

# Misure di flussi 3D con anemometro sonico

Benassi Federica - Ventrucci Chiara

3 dicembre 2021

## 1 Introduzione

L'obiettivo dell'esperienza è studiare un campo di vento tridimensionale attraverso un anemometro sonico. Questo strumento è in grado di misurare la velocità della massa d'aria attraverso la differenza nel tempo di propagazione di un impulso sonoro tra una coppia di sensori (uno per ogni direzione). Dati i tempi  $t_1$  e  $t_2$  impiegati dall'impulso per percorrere una distanza  $d$  nota tra i sensori in entrambi i versi, è possibile rincondursi alla velocità del vento  $V$  e alla velocità del suono nel mezzo  $c$ , secondo le relazioni (1):

$$\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} = \frac{2V}{d} \quad \frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} = \frac{2c}{d}. \quad (1)$$

$c$  dipende dalla temperatura  $T_s$  dell'aria secondo l'equazione (2):

$$c = \sqrt{\frac{C_{pa}}{C_{va}} R_d T_s} \quad (2)$$

dove  $C_{pa}$ ,  $C_{va}$  e  $R_d$  sono costanti note.

Con l'anemometro in dotazione sono misurate, quindi, le tre componenti delle velocità,  $u$  e  $v$  sul piano orizzontale e  $w$  in verticale, e la temperatura sonica  $T_s$  dello stesso volume d'aria. Le misure di temperatura sono, poi, confrontate con la temperatura  $T$ , acquisita da un termometro esterno, e con la temperatura virtuale  $T_v$ , ottenuta tramite il calcolo del rapporto di mescolamento attraverso un diagramma psicrometrico.

Sono analizzate diverse condizioni ambientali interne al laboratorio: finestre chiuse, flusso di aria calda proveniente da una stufa, finestre aperte e flusso innescato dal movimento di oggetti.

## 2 Apparato sperimentale

L'apparato sperimentale, riportato in Fig.1, comprende: un anemometro sonico Gill WindMaster, con frequenza di acquisizione di 20 Hz, risoluzione 0.01 m/s per la velocità e 0.01 °C per la temperatura e range di misura [0, 50] m/s e [-40, 50] °C, un termometro con risoluzione 0.01 °C e un igrometro con risoluzione 0.01 punti percentuali, entrambi con frequenza di acquisizione di 0.017 Hz.

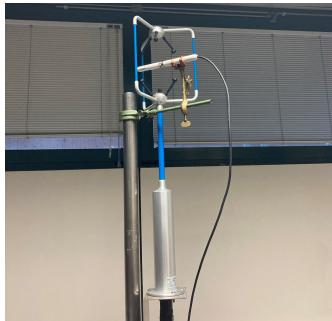


Figura 1: Anemometro sonico e termoigrometro

L'acquisizione dati può essere suddivisa in sottoperiodi: condizioni stabili iniziali, riscaldamento con una stufa, riassetamento dell'equilibrio, apertura delle finestre, nuovo equilibrio, movimento di oggetti, indicati rispettivamente con i numeri da 1 a 6. Per come è orientato l'anemometro, la velocità orizzontale  $u$  è positiva verso nord,  $v$  è positiva verso ovest,  $w$  verso l'alto.

### 3 Analisi dati

In Fig.2 sono riportate le funzioni densità di probabilità delle tre componenti di velocità, ottenute tramite *Kernel Density Estimation*. I flussi analizzati sono mediamente piuttosto deboli: le velocità orizzontali sono, infatti, prevalentemente positive e i valori massimi raggiunti sono intorno a 1 m/s per  $u$  e 0.6 m/s per  $v$ . Le due distribuzioni presentano un picco molto marcato per valori molto piccoli: 0.03 m/s per  $u$  e 0.06 m/s per  $v$ . La distribuzione della velocità verticale presenta, invece, due picchi, il primo vicino allo zero, il secondo intorno a 0.4 m/s.

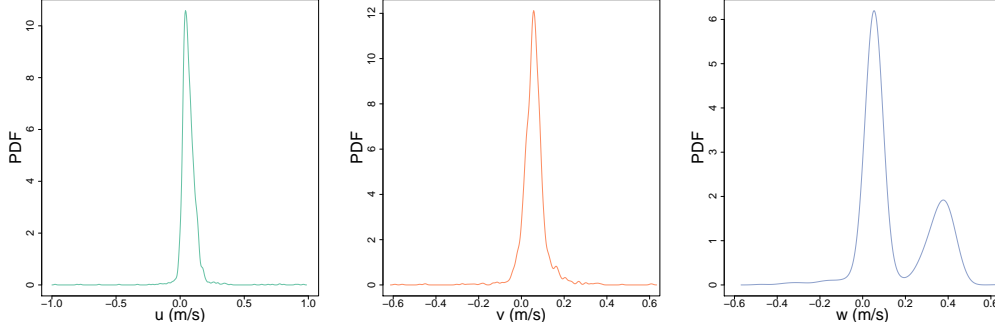


Figura 2: Funzioni densità di probabilità per le componenti della velocità del vento

L'analisi può essere effettuata anche integrando su intervalli temporali più lunghi di 1/20 di secondo; in Fig.3, in particolare, sono riportate le distribuzioni di probabilità delle componenti orizzontali per intervalli di integrazione  $dt$  diversi.

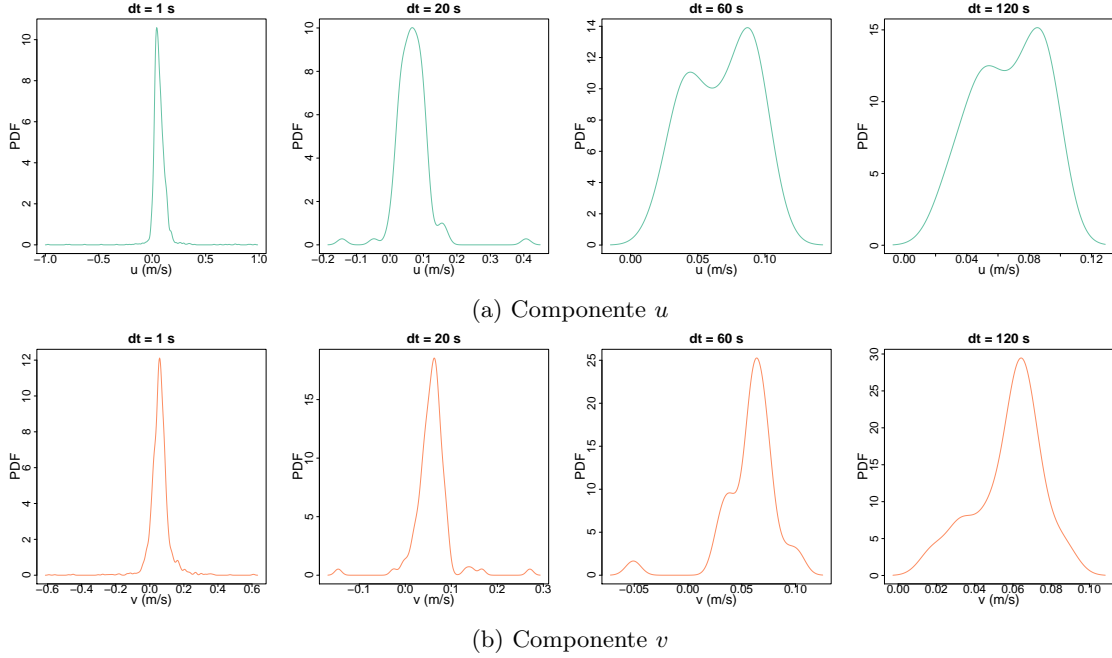


Figura 3: Funzioni densità di probabilità per le componenti orizzontali della velocità del vento al variare dell'intervallo di integrazione  $dt$

Si può osservare che le distribuzioni cambiano notevolmente all'aumentare di  $dt$ , riducendosi il rumore associato alle misure. La distribuzione di  $u$  diventa, infatti, bimodale, con due massimi locali intorno a 0.05 e 0.10 m/s, mentre il contributo di valori negativi si riduce gradualmente. La distribuzione di  $v$ , invece, presenta un picco persistente intorno a 0.07 m/s, e si continua a estendere anche su valori negativi di velocità, fino a intervalli di un minuto. L'analisi della distribuzione della componente verticale (non riportata) non ha evidenziato, invece, variazioni significative di forma all'aumentare dell'intervallo temporale, segnale di flussi con meno rumore. Aumentando l'intervallo di integrazione, diminuisce la varianza associata al campione di dati; cala, tuttavia, allo stesso tempo, il

numero di dati utili all'analisi statistica. È necessario, quindi, scegliere un valore di  $dt$  associato a un sottocampione con una varianza sufficientemente piccola, ma che conservi il numero di dati necessario a individuare chiaramente le caratteristiche proprie del sistema in esame. L'andamento della varianza per le tre componenti della velocità è riportato in Fig.4, in funzione di diversi intervalli di integrazione temporale. In tutti i casi si osserva un decadimento del valore di varianza: quella associata alle velocità orizzontali, in particolare, presenta valori minori in modulo rispetto a  $w$ . Questo fatto è legato all'aver calcolato la varianza considerando l'intero periodo di analisi, durante il quale sono state introdotte delle forzanti proprio lungo la direzione verticale, aumentando, quindi, la variabilità di questa componente.

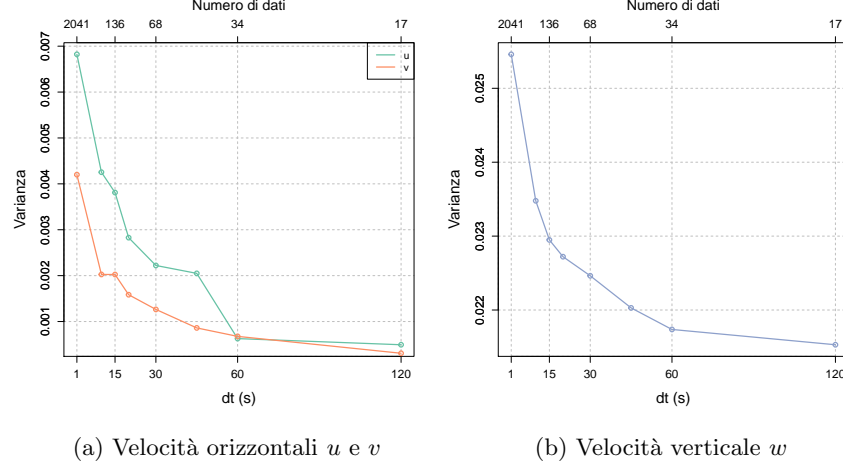


Figura 4: Andamento della varianza in funzione dell'intervallo di integrazione  $dt$ . Sull'asse in alto è riportato anche il numero di dati disponibili dopo l'integrazione temporale.

La varianza diminuisce se ciascun sottoperiodo è considerato autonomamente, in particolare nei periodi 1, 2 e 5, per tutte le componenti. Nei periodi 3 e 4 la variabilità è molto più alta su  $w$ , a differenza di  $u$  e  $v$ , i cui valori sono più stabili. Il periodo 6, invece, presenta fluttuazioni molto grandi in tutte le direzioni.

Si è scelto di integrare su 20 secondi, come trade-off tra varianza e numero di dati disponibili (102).

In Fig.5 sono riportate le serie temporali relative alle tre componenti della velocità e alla temperatura sonica dopo l'integrazione.

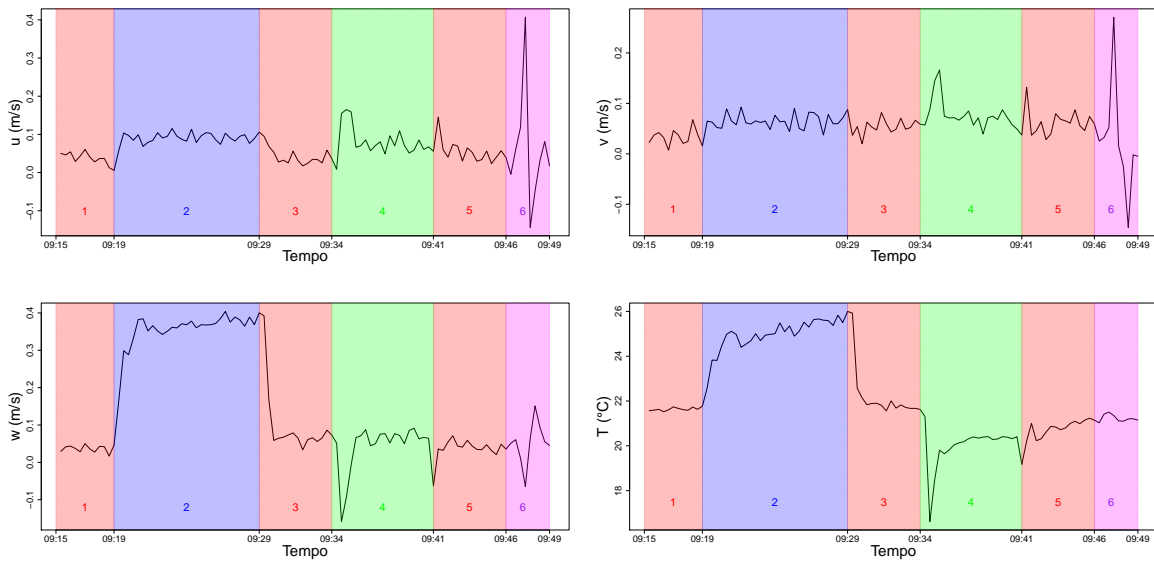


Figura 5: Serie temporali delle componenti della velocità e della temperatura, integrate su 20 s. I vari colori di sfondo rappresentano la suddivisione temporale in periodi: il colore rosso, in particolare, rappresenta periodi in cui il sistema è stato fatto ristabilizzare alle condizioni del laboratorio.

Il valore di  $u$  aumenta leggermente nel corso del periodo 2 e del periodo 4, mentre  $v$  si mantiene all'incirca costante per tutti i periodi considerati. Questa differenza spiega il diverso numero di picchi osservato nelle distribuzioni in Fig.3a. La grande variabilità nel periodo 6 di entrambi i flussi è da attribuire, invece, all'aver stimolato il moto del flusso d'aria in tutte le direzioni tramite il movimento di oggetti. È in questo periodo che sono raggiunti gli estremi delle funzioni di distribuzione, sia per velocità positive sia negative. L'apertura e la chiusura delle finestre creano una piccola corrente che modifica notevolmente i valori delle componenti orizzontali, ma l'effetto non persiste nel tempo. L'andamento della componente verticale  $w$  è, invece, molto simile a quello della temperatura: entrambe aumentano, infatti, nel periodo 2, ritornano velocemente alle condizioni di equilibrio nel periodo 3, hanno una brusca diminuzione all'inizio e alla fine del periodo 4. I valori di  $w$  oscillano, in particolare, intorno a 0.4 m/s nel periodo 2, nettamente superiori rispetto alle condizioni di equilibrio nei periodi 1, 3 e 5, in cui la velocità è praticamente nulla, spiegando il secondo picco presente nella distribuzione di Fig.2. Le fluttuazioni osservate giustificano, inoltre, gli alti valori di varianza ottenuti per i periodi 3 e 4.

In Fig.6 sono riportati, in particolare, i valori di  $w$  in funzione della temperatura. In condizioni di equilibrio si osserva la maggiore variabilità, mentre la velocità aumenta al crescere della temperatura, per via del moto verso l'alto dell'aria calda. Le velocità negative corrispondono, invece, al momento dell'apertura e della chiusura delle finestre, associato all'intrusione all'interno della stanza di aria più fredda. Limitandosi ai dati del periodo 2, si può ipotizzare una risposta lineare da parte della velocità verticale, dato che il coefficiente di correlazione di Pearson vale 0.91. Il riscaldamento dell'aria innescato dalla stufa è, infatti, più uniforme rispetto all'interazione con l'aria fredda, che proviene dall'esterno e non è un flusso costante; la risposta nel secondo caso è, dunque, più irregolare e meno istantanea.

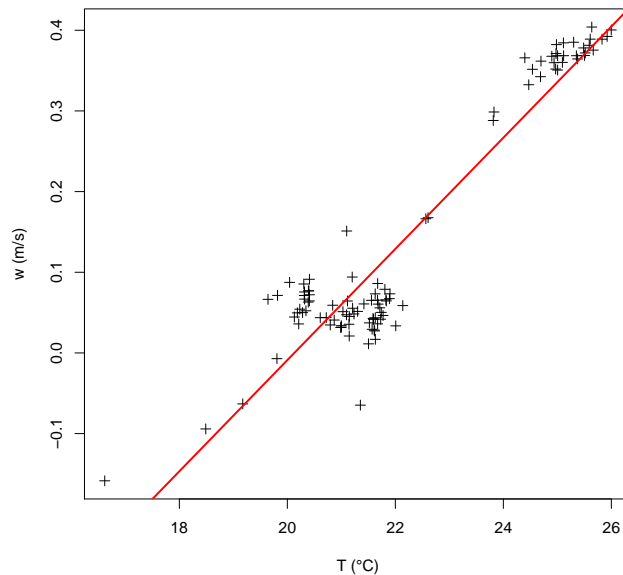


Figura 6: Correlazione tra temperatura sonica e velocità verticale del vento

Non si osserva, invece, una correlazione lineare tra temperatura e componenti orizzontali della velocità, nemmeno per lo shift osservato nel periodo 2 nel modulo di  $u$ : il coefficiente di Pearson vale, infatti, 0.229 e i punti sono molto dispersi per tutto il periodo analizzato.

La temperatura sonica è stata, poi, confrontata con la temperatura acquisita dal termometro, integrando su 3 minuti. Come visibile dalla Fig.7, gli andamenti sono molto diversi: la temperatura sonica tende a essere superiore di circa 2 °C nel corso del periodo 2, minore, invece, durante il raffreddamento e riequilibrio nel periodo 3, con uno shift di -2 °C anche per tutto il corso del periodo 4. Nei periodi 5 e 6, invece, le due temperature seguono lo stesso andamento e  $T_s$  è leggermente superiore di  $T$ . Dai valori di  $RH$  misurati dall'igrometro e tramite un diagramma psicrometrico è stato possibile stimare la temperatura virtuale, maggiore di  $T$  di circa un decimo di grado e con lo stesso andamento.

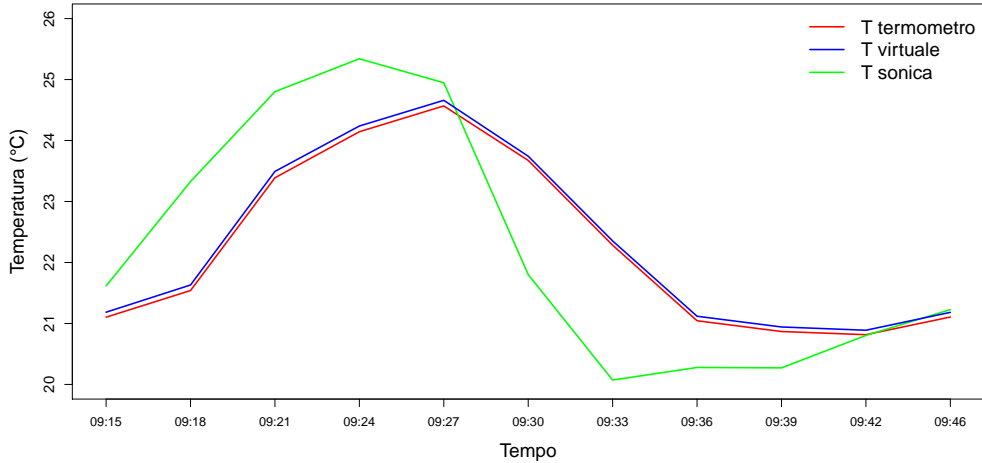


Figura 7: Andamento di temperatura del termometro, temperatura virtuale e temperatura sonica, integrate su 3 minuti

In questi andamenti medi scompaiono il minimo di temperatura raggiunti all'apertura delle finestre, dato che si è trattato di un evento molto breve, sull'ordine del minuto.

## 4 Conclusioni

Il campo di vento ricostruito attraverso le misure dell'anemometro sonico in condizioni di equilibrio presenta una grande variabilità sul piano orizzontale, con velocità mediamente basse, in tutte le direzioni. La presenza di una stufa stimola, invece, la formazione di una corrente convettiva, con un aumento lineare della componente verticale con la temperatura. Al contrario, è più difficile modellizzare l'interazione con l'aria fredda proveniente dall'esterno, specialmente per l'irregolarità e variabilità del flusso. Si può notare, tuttavia, la presenza di una corrente al momento dell'apertura e della chiusura, che coinvolge tutte e tre le componenti del flusso. La temperatura sonica stimata dallo strumento presenta una differenza del 10%, a tratti positiva a tratti negativa, rispetto a quella misurata dal termometro su buona parte del periodo analizzato. L'accordo è migliore in condizioni stazionarie, peggiore quando sono presenti forzanti sulla componente verticale del flusso o durante il riequilibrio. La temperatura misurata dal termometro è molto simile alla temperatura virtuale ricavata, invece, dai valori di umidità.