenzionale

In teoria non sarebbe impossibile affiancare un anemometro convenzionale ad uno ultrasonico tri-dimensionale e confrontare i risultati. I risultati sarebbero estremamente interessanti, ma purtroppo dipendenti dalla particolare marca e modello di anemometro.

Ma allora, perché non tentare di costruire un *simulatore* di anemometro a coppe?

In effetti, l'aerodinamica degli anemometri a coppe è ben conosciuta e studiata (Kristensen, 1996), sin nei più minuti dettagli. Per realizzare un simulatore significativo possiamo partire da lì, restringendo l'attenzione agli aspetti più macroscopici.

Sintetizzando, possiamo descrivere la risposta complessiva un anemometro a coppe con un diagramma a blocchi, dove con "misura di vento" possiamo intendere una velocità di rotazione



della turbina, che una volta trasdotta in un opportuno segnale elettrico permetterà la registrazione di dati elementari numerici di velocità. In altre parole, concentriamo tutta

l'attenzione sui soli effetti meccanici, immaginando che il processo di trasduzione dalla velocità di rotazione alle letture numeriche di vento avvenga in modo ideale – senza ritardi e distorsioni.

Il filtro passa-basso è realizzato nel dominio del tempo, invece che delle frequenze.

La sua forma è:

$$y_i = \beta x_i + (1 - \beta) y_{i-1}$$

dove $0 \leq \beta \leq 1$ è un numero reale che determina il “tempo di risposta” del filtro. Quest'ultimo è definito come il tempo necessario perché la risposta del filtro ad uno stimolo istantaneo, rappresentato da un gradino unitario, raggiunga un valore pari ad $1/e$.

In pratica, sarebbe molto desiderabile poter esprimere il valore di β in funzione del tempo di risposta desiderato. A tal fine, possiamo interpretare l'espressione del filtro come un'equazione alle differenze, della forma

$$y_i = \beta x_i + (1 - \beta) y_{i-1}$$

con soluzione

$$y_i = 1 - (1 - \beta)^{i-1}$$

Questo “segnale” differisce per $1/e$ del valore nominale, 1 , quando

$$1 - 1/e = 1 - (1 - \beta)^{i-1}$$

ovvero

$$1/e = (1 - \beta)^{i-1}$$

Risolviendo questa equazione rispetto a β otteniamo

$$\beta = 1 - \frac{1}{e^{\frac{1}{i-1}}}$$

Campionando a 10 Hz, l'indice i rappresenta il tempo misurato in decimi di secondo.

È decisamente più comodo, però, utilizzare i secondi:

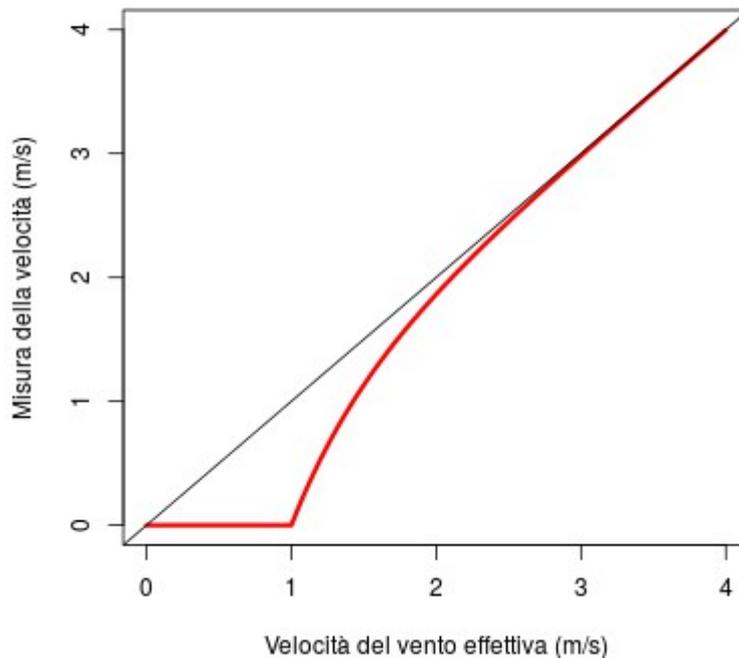
$$\beta = 1 - \frac{1}{e^{\frac{1}{10T_r-1}}}$$

dove T_r indica il tempo di risposta desiderato. Ad esempio, nel caso di un tempo di risposta pari a 10s, abbiamo $\beta = 0.0101$.

Una volta attribuito il valore di β , il filtro che costituisce la prima parte del simulatore di anemometro convenzionale è completamente caratterizzato.

Adesso non resta che descrivere l'effetto soglia. I dati di targa degli anemometri a coppe riportano sempre un parametro, la **soglia di attivazione**, che rappresenta la velocità del vento al di sotto della quale l'anemometro “non segna nulla”. Meno conosciuto, ma pure presente, è un secondo parametro, la **soglia di linearità**, che indica il vento al di sopra del quale l'anemometro ha una risposta puramente lineare. La soglia di linearità è sempre maggiore della soglia di attivazione, e in alcuni casi ha un valore anche piuttosto elevato (persino il doppio della soglia di attivazione).

In (Kristensen, 1996) il comportamento di un anemometro a coppe è riportato per mezzo di un diagramma molto chiaro, riprodotto nel grafico qui sotto.



In questo caso, la soglia di attivazione vale 1 m/s, mentre per la soglia di linearità possiamo assumere praticamente il valore di 2 m/s (la poca non-linearità residua non pregiudica la qualità delle misure in modo sostanziale).

Possiamo riprodurre matematicamente la risposta anche in modo approssimato usando una funzione del tipo:

$$v_u = \begin{cases} 0 & v_i \leq v_0 \\ v_i - v_0 \exp\left(\frac{v_i - v_0}{v_1 - v_0}\right) & v_i > v_0 \end{cases}$$

In questa formula, il valore di v_0 rappresenta la soglia di attivazione, mentre v_1 è la velocità alla quale la risposta differisce per meno di $1/e$ da una risposta ideale lineare.

A questo punto disponiamo di un'espressione del filtro passa-basso e di un'espressione dell'effetto soglia.

Il risultato

Il pregio di un simulatore è che permette di studiare il comportamento generale dell'anemometro a coppe al variare dei parametri che ne definiscono il comportamento.

La tabella che segue mostra la vera velocità del vento, ottenuta elaborando i dati dell'anemometro ultrasonico e le misure che sarebbero state ottenute con anemometri a coppa con soglia di attivazione e soglia di linearità crescenti.

La colonna "h" rappresenta l'ora, mentre la colonna "v" presenta la vera velocità media del vento. Le colonne "v.01", "v.02", ..., "v.15" rappresentano i valori di velocità ottenibili con soglie di attivazione pari rispettivamente a 10 cm /s, 20 cm/s, ..., 1.5 m/s.

Come si può vedere, al crescere della soglia di attivazione si assiste ad una sottostima progressivamente crescente.

h	v	v.01	v.02	v.03	v.04	v.05	v.06	v.07	v.08	v.09	v.10	v.11	v.12	v.13	v.14	v.15
0	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.46	1.44	1.40	1.31	1.16	0.98	0.78	0.55	0.33
1	1.23	1.24	1.24	1.24	1.23	1.23	1.23	1.20	1.14	1.02	0.83	0.59	0.37	0.20	0.10	0.05
2	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.33	1.32	1.30	1.25	1.15	1.01	0.83	0.64	0.45	0.30	0.19
3	0.84	0.84	0.84	0.83	0.81	0.71	0.58	0.49	0.41	0.33	0.25	0.18	0.11	0.05	0.01	0.00
4	1.29	1.29	1.29	1.29	1.28	1.28	1.26	1.22	1.16	1.07	0.95	0.82	0.65	0.45	0.24	0.08
5	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.25	1.22	1.16	1.04	0.88	0.68	0.48	0.29	0.16	0.09
6	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.49	1.48	1.46	1.42	1.34	1.22	1.06	0.84	0.59	0.36
7	0.87	0.88	0.87	0.86	0.83	0.78	0.70	0.60	0.49	0.38	0.28	0.19	0.12	0.07	0.04	0.02
8	1.14	1.14	1.14	1.13	1.12	1.08	1.03	0.96	0.88	0.79	0.69	0.59	0.49	0.39	0.30	0.22
9	1.19	1.19	1.18	1.18	1.16	1.13	1.09	1.03	0.97	0.89	0.80	0.70	0.59	0.48	0.37	0.28
10	1.37	1.37	1.37	1.36	1.34	1.32	1.28	1.24	1.19	1.12	1.04	0.96	0.88	0.79	0.71	0.62
11	1.39	1.39	1.39	1.38	1.37	1.35	1.32	1.28	1.22	1.15	1.06	0.97	0.88	0.78	0.67	0.56
12	1.36	1.36	1.36	1.35	1.33	1.31	1.27	1.22	1.15	1.08	1.00	0.92	0.84	0.76	0.69	0.62
13	1.22	1.21	1.21	1.20	1.18	1.15	1.10	1.03	0.95	0.88	0.80	0.72	0.64	0.57	0.50	0.44
14	1.26	1.26	1.26	1.25	1.24	1.20	1.15	1.09	1.02	0.95	0.88	0.80	0.72	0.64	0.58	0.52
15	1.11	1.10	1.10	1.08	1.05	1.02	0.97	0.91	0.85	0.78	0.72	0.65	0.56	0.48	0.39	0.32
16	1.38	1.38	1.37	1.37	1.35	1.33	1.29	1.24	1.18	1.11	1.03	0.95	0.86	0.77	0.69	0.61
17	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.36	1.34	1.29	1.23	1.14	1.04	0.92	0.80	0.69	0.57	0.48
18	0.30	0.28	0.24	0.18	0.11	0.05	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19	0.38	0.38	0.35	0.26	0.16	0.07	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	0.72	0.72	0.72	0.72	0.68	0.59	0.47	0.29	0.13	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21	0.76	0.75	0.74	0.70	0.65	0.61	0.55	0.49	0.44	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15	0.12
22	0.47	0.46	0.44	0.38	0.30	0.23	0.16	0.12	0.08	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.74	0.74	0.74	0.74	0.73	0.65	0.50	0.32	0.14	0.04	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Neppure la soglia di attivazione più bassa comporta una totale assenza di rischi. Ma è ai valori più alti, come ad esempio 0.5 o 1 m/s, che lo scostamento è evidente.

Questa è la vera origine delle *calme di vento*. Il vento c'è sempre, ma se la sua velocità non è significativamente maggiore della soglia di attivazione, l'anemometro meccanico compie una sottostima sistematica, anche importante.

Alcune stazioni meteorologiche non riportano la condizione di calma in presenza di un vento debole, e restituiscono comunque dei valori numerici. Come possiamo però vedere dalla tabella, i dati che essi producono possono essere affetti da un errore molto significativo.

Riferimenti per approfondire

Kristensen, 1996	L. Kristensen, <i>Cup Anemometer Behavior in Turbulent Environments</i> , Bulletin of the American Meteorological Society, February 1998, pp. 5-17
------------------	--