



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**



**DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

**“TARATURA DI ANEMOMETRI IN GALLERIA DEL VENTO:
ANALISI DEL SETUP DI MISURA”**

**“ANEMOMETERS CALIBRATION INTO THE WIND TUNNEL:
MEASURE SET-UP ANALYSIS”**

Relatore: Prof.ssa Giada Giorgi

Laureando: Luca Barbagallo

ANNO ACCADEMICO 2021 – 2022

Data di laurea 21/07/2022

Abstract

Obiettivo della trattazione è quello di fornire una conoscenza relativa al setup di misura impiegato nella taratura degli anemometri, ovvero di strumenti di misura della velocità del vento.

La trattazione andrà ad elencare ed approfondire ciascuno dei blocchi che compone il setup misura, fornendo quindi un quadro generale su come viene effettuata la taratura degli anemometri.

La tesi sarà composta da una prima parte introduttiva in cui verrà effettuata una panoramica generale sull'argomento. Verranno infatti elencate le principali tipologie di anemometri e di gallerie del vento. Si parlerà inoltre di strumenti di misura di riferimento, di laboratori di anemometria accreditati ed infine delle applicazioni tipiche a cui gli anemometri sono destinati.

Nella seconda sezione della tesi si scenderà più nel dettaglio, focalizzandosi su un'unica tipologia di anemometro e sugli step da seguire per la sua taratura. Si parlerà quindi degli strumenti e dei segnali elettrici in gioco, si affronteranno le criticità emergenti nella realizzazione del setup di misura e si forniranno indicazioni sul sistema di riferimento utilizzato per il confronto delle grandezze d'uscita dall'anemometro che si vuole tarare.

La trattazione andrà a sottolineare l'importanza di avere a disposizione un adeguato sistema di taratura, che permetta di ottenere anemometri il più possibile affidabili ed accurati.

Indice

Introduzione	6
Cos'è l'anemometro	6
Tipologie di anemometro	7
Cosa si intende per taratura di uno strumento	12
Laboratori di taratura di anemometri	14
Sistemi di misurazione della velocità del vento	14
Galleria del vento	16
Laboratori accreditati alla taratura	19
Stazioni meteorologiche	21
Capitolo 1	22
Analisi del setup di misura	22
Alimentazione e messa a terra	23
Galleria del vento	24
Anemometro ad ultrasuoni triassiale	26
Laser doppler	31
Elaborazione dei dati	35
Taratura e calibrazione	36
Conclusioni	38
Bibliografia	41
Elenco delle figure	42

Introduzione

Cos'è l'anemometro

Con il termine “*anemometro*” si identifica lo strumento di misura maggiormente impiegato nelle stazioni metereologiche mondiali per la misura della velocità del vento (“*anemos*” in greco).

Tale dispositivo è in grado di stimare con precisione la velocità e la pressione del vento proveniente da ogni direzione. Questi parametri fisici rappresentano infatti informazioni cruciali nello studio delle variazioni dei flussi d'aria e delle condizioni atmosferiche.

Il primo anemometro risale alla metà del *XV secolo*: per la prima volta era possibile misurare l'intensità del vento, attraverso uno strumento realizzato secondo i principi meccanici dell'epoca. Nel corso del tempo l'anemometro si è evoluto, fino ad arrivare allo strumento che è oggi, in grado di riprodurre fedelmente i fenomeni che ci circondano.

Tipologie di anemometro

Gli anemometri presenti sul mercato si possono classificare in base al loro principio fisico di funzionamento.

In generale si possono distinguere quattro diverse tipologie di anemometro:

- *Anemometro ad elica:* come dice il nome stesso l'anemometro ad elica è dotato di palette rotanti, solitamente realizzate in materiali metallici. La velocità dell'aria viene determinata attraverso la misura della frequenza di rotazione delle palette. Tale misurazione non è quindi influenzata da parametri ambientali come la pressione, l'umidità e la temperatura dell'aria.

Tuttavia, l'anemometro ad elica è soggetto ad un elevato stress meccanico dato dalla rotazione, ed è quindi adatto ad applicazioni in cui non sono previste turbolenze o velocità eccessive dell'aria, come nei condotti di ventilazione degli edifici.

L'anemometro ad elica è uno strumento ad alta portabilità in quanto integrato di microcontrollori che operano la trasduzione da frequenza di rotazione a velocità dell'aria. Il risultato della trasduzione viene quindi rappresentato a display, come si può notare dalla figura sottostante.



Figura 1: anemometro ad elica.

- *Anemometro a filo caldo*: il funzionamento di tale tipologia di anemometro si basa sull'impiego di un filo metallico.

Per effetto Joule, il filo metallico viene riscaldato (per questo, "caldo") attraverso una corrente ad intensità variabile.

La misurazione effettuata dall'anemometro risponde al principio fisico dello *scambio di calore per convezione*: il filo metallico, immerso nel fluido (l'aria), tende a cedergli calore in maniera proporzionale alla velocità del fluido stesso.

L'anemometro, mantenendo costante la temperatura del filo ad ogni variazione di velocità dell'aria, è in grado di misurare la quantità di calore ceduto dal filo e di tradurla in una misura di velocità.

L'anemometro a filo caldo è affidabile anche ad elevate velocità dell'aria e viene spesso impiegato nei sistemi di raffreddamento a ventole per determinare la velocità del flusso d'aria generato.



Figura 2: anemometro a filo caldo.

- *Anemometro a coppette*: anemometro solitamente costituito da una terna di coppette metalliche. Sfrutta lo stesso principio fisico dell'anemometro ad elica, ovvero la frequenza di rotazione, ma permette di effettuare misure più accurate per ogni direzione dell'aria grazie alla presenza delle tre coppette. Trova grande impiego nelle stazioni metereologiche, come si può notare nella figura sottostante.



Figura 3: anemometro a coppette.

- *Anemometro ad ultrasuoni*: tipologia di anemometro più sofisticata, basata sull'impiego di trasduttori ultrasonici.

L'anemometro ad ultrasuoni, oltre a misurare la velocità e la direzione del vento, è in grado di fornirne le tre componenti cartesiane della velocità (componenti U – V - W).

In base al numero di componenti cartesiane fornite dal sensore, gli anemometri ad ultrasuoni si possono classificare in:

- *biassiali* (componenti U - V);
- *triassiali* (componenti U -V - W).

Il principio fisico con cui avviene la misurazione della velocità non prevede alcun tipo di rotazione meccanica, ma si basa semplicemente sul calcolo del tempo di percorrenza di impulsi ultrasonici. Tale tempo di percorrenza varia in base alla velocità del vento in quanto la traiettoria degli impulsi è influenzata dai movimenti dell'aria che li circonda.

Nel caso di anemometri biassiali, il sistema di misura è costituito da una coppia di trasduttori ultrasonici, un trasduttore agisce da *sorgente* mentre l'altro da *ricevitore*. Tramite la misura del tempo di percorrenza dell'impulso dalla sorgente al ricevitore e ritorno, si è in grado di risalire in maniera analitica alle componenti cartesiane U – V della velocità dell'aria.

Di seguito una rappresentazione del sistema di misurazione impiegato da un anemometro ultrasonico biassiale:

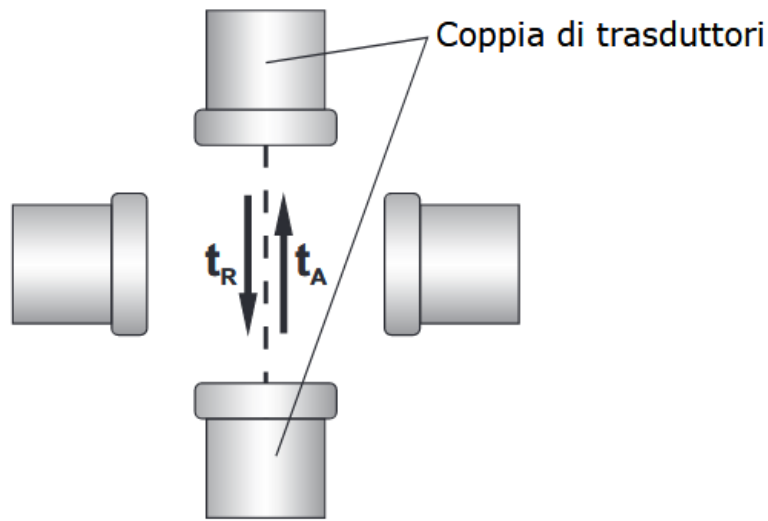


Figura 4: coppia di trasduttori anemometro ultrasonico biassiale.

In particolare, i tempi di percorrenza sono legati alle componenti cartesiane attraverso le seguenti relazioni analitiche:

$$t_A = \frac{D}{c + v_W} \quad t_R = \frac{D}{c - v_W}$$

Dove:

- t_A tempo di andata dell'impulso dalla sorgente al ricevitore;
- t_R tempo di ritorno dal ricevitore alla sorgente;
- D = distanza tra i due trasduttori sorgente - ricevitore;
- c = Velocità del suono (circa 343 m/s), ovvero velocità ideale di propagazione degli impulsi;
- v_W = componente cartesiana della velocità lungo l'asse di misura.

Infatti, le due coppie di trasduttori sono disposte in modo tale da misurare, rispettivamente: la velocità da Ovest verso Est (asse cartesiano U), la velocità da Sud a Nord (asse cartesiano V). (Si noti la disposizione dei trasduttori in *figura 4*).

Dai tempi di percorrenza si ricava la componente cartesiana interessata:

$$V_W = \frac{D}{2} * \left(\frac{1}{t_A} - \frac{1}{t_R} \right)$$

La velocità del vento viene valutata in termini di intensità delle componenti cartesiane ottenute.

Il principio di funzionamento impiegato dagli anemometri ultrasonici biassiali si può estendere al caso triassiale, dove le coppie di trasduttori ultrasonici sono tre e disposte come in *figura 5*. La terza coppia determina la componente cartesiana relativa al piano verticale, ovvero la componente W.

La trattazione analitica vista in precedenza è relativa a ciascuna coppia di trasduttori, quindi valida anche nel caso triassiale.



Figura 5: anemometro ultrasonico biassiale (sinistra) e triassiale (destra).

La direzione del vento, invece, viene stabilita attraverso l'impiego di una *bussola magnetica* che determina i seguenti due angoli:

- *Azimuth*: angolo espresso in gradi, compreso tra 0° e 360° , che indica la posizione nel piano orizzontale del flusso di vento in riferimento alla direzione da cui proviene il vento medesimo.
- *Elevazione*: angolo che varia tra $\pm 60^\circ$ ed indica la posizione nel piano verticale del flusso di vento.

Nelle prossime sezioni della tesi si valuterà nel dettaglio la *taratura* della sola tipologia ad ultrasuoni di anemometro. In particolare, l'anemometro ultrasonico triassiale sarà l'elemento centrale del setup di misura impiegato per la sua taratura.

Cosa si intende per taratura di uno strumento

Per *taratura* di uno strumento si intende l'insieme di operazioni necessarie a determinare le *caratteristiche metrologiche* dello strumento stesso. Le caratteristiche metrologiche tipiche degli strumenti di misurazione sono l'accuratezza, la ripetibilità, la riproducibilità, la sensibilità e la linearità.

La taratura degli strumenti di misurazione avviene attraverso il confronto delle sue misurazioni con quelle effettuate da uno strumento di riferimento, definito anche strumento *campione*.

In particolare, si ricorre alla taratura principalmente per determinare l'accuratezza dello strumento, ovvero lo scostamento della misurazione effettuata dal tarando rispetto al valore di riferimento fornito dello strumento campione.

L'accuratezza di uno strumento viene solitamente espressa in termini di *incertezza di misura*: parametro definito come l'intervallo al quale appartiene, con una data probabilità, il risultato di una misurazione. Durante la taratura dello strumento si valutano gli effetti sistematici che influenzano le misurazioni, con l'obiettivo di correggere gli errori di tipo sistematico che danno luogo a degli scarti di misurazione sempre nella stessa direzione.

La taratura viene inoltre impiegata per determinare la *transcaratteristica* di uno strumento, ovvero il rapporto tra i valori letti e il segnale elettrico generato in uscita dallo stesso. La transcaratteristica permette di stimare la *sensibilità* dello strumento, parametro definito come la più piccola grandezza in grado di generare uno scostamento della misurazione dello strumento.

La taratura, effettuata attraverso il confronto con uno strumento campione, può avvenire in due metodologie diverse:

- Taratura *indiretta*: sia il tarando che lo strumento di riferimento misurano la stessa grandezza fisica. Il confronto dei valori d'uscita ottenuti dai due determina la deviazione del valore misurato da quello di riferimento, fornendo quindi una stima dell'accuratezza del tarando;
- Taratura *diretta*: lo strumento campione genera un valore di riferimento, nominale, che viene fatto misurare al tarando. Il confronto tra il valore nominale e quello misurato dal tarando determina l'accuratezza dello strumento.

La taratura viene eseguita a cadenza periodica (tipicamente ogni anno) da parte di enti certificati ai sensi delle normative internazionali (*ISO/IEC 17025*).

La taratura certificata riveste un ruolo di elevata importanza perché permette di garantire un elevato standard di qualità agli strumenti di misurazione: le grandezze da essi misurate acquisiscono riferibilità metrologica ai campioni nazionali o internazionali di misura.

La taratura degli strumenti non va però confusa con la loro *calibrazione*.

La calibrazione risponde a quel processo che mira ad incrementare l'accuratezza dello strumento di misurazione. La calibrazione, infatti, opera una sorta di regolazione dello strumento in modo da ridurre la deviazione tra le sue misurazioni e i valori di riferimento. La taratura, invece, si limita a determinare le caratteristiche metrologiche che appartengono allo strumento.

In genere, la calibrazione viene effettuata prima di ogni utilizzo dello strumento mentre la taratura tipicamente ad intervalli periodici. Per aggiornare le caratteristiche metrologiche dello strumento è però possibile effettuare la taratura dopo ogni processo di calibrazione.

Laboratori di taratura di anemometri

Con la necessità di realizzare anemometri sempre più accurati ed affidabili, sono nati dei veri e propri laboratori specializzati nella taratura di ciascun tipo di anemometro.

Sistemi di misurazione della velocità del vento

La velocità, la pressione e la temperatura rappresentano le principali grandezze fisiche associate agli esperimenti sui fluidi, proprio come l'aria. Dalla determinazione di questi parametri è possibile ricavare altre grandezze derivate quali la densità, la portata ecc.

Le tecniche di rilevazione della velocità di un fluido possono essere molteplici. Le più diffuse, però, si possono elencare come segue:

- *tubi di Pitot*: tecnica di misurazione che si basa su principi fisici come l'equazione di *Bernoulli* e un insieme di nozioni fisiche relative allo studio della fluidodinamica. La misurazione a *tubi di Pitot* sfrutta la differenza di pressione del fluido all'interno di un tubo, appunto di *Pitot* (manometro differenziale).
Le applicazioni della tecnica a *tubi di Pitot* spaziano dal campo automobilistico, come ad esempio nelle auto di *Formula Uno*, sino al campo aerospaziale, come gli elicotteri militari.
- *Anemometria a filo caldo*: tecnica basata sullo scambio di calore per convezione tra un filo metallico e il fluido. Il calore dissipato dal filo per effetto *Joule* è proporzionale alla velocità del fluido in cui è immerso. Una applicazione di tale tecnica è appunto quella degli anemometri a filo caldo discussi in precedenza.
- *Laser doppler anemometria o velocimetria (LDA/ LDV)*: tecnica basata sulle proprietà ottiche. In particolare, la tecnica *LDA* impiega la luce laser e studia le sue variazioni di frequenza quando incontra dei corpuscoli in movimento. Tale tecnica quindi si basa sull'effetto *Doppler* e un insieme di principi relativi al campo ottico. Una delle sue applicazioni principali appartiene al campo medico, infatti la tecnica *LDA* viene spesso utilizzata per fare delle analisi ematiche sui tessuti corporei.

Il laser doppler è uno strumento ad altissima precisione, vedremo quindi come possa trovare impiego anche nella taratura degli anemometri come sistema di misurazione di riferimento.

Ognuna di queste tecniche di misurazione viene utilizzata in base alle caratteristiche del fluido in esame. Ad esempio, nel caso di un fluido che presenta caratteristiche non stazionarie (la velocità del fluido varia nel tempo) oppure fenomeni di turbolenza, si preferiscono le tecniche *LDA* e/o ad *anemometria a filo caldo*.

Ciò che però accomuna queste tre tecniche è il fatto che ognuna di esse può essere impiegata nei laboratori di taratura degli anemometri.

Come spiegato in precedenza, la taratura necessita di un sistema di riferimento che fornisca dei campioni standard a cui andare a comparare le grandezze d'uscita degli anemometri in fase di taratura. Ciascuna delle tre tecniche vengono impiegate per realizzare sistemi di misurazione di riferimento.

In particolare, la trattazione valuterà l'impiego della tecnica *LDA*, che grazie alla sua altissima precisione realizza un sistema di misurazione di riferimento basato sull'impiego di un laser doppler.

Il sistema di riferimento viene inserito all'interno di quello che è uno degli elementi più importanti del setup di misura per la taratura anemometrica, la *galleria del vento*.

Il funzionamento fisico del sistema di misurazione verrà approfondito nelle sezioni seguenti della trattazione, in occasione dell'analisi dettagliata del setup di misura.

Galleria del vento

Una *galleria del vento* si può pensare come un sistema di simulazione delle condizioni ambientali, basato sul *principio di reciprocità*:

“le forze aerodinamiche agenti su un corpo in movimento ad una determinata velocità sono equivalenti a quelle applicate ad un corpo fermo impattato da un flusso alla medesima velocità”.

La galleria del vento è schematizzabile come un tubo cavo al cui interno circola dell'aria ad una determinata velocità. Pertanto, essa rappresenta lo strumento necessario all'analisi di fenomeni aerodinamici.

Generalmente una galleria del vento è suddivisa nelle seguenti “zone”, in ordine di percorrenza dell'aria:

- *Convergente*: zona di ingresso dell'aria, serve ad accelerare l'aria nel condotto;
- *Filtro a nido d'ape*: raddrizza il flusso d'aria ed elimina le turbolenze.
- *Camera di prova*: zona in cui viene inserito il dispositivo da tarare, qui la velocità raggiunta dall'aria è massima. Si trova tra il *nido d'ape* e la *ventola*, e può contenere sensori in grado di misurare densità, umidità e velocità dell'aria. Nella camera di prova sarà quindi inserito sia il tarando che il sistema di misurazione di riferimento.
- *Divergente*: zona attraversata dal flusso d'aria uscente dalla camera di prova. Si occupa di rallentarne la velocità.
- *Motore e Ventola*: motore elettrico responsabile della rotazione delle eliche che costituiscono la ventola.

La ventola è sempre posta alla fine del condotto per evitare la generazione di turbolenze in grado di alterare le misurazioni. Il “vento” all'interno della galleria non viene quindi generato per “spinta” bensì per “risucchio” (grazie alla posizione della ventola al termine del condotto della galleria).

Una prima ed importante classificazione delle gallerie del vento riguarda la circolazione dell'aria:

- *Galleria a ciclo aperto*: l'aria generata viene espulsa all'esterno una volta spento il motore elettrico quindi terminata la rotazione della ventola.
- *Galleria a ciclo chiuso*: l'aria utilizzata nelle tarature precedenti viene rimessa in circolo. Rappresentano la tipologia di galleria più efficiente, infatti vengono utilizzate anche nella taratura degli anemometri.

In *figura 6* una schematizzazione della galleria del vento a ciclo chiuso che evidenzia le zone elencate in precedenza.

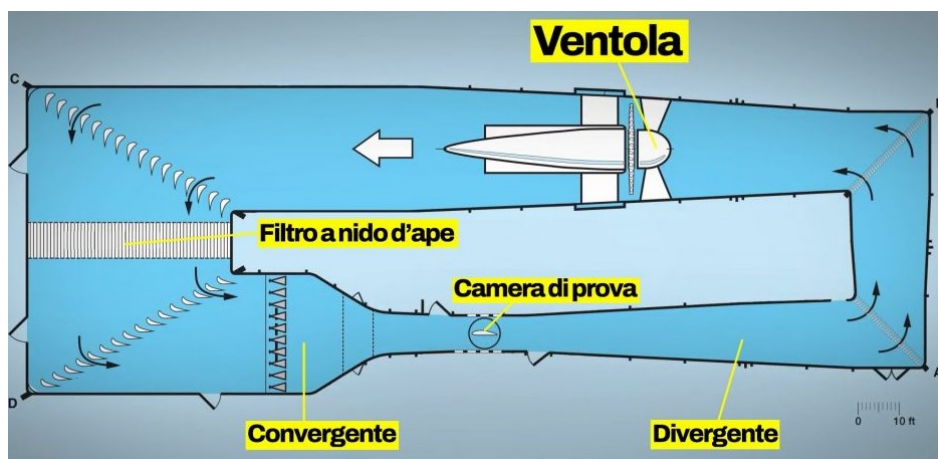


Figura 6: Galleria del vento a ciclo chiuso.

Un'altra classificazione delle gallerie riguarda il campo di velocità dell'aria che sono in grado di generare all'interno della sezione di test (la *camera di prova*).

La velocità delle gallerie è definita dal *numero di Mach*, un numero adimensionale che esprime il rapporto tra la velocità di un oggetto immerso in un fluido e la velocità del suono nello stesso fluido.

Pertanto, le gallerie del vento vengono classificate in:

- *Subsoniche*: numero di Mach compreso tra 0 e 0,8 (0 ÷ 980 km/h)
- *Transoniche*: numero di Mach compreso tra 0,8 e 1,2 (980 ÷ 1470 km/h);
- *Supersoniche*: numero di Mach compreso tra 1,2 e 5 (1470 ÷ 6126 km/h);
- *Ipersoniche*: numero di Mach superiore a 5 (\geq 6126 km/h).

La trattazione che seguirà nei prossimi capitoli sarà focalizzata sulla taratura di anemometri ultrasonici triassiali in gallerie del vento a *ciclo chiuso*. In particolare, si parlerà di galleria *subsonica* di tipo *Göttingen*, equipaggiata di un sistema di misurazione a *laser doppler* ad altissima risoluzione. L'anemometro sarà quindi tarato maniera *indiretta* confrontando le grandezze d'uscita con lo standard di riferimento ottenuto dal laser doppler.

A completamento della panoramica relativa ai laboratori di anemometria, risulta doveroso effettuare alcune precisazioni a livello legislativo/organizzativo che devono essere seguite dagli enti certificati alla taratura degli anemometri (*laboratori accreditati, pagina seguente*).

Laboratori accreditati alla taratura

La taratura degli anemometri dev'essere svolta da laboratori in grado di soddisfare la norma *ISO/IEC 17025* in termini di “*requisiti generali per la competenza dei laboratori di prova e di taratura*”.

Il processo di taratura di strumenti da parte di laboratori accreditati si basa sul confronto con campioni di riferimento di più alto livello possibile e conferisce alle misure di tali strumenti una “riferibilità” metrologica ai campioni nazionali o internazionali.

L'obiettivo quindi della taratura diventa la riduzione dei margini di errore degli strumenti per garantire misurazioni più accurate ed affidabili.

A livello nazionale, l'ente italiano di accreditamento “*Accredia*” si occupa di certificare ed attestare la competenza dei laboratori di prova e taratura.

Le tarature vengono classificati in aree metrologiche in base alle grandezze fisiche e ai campioni di misura trattati: i laboratori di anemometria rientrano nell'area metrologica delle “misure di velocità” dell'aria.

Secondo quanto riportato nella *banca dati* di *Accredia*, attualmente nel territorio italiano sono presenti soltanto tre laboratori di anemometria accreditati, locati a Torino, Milano e Padova.

Spesso i laboratori di anemometria si trovano all'interno delle aziende produttrici di anemometri stesse. In particolare, nei manuali degli strumenti da loro prodotti si può trovare il riconoscimento ottenuto da *Accredia*. Altre aziende produttrici, invece, si affidano ai laboratori accreditati per effettuare tarature su “commissione” dei loro strumenti.

Questa trattazione a sostegno del fatto che la taratura degli anemometri è un processo di particolare rilevanza che richiede degli standard di accuratezza elevati tali per cui non può essere effettuata da qualunque laboratorio di taratura.

Di seguito un esempio di tabella di accreditamento dell'area metrologica “*Velocità dell'aria*”:

Area metrologica <i>Metrological area</i>		Velocità dell'aria				
Settore / <i>Calibration field</i>		(SVA-01) Anemometri				
Strumento <i>Instrument</i>	Misurando <i>Measurand</i>	Condizioni <i>Additional parameters</i>	Campo di misura <i>Measurement range</i> (16)	Incertezza <i>Uncertainty</i> (17)	Metodo/Procedura <i>Method / Procedure</i>	
Anemometri a filo caldo, a tubo di Pitot, a ventolina con diametro ≤ 60 mm	Velocità dell'aria	Diametro della sezione di prova: 320 mm	da 0,1 m/s a 5 m/s	$0,65 / (V_{ref} - 0,05) + 2,1$	Metodo interno. Taratura per confronto con campione di riferimento	
			da 5 m/s a 35 m/s (\diamond)	2 %		
Anemometri a coppelle, a ultrasuoni, a filo caldo, a tubo di Pitot, a ventolina con diametro > 60 mm	Velocità dell'aria	Diametro della sezione di prova: 600 mm	da 1 m/s a 7,5 m/s	$4,2 \cdot (V_{ref})^{-0,3}$	Metodo interno. Taratura per confronto con campione di riferimento	
			da 7,5 m/s a 25 m/s	1,5 %		
			da 25 m/s a 60 m/s (\diamond)	2,4 %		

Figura 7: tabella accreditamento velocità dell'aria.

La tabella è suddivisa in sei colonne e due righe. Nella prima colonna di ciascuna vengono specificate le tipologie di anemometro che possono essere tarate all'interno del laboratorio accreditato. Nella seconda, terza a quarta colonna vengono elencati i parametri fisici che devono adottare le gallerie del vento per la taratura.

In particolare, alla voce “diametro della sezione di prova” si riferisce al diametro della camera di prova della galleria. Nella penultima colonna viene specificato il grado di incertezza standard percentuale che devono raggiungere gli strumenti da tarare. Nell'ultima colonna fa riferimento al metodo con il quale eseguire la taratura, ovvero mediante taratura indiretta come spiegato in precedenza.

In conclusione del capitolo introduttivo viene affrontata la principale applicazione dei sensori anemometrici, ovvero il campo della *meteorologia*.

Stazioni meteorologiche

Insieme a strumenti come il *barometro* (misure di pressione), *igrometro* (umidità), *termometro* e *pluviometro* (misure di precipitazioni), l'anemometro rappresenta uno strumento fondamentale per la determinazione delle condizioni ambientali.

A livello globale, tutte le stazioni meteorologiche sono dotate di almeno un sensore anemometrico. La velocità del vento, infatti, è presente in ogni “bollettino” meteo, ed è spesso misurata con cadenza giornaliera o addirittura oraria.

In *figura 8* si può osservare la tipica composizione di una stazione meteorologica. La stazione in figura è equipaggiata di un anemometro a coppette che consente la determinazione della velocità del vento in ogni direzione di provenienza.



Figura 8: stazione meteorologica.

La necessità di realizzare anemometri *accurati* e soprattutto *affidabili* è facilmente intuibile: lo strumento, posto in cima alla stazione meteo, dev'essere in grado di effettuare misurazioni a frequenza molto elevata ma allo stesso tempo di resistere agli agenti atmosferici a cui è soggetto.

Gli enti che si occupano di servizi ambientali impiegano i dati collezionati dalle stazioni meteo del territorio per realizzare dei veri e propri registri. La collezione di dati allocata nei registri permette di effettuare delle valutazioni sui cambiamenti climatici anno dopo anno.

Acquisire dati con elevata accuratezza risulta quindi di fondamentale importanza.

Capitolo 1

Analisi del setup di misura

Dopo la panoramica affrontata nel capitolo introduttivo, la trattazione entrerà nei dettagli implementativi del setup di misura: la taratura degli anemometri ad ultrasuoni triassiali verrà effettuata nella *camera di prova* di una specifica galleria del vento a *circuito chiuso*, dotata di un sistema di misurazione della velocità a *laser doppler*, basato sulla tecnica *LDA* spiegata in precedenza.

A partire dal seguente *schema a blocchi*, verrà fornita una descrizione dettagliata di ciascun componente impiegato nella taratura degli anemometri.

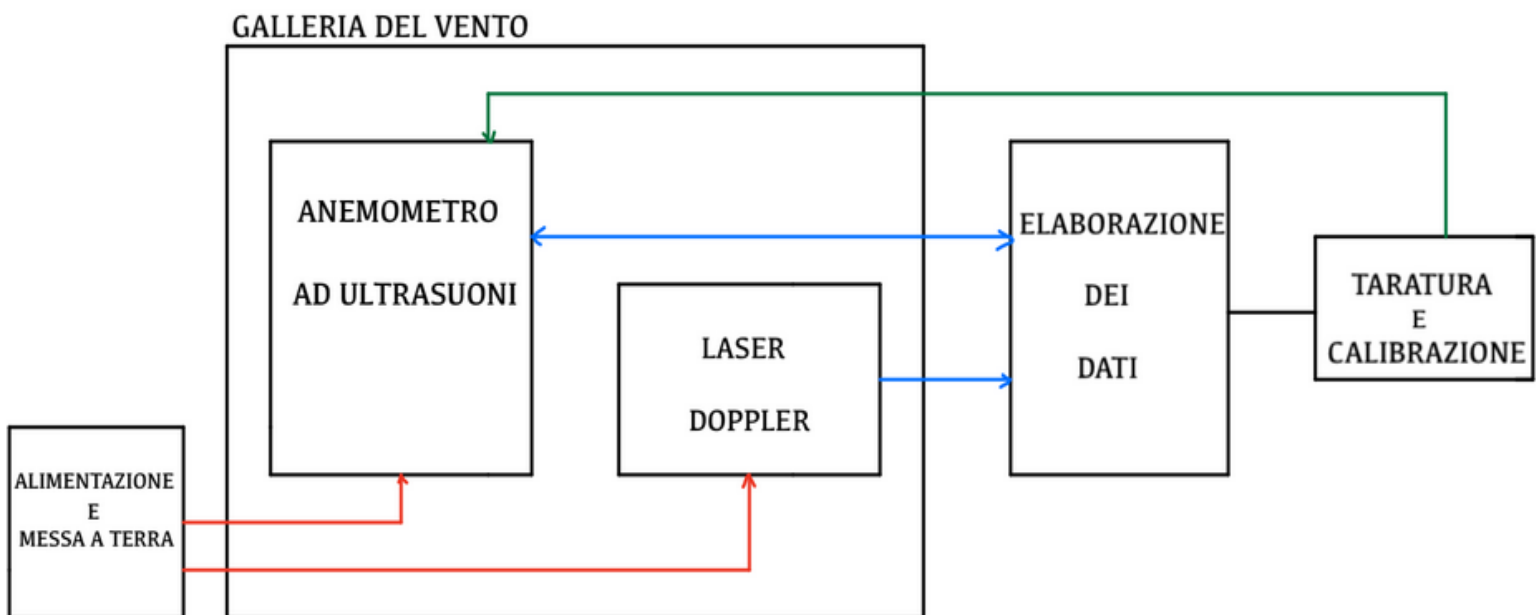


Figura 9: schema a blocchi del setup di misura per la taratura di anemometri.

Alimentazione e messa a terra

Il funzionamento sia dell'anemometro che del laser doppler richiede una sezione di *alimentazione e messa a terra*.

La messa a terra è fondamentale per garantire l'immunità ai *disturbi elettromagnetici*. Negli anemometri ad ultrasuoni è solitamente presente una vite di messa a terra inserita nel palo di sostegno dello strumento. Il sostegno viene poi conficcato nel terreno.

L'alimentazione dell'anemometro è realizzata tramite una *tensione continua* nel range dei $12 \div 30$ Volt e una *corrente continua* compresa tra $110 \div 400$ mA.

Il dimensionamento del circuito di alimentazione deve però tener conto dei *picchi iniziali di assorbimento di corrente* al momento dell'accensione dello strumento. I picchi di corrente solitamente vanno da $1 \div 5$ A.

La potenza nominale assorbita da un anemometro ad ultrasuoni è tipicamente nell'ordine di qualche watt, nel range $2 \div 6$ W.

L'alimentazione del laser doppler è tipicamente una *tensione continua* pari a 12V.

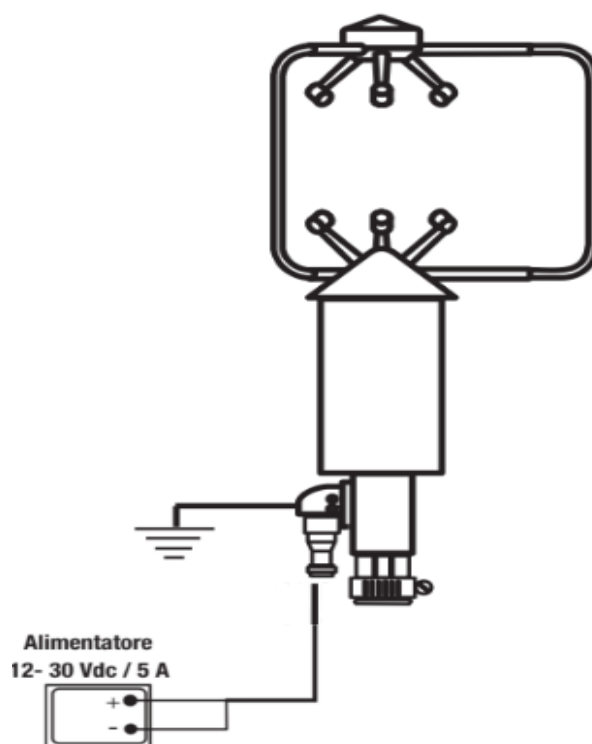


Figura 10: schema di alimentazione dell'anemometro.

Galleria del vento

Il laboratorio per la taratura di anemometri ultrasuoni, sia biassiali che triassiali, è dotato di una galleria del vento subsonica di tipo Göttingen, in grado di assicurare la migliore prestazione metrologica in termini di stabilità e uniformità.

La galleria Göttingen solitamente consiste in una struttura d'acciaio che può raggiungere fino ai 30 metri di lunghezza complessiva. Questa tipologia appartiene alle gallerie a circuito chiuso, in quanto consente il ricircolo dell'aria al termine di ogni sessione di test.



Figura 11: galleria del vento Göttingen a circuito chiuso.

La galleria dispone di una camera di prova “aperta” per consentire la taratura degli anemometri a pressione atmosferica. La dimensione della camera di prova dipende dalla sezione d'ingombro del dispositivo sotto test, in particolare:

- *Anemometri ultrasuoni*: la sezione d'ingombro è superiore ai 60mm di diametro quindi la camera di prova dispone di una sezione circolare di 600mm.
- *Anemometri a filo caldo, coppette e eliche*: la loro sezione d'ingombro è inferiore ai 60mm di diametro, pertanto la camera di prova avrà sezione circolare di 320mm.

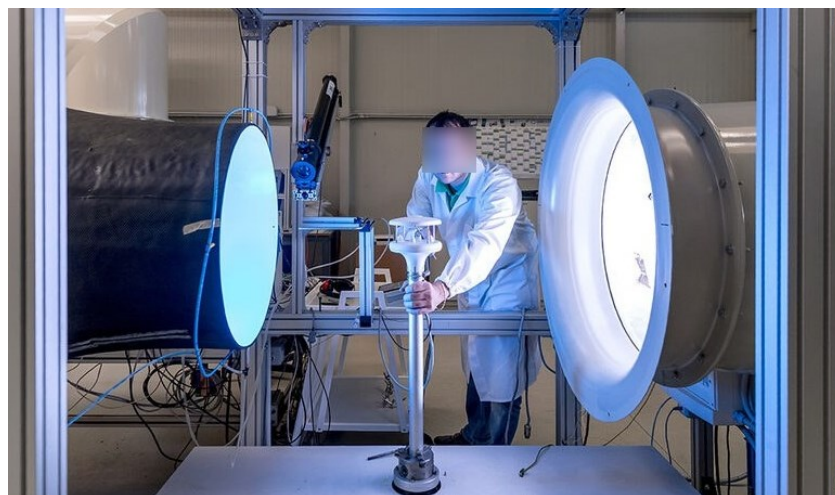


Figura 12: camera di prova aperta a sezione circolare e anemometro ultrasuoni.

Come si può notare dalla *figura 12*, l'anemometro è installato al vertice di un'asta metallica al fine di minimizzare la distorsione del flusso d'aria: così facendo, lo strumento risulta ancorato e privo di movimenti oscillatori. L'asta impiegata nella sezione di test sarà poi la stessa che comporrà lo strumento una volta installato nel sito in cui andrà ad operare.

La galleria *Göttingen* è azionata da un motore in corrente continua da 50kW e, in base al diametro della sezione di prova, consente di eseguire tarature all'interno di due differenti intervalli di velocità: 1 a 35 m/s e 1 a 60 m/s, rispettivamente per le sezioni da 320 e 600mm di diametro.

Solitamente la taratura viene effettuata in diversi intervalli temporali dove la velocità di erogazione dell'aria rimane costante e consente allo strumento di acquisire un numero sufficiente di campioni per determinare la misura d'uscita.

La galleria *Göttingen* è infine equipaggiata del sistema di misurazione *LDA* (*laser doppler anemometro*) che garantisce il miglior standard di riferimento possibile. Il principio di funzionamento e i dettagli implementativi del sistema di misurazione sono oggetto di approfondimento nelle pagine successive della trattazione.

Anemometro ad ultrasuoni triassiale

Anemometro statico (non prevede parti in movimento) ad ultrasuoni per la misura della velocità e direzione del vento superficiali.

Lo strumento utilizza tre coppie (*triassiale*) di *trasduttori ultrasonici* per calcolare il tempo di transito degli impulsi da essi generati, che si propagano in maniera bidirezionale (sia verso avanti che indietro) all'interno del fluido di cui si vuole misurare la velocità. Per il calcolo della direzione del vento, l'anemometro utilizza una bussola magnetica che fornisce l'escursione di due diversi angoli, uno detto "*azimuth*" mentre l'altro "*elevazione*". Maggiori dettagli riguardo il principio fisico di funzionamento sono riportati alle pagine 9 e 10 della trattazione.

La seguente sezione si occupa di fornire dettagli realizzativi dello strumento, focalizzandosi sugli aspetti elettronici che lo caratterizzano.

Le grandezze fornite in output dal dispositivo possono essere riassunte nella seguente tabella:

Grandezza	Unità di misura	Range misurazioni	Risoluzione	Accuratezza
Velocità del vento	m/s (km/h)	0 ÷ 70 m/s (252 km/h)	0.01 m/s	±1%
Direzione del vento	gradi	Azimuth: 0 ÷ 360° Elevazione: ± 60°	0.1° 0.1°	±1° ±1°

Tabella 1: grandezze di uscita del sensore anemometrico (l'accuratezza fa riferimento al valore della lettura).

Solitamente, un anemometro ultrasonico triassiale è in grado di fornire ulteriori grandezze d'uscita, dato che può integrare a bordo una serie di *sensori aggiuntivi*. Ad esempio, può essere dotato di sensori di pressione, temperatura e/o umidità relativa.

Tali grandezze sono opzionali e non rappresentano un elemento di rilevante importanza per la taratura degli anemometri dato che non necessitano di una galleria del vento per la loro calibrazione.

Il sensore anemometrico calcola il valore medio dei campioni acquisiti all'interno di un determinato intervallo temporale. In particolare, per ciascuna grandezza fisica d'uscita, è possibile selezionare due periodi temporali distinti, all'interno del quale determinare il valore medio: un intervallo compreso tra $1 \div 60s$ oppure $1 \div 60min$.

Il sensore è inoltre dotato di un *convertitore analogico-digitale* che fornisce in uscita delle stringhe digitali formattate in otto caratteri ASCII consecutivi. Ciascuna stringa digitale rappresenta la grandezza fisica misurata. L'intervallo di tempo all'interno del quale lo strumento calcola il valore medio corrisponde anche al periodo che intercorre tra due stringhe di dati consecutive.

La grandezza in uscita dal sensore viene trasmessa ai sistemi di acquisizione ed elaborazione nelle seguenti due modalità:

- *Comunicazione analogica*: il sensore è costituito da un numero di output analogici pari al numero di grandezze fisiche che è in grado di determinare. Ciascun output analogico opera all'interno di intervalli selezionabili sia di corrente che di tensione:

Output analogici	
Corrente (mA)	$0 \div 20mA$ oppure $4 \div 20mA$
Tensione (V)	$0 \div 1V$; $0 \div 5V$; $1 \div 5V$; $0 \div 10V$

Tabella 2: range di tensione e corrente in uscita dal sensore.

Ad esempio, ipotizzando di aver selezionato un output analogico in tensione tra $1 \div 5V$ avremmo la seguente corrispondenza con la velocità in m/s:

$$-45 \text{ m/s} \rightarrow 1V$$

$$+45 \text{ m/s} \rightarrow 5V$$

La corrispondenza tra il valore misurato e la grandezza analogica d'uscita permette di determinare la transcaratteristica dello strumento, ovvero il rapporto tra questi due valori. La transcaratteristica viene impiegata nella taratura per determinare il grado di *sensibilità* raggiunta dallo strumento, quindi una delle sue grandezze metrologiche.

Ciascun output analogico può raggiungere una risoluzione massima di 14bit.

Le uscite analogiche del sensore possono essere collegate direttamente ad un *datalogger*, un dispositivo in grado di acquisire e memorizzare le grandezze d'uscita del sensore. Il *datalogger* immagazzina i dati all'interno di registri e permette di operare indipendentemente dalla presenza di un computer.

Per questo motivo, i *datalogger* vengono installati nella maggior parte delle stazioni meteorologiche: i dati acquisiti dal dispositivo possono poi essere trasmessi a distanza utilizzando modem radio oppure moduli GSM.

Il *datalogger* consente una comunicazione unidirezionale dei dati provenienti dal sensore e diretti al dispositivo stesso. Sfrutta lo stesso circuito di alimentazione utilizzato dal sensore e porta in dotazione una batteria "tampone" per alimentare l'anemometro in casi di emergenza come l'assenza di tensione da parte del circuito di alimentazione.

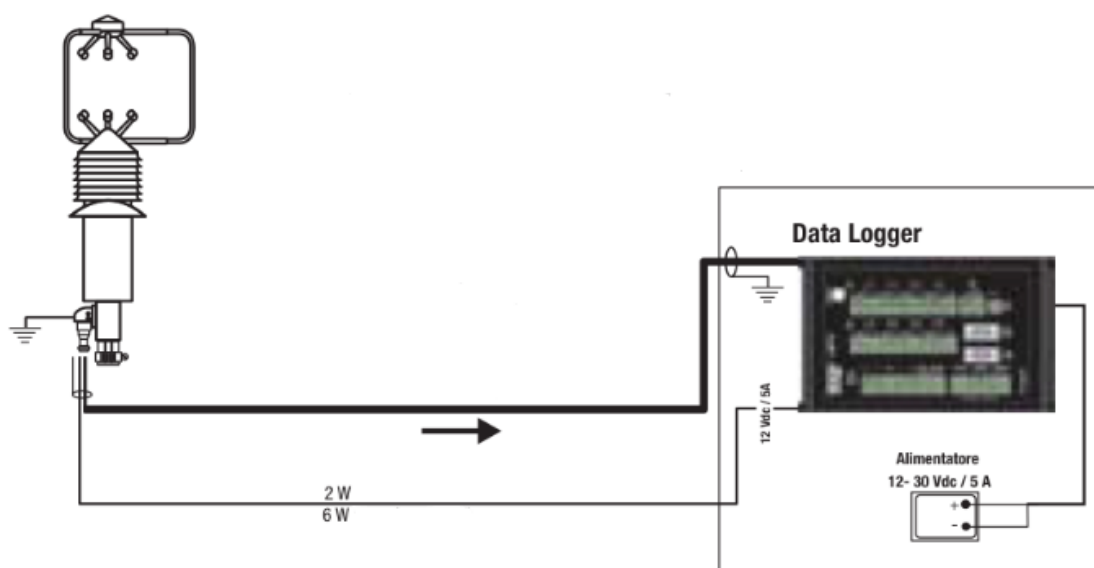


Figura 14: anemometro in modalità di comunicazione analogica e datalogger per acquisizione e memorizzazione delle misure.

- *Comunicazione digitale*: l'anemometro comunica in maniera bidirezionale (full-duplex) i dati da e per il computer attraverso lo standard seriale. Il computer è equipaggiato di un applicativo software per l'acquisizione e memorizzazione dei dati oltre che per la configurazione del sensore stesso. Lo standard seriale solitamente utilizzato è l'*RS232* per trasferimenti di dati a bassa velocità di propagazione.

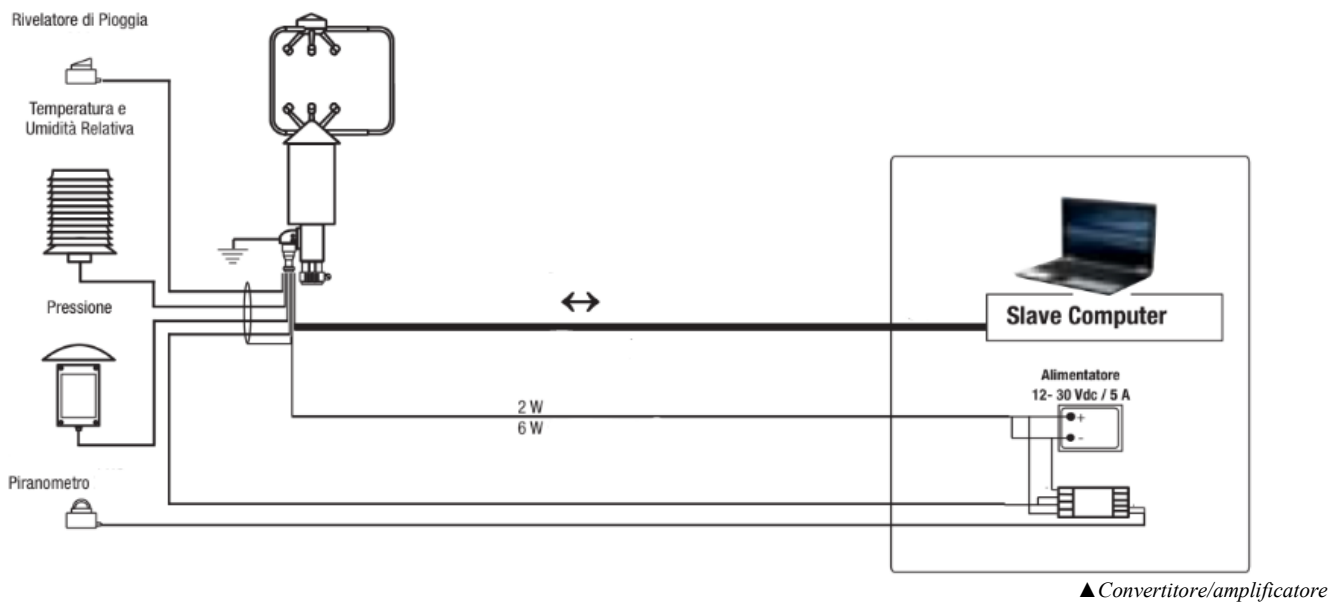


Figura 15: Modalità di comunicazione digitale. Computer per acquisizione, memorizzazione e configurazione.

In figura 15 la configurazione di comunicazione digitale: è possibile notare la presenza di sensori aggiuntivi (opzionali) e di un convertitore/amplificatore di segnali per la corretta alimentazione degli stessi. (Il piranometro è un dispositivo per la misura della radiazione solare)

Sia la modalità di comunicazione *analogica* che quella *digitale* prevedono una configurazione in *alta frequenza* che fornisce i dati di output alle seguenti frequenze:

Modalità Alta Frequenza	
<i>Output</i>	<i>Frequenza (Hz)</i>
Analogico	5 ÷ 20 Hz
Digitale	50 Hz

Tabella 3: frequenza di emissione dei dati in uscita nella modalità ad alta frequenza.

Per garantire il corretto funzionamento del sensore anemometrico anche in ambienti caratterizzati da temperature estreme o dalla presenza di ghiaccio e neve, il sensore anemometrico è equipaggiato di un sistema di riscaldamento. Tale sistema si occupa di evitare la formazione di ghiaccio e neve sulla superficie di componenti sensibili come i trasduttori ultrasonici o i sensori opzionali. Il circuito di riscaldamento sfrutta il sistema di alimentazione dell'anemometro e interviene quando l'ambiente esterno raggiunge temperature critiche per il funzionamento del dispositivo (tipicamente inferiore agli 0 °C).

Laser doppler

La galleria del vento è dotata di un sistema di misurazione della velocità.

L'obiettivo di tale sistema è fornire una stima precisa della velocità dell'aria erogata dalla galleria, in modo da rappresentare uno standard di riferimento adeguato alla taratura del sensore anemometrico.

Il sensore produrrà in uscita un valore pari alla media dei campioni misurati all'interno di un determinato intervallo temporale. Tale valore medio verrà quindi confrontato con il valore di riferimento (*taratura indiretta*) e permetterà di definire la deviazione ottenuta.

Il sistema di misurazione comunemente impiegato nella taratura degli anemometri ultrasonici è basato sulla tecnica *LDA*, *laser doppler anemometro*: tecnica di misurazione realizzata tramite l'impiego di un raggio laser che non prevede alcun tipo di contatto fisico con l'oggetto di cui si vuole misurare la velocità. Il vantaggio della tecnica LDA è l'elevata risoluzione e accuratezza raggiunta dalle misurazioni, ecco perché conviene adottarlo come standard di riferimento per la calibrazione del sensore.



Figura 13: Laser doppler anemometro.

La tecnica LDA sfrutta il principio fisico dell'effetto Doppler (o "Doppler shift"): la frequenza o lunghezza d'onda della radiazione emessa da una sorgente viene fatta variare in modo apparente dal moto relativo di un oggetto rispetto alla radiazione stessa. In particolare, i fronti d'onda della radiazione sorgente impiegano minor tempo di propagazione man mano che l'oggetto in movimento si avvicina, causando una variazione apparente della frequenza della sorgente.

La frequenza della radiazione emessa è quindi una funzione sia della velocità della sorgente (in questo caso nulla perché il sistema di misurazione è stazionario), che della velocità assunta dall'oggetto in movimento (flusso d'aria in questo caso).

L'effetto doppler viene applicato anche alle radiazioni policromatiche come la luce. Quando la luce viene riflessa da un oggetto in movimento, come una particella del flusso d'aria, la frequenza della luce riflessa è traslata di una quantità proporzionale alla velocità della particella stessa. Pertanto, la velocità delle particelle di fluido in movimento può essere determinata semplicemente valutando la traslazione della frequenza del fascio riflesso rispetto a quello trasmesso.

Di seguito un esempio che permette di chiarire il principio di funzionamento della tecnica LDA.

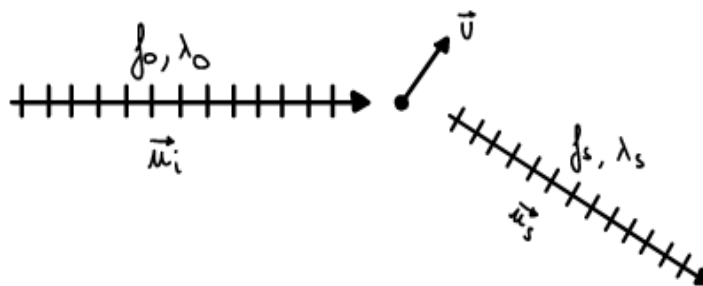


Figura 15: schematizzazione dell'effetto Doppler.

In accordo con lo schema in figura 15 si consideri:

- una particella in movimento con velocità \vec{U} lungo la direzione indicata dallo schema;
- un fascio laser con frequenza f_0 e lunghezza d'onda λ_0 che la illumina.

Il vettore \vec{u}_i indica la direzione di propagazione del fascio laser incidente sulla particella. Assumendo che la particella abbia una forma sferica, si può ipotizzare che il fascio laser incidente venga riflesso in maniera equiprobabile in tutte le direzioni.

Prendendo in considerazione il solo raggio riflesso nella direzione individuata dal vettore \vec{u}_s si può notare come tale raggio riflesso abbia una frequenza f_s differente dal raggio incidente e una lunghezza d'onda λ_s .

In definitiva il raggio riflesso ha una frequenza traslata rispetto a quella del fascio incidente. Tale traslazione viene definita come *frequenza doppler* ed è pari alla differenza tra le due frequenze:

$$f_D = f_o - f_s.$$

La radiazione laser incidente e quella riflessa sono caratterizzate solitamente da una frequenza dell'ordine di 10^{14} Hz, mentre la frequenza doppler appartiene all'ordine di 10^7 Hz. Pertanto, la tecnica *LDA* si limita a misurare direttamente la frequenza doppler e non quella del raggio riflesso, che risulterebbe essere insufficientemente accurata.

Il sistema di misurazione basato su LDA si può schematizzare come segue:

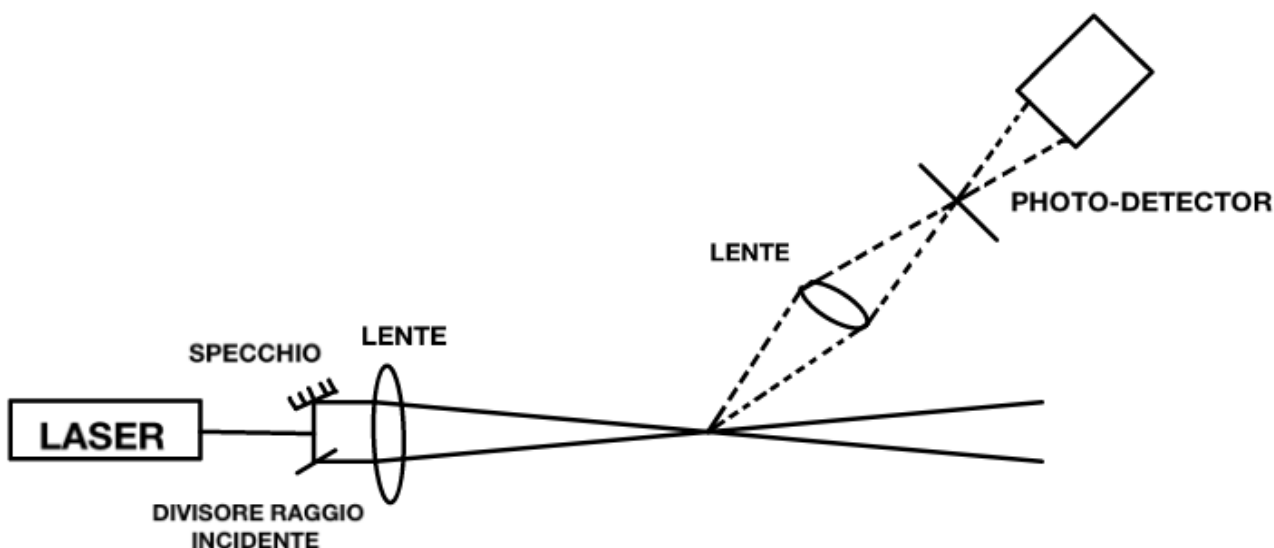


Figura 16: sistema di misurazione velocità dell'aria basato su tecnica LDA.

Il raggio laser, tipicamente costituito da ioni di Argon, viene fatto incidere su un sistema realizzato a specchio (elemento ottico) che permette di separare il raggio in due laser di uguale intensità.

I due fasci vengono quindi focalizzati da una lente e fatti incrociare per generare una figura d'interferenza nella zona di intersezione. La figura d'interferenza è costituita da un susseguirsi di frange di interferenza, che non sono altro che una sequenza di zone di luce e di buio in corrispondenza rispettivamente dei massimi e minimi di intensità dei due raggi laser.

Quando una particella in movimento incontra una delle frange create dalla figura d'interferenza, genera un raggio riflesso caratterizzato dall'effetto Doppler spiegato in precedenza. Infine, il raggio riflesso viene focalizzato da una lente sulla superficie del photo-detector, dispositivo in grado di generare un segnale in corrente proporzionale alla velocità delle particelle in movimento.

Elaborazione dei dati

Il sensore comunica i risultati delle misurazioni attraverso i sistemi digitali o analogici visti in precedenza.

L'acquisizione e l'elaborazione dei dati dipende quindi dalla modalità di comunicazione scelta e si può riassumere come segue:

- *Computer*: i dati in uscita dal sensore anemometrico vengono direttamente acquisiti ed immagazzinati nella memoria solida del computer, grazie alla comunicazione seriale tra i due dispositivi. I dati raccolti permettono di definire il grado di precisione e accuratezza che lo strumento ha raggiunto durante le misurazioni.

Il laboratorio di anemometria è equipaggiato di un apposito computer dove viene eseguito il software applicativo per la calibrazione del sensore.

- *Datalogger*: dispositivo trattato in precedenza, impiegato principalmente nelle applicazioni in cui non è possibile garantire l'intervento di personale fisico (operatore dedicato) per l'acquisizione ed elaborazione dei dati (ad esempio, stazioni meteorologiche sulle alture delle montagne).

Il datalogger è direttamente connesso alle uscite analogiche del sensore, e consente la comunicazione a distanza dei dati immagazzinati. Ad esempio, molti datalogger sono dotati di un modulo radio per il trasferimento via antenna dei dati ad un computer centrale.

La figura 16 riporta una schematizzazione di tale modalità di comunicazione.

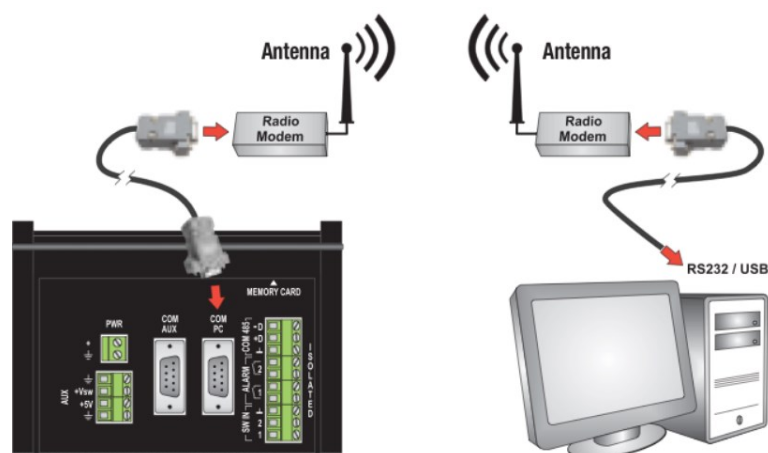


Figura 16: datalogger in comunicazione radio per il trasferimento dati.

Taratura e calibrazione

Per effettuare la taratura dell'anemometro ultrasonico è necessario inserire il dispositivo all'interno della galleria del vento, in particolare nella camera di prova aperta da 600mm di diametro. Il dispositivo viene ancorato ad un'asta metallica per garantire la miglior stabilità in termini di oscillazioni.

La taratura viene effettuata a velocità costanti a partire da 1m/s fino ai 70m/s (252 km/h). Durante la fase di test il dispositivo viene ruotato in senso orario per garantire una calibrazione ottimale in ogni direzione del flusso d'aria.

I campioni misurati vengono elaborati e processati da un applicativo software eseguito da un computer connesso al dispositivo per via seriale. Il programma fornisce in uscita il valore medio dei campioni misurati all'interno di un periodo di intervallo selezionabile (tipicamente da 1 a 60s).

Il valore medio viene quindi confrontato con il valore standard di riferimento ottenuto dal sistema di misurazione LDA: la deviazione del valore medio dal valore standard permette di determinare le caratteristiche metrologiche del dispositivo.

Dopo aver determinato le caratteristiche del dispositivo in termini di accuratezza, sensibilità ecc., è possibile calibrare lo stesso in modo da ridurre la deviazione delle misurazioni ottenute rispetto ai valori di riferimento del laser doppler.

In *figura 17* è rappresentato un esempio di programma software che, applicato al dispositivo anemometrico, permette di modificarne alcuni parametri di calibrazione in modo da aumentarne l'accuratezza.

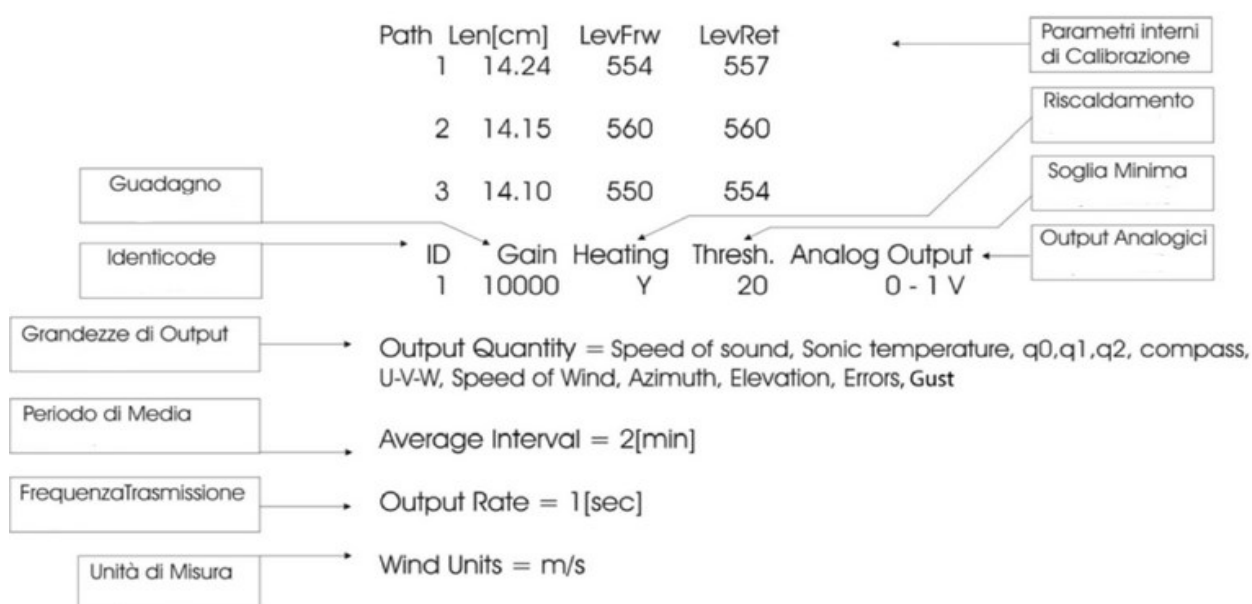


Figura 17: schermata esemplificativa software per la taratura dello strumento.

Ad esempio, il parametro “*guadagno*” permette di allineare la velocità misurata dall’anemometro con quella fornita dal sistema di misurazione perché agisce sulle componenti cartesiane e quindi sulla velocità misurata dai trasduttori ultrasonici di cui il sensore è composto.

Conclusioni

La taratura dello strumento dev'essere conforme alle procedure indicate all'interno dei documenti rilasciati dagli enti di accreditamento. In particolare, all'interno di tali documenti vengono specificati i valori di incertezza che le misure dello strumento devono rispettare.

Nel caso in esame la taratura viene eseguita *indirettamente* con l'anemometro laser doppler, campione di riferimento in dotazione al laboratorio di taratura.

Nella taratura di anemometri ultrasonici, l'incertezza di misura viene espressa in termini di incertezza estesa, risultante dal prodotto tra l'incertezza standard ed il fattore di copertura:

$$U(\hat{x}) = u(\hat{x}) * k$$

Il livello di confidenza scelto solitamente è pari al 95%, che permette quindi di ottenere un fattore di copertura circa pari a due ($k \cong 2$).

Di seguito si riporta un esempio di taratura:

Per ogni misurazione effettuata si è atteso un periodo di 60s affinché venissero raccolti i campioni sufficienti a determinare un valore medio adeguato. Sono state quindi eseguite cinque diverse misurazioni per valori di velocità compresi nell'intervallo tra 0 e 35 m/s.

La *tabella 4* riporta la velocità fornita dal sistema di riferimento, il valore medio in uscita dal sensore (*lettura*), la differenza tra le prime due colonne, il fattore di correzione per la calibrazione del dispositivo ed infine l'incertezza standard.

Riferimento v_{ref} (m/s)	Lettura v_{read} (m/s)	Differenza $\Delta = v_{ref} - v_{read}$ (m/s)	Fattore di correzione $k = v_{ref}/v_{read}$	Incertezza standard (tipo A) %
0	0	0	-	-
1,011	0,950	0,061	1,064	4,3
2,559	2,520	0,039	1,015	3,2
7,520	7,400	0,120	1,016	2,3
20,000	19,740	0,260	1,013	1,5
34,920	34,480	0,44	1,013	2,4

Tabella 4: esemplificazione taratura anemometro.

Incertezza standard calcolata tramite la formula: $u_A(\hat{x}) = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=0}^N (x_i - \hat{x})^2}$
con $N=10$ letture per ogni misurazione

Di conseguenza, si ottiene il seguente grafico che rappresenta l'andamento dei valori di lettura e quelli di riferimento rispettivamente in colore azzurro e arancione, quindi la deviazione tra i due valori.

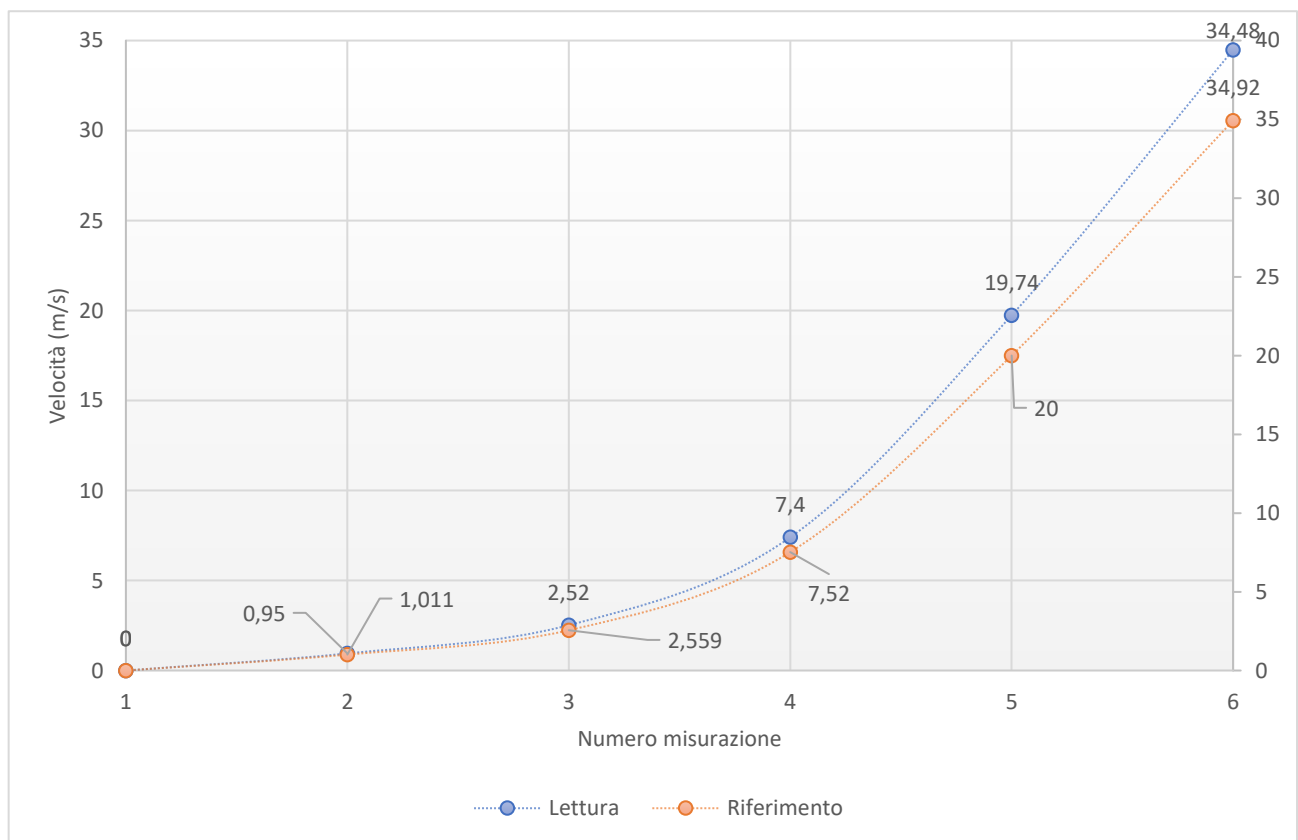


Grafico 1: Andamento della velocità misurata e di riferimento.

Si può concludere che l'anemometro risulta tarato soltanto quando risponde alle specifiche imposte dalle normative previste dagli enti di accreditamento. Inoltre, una volta raggiunti gli obiettivi prefissati in termini di affidabilità, accuratezza e quindi incertezza di misura, il dispositivo è conforme alle specifiche di progetto e può essere destinato all'applicazione per il quale è stato tarato.

Bibliografia

- *Deltaohm, manuale anemometro ad ultrasuoni HD51.3D*
“DeltaOHM_HD51.3D_manuale_ITA.pdf”

Indirizzo Internet: <https://www.deltaohm.com/it/>

- L. Franceschelli, *Anemometri a filo caldo: studio di un sistema di progettazione e calibrazione.*

Indirizzo Internet: <https://amslaurea.unibo.it/16544/>

- G. Giorgi, *Incertezze di misura. Sistemi di Misura per l'Automazione.*
- G. Savorgnani, *Le gallerie del vento.*

Indirizzo Internet:

http://www2.malignani.ud.it/WebEnis/aer/Portfolio/Gallerie_del_vento.pdf

- Laboratori accreditati, norma ISO/IEC 17025 e tabella di accreditamento.

Indirizzo Internet: <https://www.accredia.it/>

Indirizzo Internet: https://it.wikipedia.org/wiki/ISO/IEC_17025

Indirizzo Internet:

https://services.accredia.it/ppadt/download_file.jsp?fileall=124Trev37ALL_DT.pdf&code nte=3097

- *Deltaohm, manuale e datasheet anemometro HD2003.*

Indirizzo Internet: https://www.deltaohm.com/wp-content/uploads/document/DeltaOHM_HD2003_manuale_ITA.pdf

Indirizzo Internet: https://www.deltaohm.com/wp-content/uploads/document/DeltaOHM_HD2003_datasheet_ITA.pdf

- *Deltaohm, Taratura velocità dell'aria.*

Indirizzo Internet: <https://deltaohmlab.it/cs/velocita-dellaria/>

- *Tecnica LDA ed effetto Doppler.*

Indirizzo Internet: https://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_effect

Indirizzo Internet:

http://www.dic.unipi.it/e.buffoni/pdf_enzo/Velocimetro%20laser_Laser_Doppler_Velocimetry.pdf

- *Deltaohm, certificato di taratura Accredia.*

Indirizzo Internet: https://deltaohmlab.it/wp-content/uploads/2021/10/FAC-SIMILE_Anemometria_Catena_Anemometrica.pdf

Elenco delle figure

- Figura 1: <https://www.directindustry.it/prod/aoip/product-7451-2104069.html>
- Figura 2: <https://www.directindustry.it/prod/tsi/product-22441-395473.html>
- Figura 3: <https://arwmisure.com/anemometro-a-coppe-consigli-utili-per-la-scelta/>
- Figura 5: <https://www.geass.com/wp-content/uploads/2015/12/Anemometro-a-ultrasuoni-Delta-Ohm-HD52.3D.jpg>
<https://www.geass.com/wp-content/uploads/2015/06/Anemometro-a-ultrasuoni-Delta-Ohm-HD2003.jpg>
- Figura 6: <https://static.geopop.it/wp-content/uploads/sites/32/2022/02/NASA-Vertical-Flow-Tunnel-1024x576.jpg>
- Figura 7: https://services.accredia.it/ppadt/download_file.jsp?fileall=124Trev37ALL_DT.pdf&codente=3097
- Figura 8: <https://www.marineometeo.it/images/stazione/desc-stazione1.jpg>
- Figura 11, 12, 13: <https://deltaohmlab.it/cs/velocita-dellaria/>
- Figura 16: https://www.deltaohm.com/wp-content/uploads/document/DeltaOHM_HD32MT_datasheet_ITA.pdf
- Figura 17: https://www.deltaohm.com/wp-content/uploads/document/DeltaOHM_HD2003_manuale_ITA.pdf