

ALMA MATER STUDIORUM UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA – Sede di Forlì

Corso di Laurea in
INGEGNERIA AEROSPAZIALE
Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA
in ING-IND/06 – FLUIDODINAMICA

ANALISI SPERIMENTALE DI UN GETTO PIANO

Candidato:
Alex Ravaioli

Relatore:
Prof. Gabriele Bellani

ABSTRACT

Il seguente elaborato finale di laurea descrive in maniera esaustiva l'effetto della temperatura sulla calibrazione e sul successivo utilizzo di anemometri a filo caldo; in particolare si fa riferimento ad un calibratore apposito a getto piano presente nel centro di ricerca CICLoPE, nel quale è situata una galleria del vento per lo studio del moto turbolento ad alti numeri di Reynolds. Viene quindi descritto il profilo di velocità e le caratteristiche di tale dispositivo per poi analizzare tramite risultati diretti l'effetto della temperatura sulla accuratezza di misura. Si descrive in modo dettagliato la calibrazione di anemometri sia a filo singolo, sia doppio, dopo di che vengono presentati metodi di correzione della velocità in un range compatibile ad una galleria del vento con flusso subsonico incomprimibile.

Infine, si valuta un possibile sistema per ricavare sperimentalmente la costante di temperatura della resistenza del filo dell'anemometro a filo caldo, sempre tramite la variazione di temperatura alla quale il calibratore è soggetto.

SOMMARIO

| | |
|--|-----|
| Abstract..... | ii |
| Sommario | iii |
| 1 Introduzione..... | 1 |
| 2 Principi e utilizzo degli anemometri a filo caldo..... | 2 |
| 2.1 Anemometria a filo caldo | 2 |
| 2.1.1 Introduzione..... | 2 |
| 2.1.2 Vantaggi | 2 |
| 2.1.3 Svantaggi | 3 |
| 2.1.4 Caratteristiche della sonda..... | 3 |
| 2.1.5 Principi operativi | 4 |
| 2.1.6 Modalità operative..... | 6 |
| 2.2 Calibrazione anemometri a filo caldo..... | 6 |
| 2.2.1 Sonda a filo multiplo | 8 |
| 2.2.2 Calibrazione della temperatura..... | 8 |
| 3 Ciclope e calibratore a getto piano | 9 |
| 3.1 Galleria del vento CICLoPE | 9 |
| 3.2 Calibratore a getto piano | 10 |
| 3.3 Caratteristiche getto piano | 12 |
| 4 Calibrazione e analisi della temperatura..... | 13 |
| 4.1 Setup operativo di misura | 13 |
| 4.1.1 Tubo di pitot | 13 |
| 4.1.2 Anemometro a filo caldo | 13 |
| 4.1.3 Sensore di temperatura | 13 |
| 4.1.4 Sistema di Riferimento | 14 |
| 4.2 Risultati dell'analisi di temperatura..... | 14 |
| 4.3 Procedura dettagliata di calibrazione | 16 |
| 4.3.1 Calibrazione X-wire | 19 |
| 4.4 Metodi di correzione della temperatura..... | 22 |

0. Sommario

| | | |
|-------|---|----|
| 4.4.1 | Primo metodo | 22 |
| 4.4.2 | Secondo metodo | 23 |
| 4.4.3 | Confronto fra i due metodi di correzione della velocità..... | 23 |
| 4.5 | Determinazione della costante di temperatura della resistenza del filo..... | 26 |
| 5 | Conclusioni..... | 29 |
| 6 | Bibliografia..... | 30 |

1 INTRODUZIONE

L'anemometria a filo caldo rappresenta un sistema di rilevazione della velocità del flusso molto utilizzato, soprattutto qualora sia necessario valutare gli effetti della turbolenza. Gli anemometri a filo caldo, tuttavia, devono subire un processo di calibrazione prima di essere impiegati.

Nel centro di ricerca CICLOPE è presente una galleria del vento subsonica per lo studio del moto turbolento ad alti numeri di Reynolds; risulta quindi necessario l'utilizzo di sistemi di misura della velocità e del livello di turbolenza come gli anemometri a filo caldo.

Come descritto nei particolari in seguito, non è possibile calibrare le sonde direttamente nella camera di prova della galleria del vento a causa dell'alto livello di turbolenza. Il centro di ricerca si è quindi provvisto di un calibratore a getto piano per effettuare questa operazione, appositamente realizzato secondo le specifiche del *Long Pipe*. Come analizzato in seguito, il dispositivo però presenta una variazione di temperatura che porta a rilevanti variazioni della velocità effettiva; ne risulta quindi una calibrazione non accurata che rende vano l'utilizzo di tale calibratore. È necessario correggere questo fenomeno o tramite hardware o software; l'elaborato si occupa di fornire una correzione al problema tramite la seconda soluzione. È di fondamentale importanza caratterizzare la problematica prima di fornire eventuali metodi correttivi.

L'anemometria a filo caldo, le sue applicazioni e le caratteristiche dei dispositivi e sonde utilizzate per le analisi sperimentali di cui questo elaborato tratta, vengono descritte nel capitolo 2. Successivamente, nel capitolo 3, vengono descritte le caratteristiche del *Long Pipe* e del getto piano. Infine, il capitolo 4, rappresenta la parte principale dell'elaborato, nella quale viene analizzata la problematica della temperatura, si descrivono le specifiche correzioni e si trova sperimentalmente un valore della costante di temperatura associata alla resistenza del filo. Le conclusioni vengono esposte nel capitolo 5.

2 PRINCIPI E UTILIZZO DEGLI ANEMOMETRI A FILO CALDO

2.1 ANEMOMETRIA A FILO CALDO

2.1.1 Introduzione

Per la rilevazione di velocità sono presenti dispositivi più o meno accurati, la cui scelta dipende dall'applicazione e dall'ambiente in cui saranno utilizzati.

L'elemento base di rilevazione della velocità è il tubo di pitot, il quale acquisisce in modo diretto la pressione dinamica, utilizzata per ricavare la velocità conoscendo le condizioni del flusso (densità e tipo di gas).

Un altro dispositivo utilizzato per la rilevazione di velocità è l'anemometro a filo caldo.

Gli anemometri a filo caldo (Hot Wire Anemometry) sono dispositivi utilizzati per misurare in modo preciso la velocità di un flusso in una o più componenti. Il principio fisico alla base di questi dispositivi è il trasferimento di calore convettivo causato dal flusso in movimento rispetto a un filo conduttore riscaldato tramite corrente elettrica. In seguito verranno descritti i principali vantaggi e svantaggi di questi dispositivi e la loro messa a punto per determinare la velocità del flusso.

2.1.2 Vantaggi

L'anemometro a filo caldo presenta diversi vantaggi che lo rendono l'unico dispositivo adeguato ad affrontare specifiche problematiche di rilevazione di velocità.

- **Costo:** Il costo rappresenta un importante vantaggio in relazione ad altri tipi di dispositivi comparabili come gli anemometri laser doppler (LDA).
- **Risposta in frequenza:** avendo una risposta in frequenza di 0-50 kHz, l'anemometro a filo caldo rappresenta l'unica alternativa per campionare a frequenze molto elevate, comparato con gli LDA.
- **Grandezza:** gli HWA presentano una grandezza circa dieci volte minore rispetto ai concorrenti LDA.

- **Range di velocità:** Entrambi gli LDA e gli HWA presentano un possibile range di velocità elevate, da circa 0 m/s a una velocità con flusso comprimibile.
- **Accuratezza e rapporto S/N:** Gli HWA, come gli LDA presentano una accuratezza molto buona, abbondantemente entro l'1%, tuttavia gli LDA presentano una risoluzione che è un ordine di grandezza minore degli HWA.

2.1.3 Svantaggi

Sebbene l'anemometro a filo caldo possieda diversi vantaggi che lo rendono l'unica alternativa per determinate applicazioni, bisogna considerare che sono presenti alcuni potenziali problemi da tenere in considerazione se si vuole utilizzare questo dispositivo.

- **Flussi ad alta intensità di turbolenza:** Gli HWA presentano buone caratteristiche fino a una intensità di turbolenza del flusso medio-basso. Infatti, con alta turbolenza l'anemometro a filo caldo potrebbe trascurare termini di ordini elevati della espansione in serie della velocità. Inoltre, per la simmetria della sonda, non viene riconosciuto il verso frontale o posteriore con cui il flusso impatta l'anemometro.
- **Disturbo della sonda:** il disturbo della sonda nel flusso non è nullo ma può essere compensato in modo notevole durante l'operazione di calibrazione; in generale per le applicazioni comuni non è un problema rilevante.
- **Liquidi:** per applicazioni in presenza di flussi liquidi si potrebbero presentare diversi problemi, fra cui la contaminazione e la necessità di diverse calibrazioni.
- **Rottura della sonda:** il filo essendo di dimensioni molto ridotte (5 μm di diametro) risulta molto fragile sia da maneggiare che per possibili particelle nel flusso che potrebbero rompere la sonda. Si necessita quindi di filtri per evitare quest'ultima problematica.

2.1.4 Caratteristiche della sonda

Per quanto riguarda le dimensioni, gli anemometri a filo caldo sono dei fili sottili in materiale metallico con un diametro, variabile in base all'applicazione, che va da 0,5 a 5 μm e una lunghezza di circa 0,1-1 mm. Il materiale utilizzato è di solito tungsteno o platino. Questo filo sottile viene poi stagnato a due supporti di lunghezza voluta.

Il filo viene quindi scaldato ad una temperatura nel range di 200-300°C.

Come accennato gli anemometri a filo caldo possono rilevare più di una componente di velocità, questo si fa mettendo molteplici fili, i quali acquisiscono la componente normale di velocità impattante ogni singolo filo.

Per la maggioranza delle applicazioni basta una sola componente di velocità, in altri casi ne serve più di una; sono abbastanza frequenti gli anemometri a X che rilevano due componenti.

2.1.5 Principi operativi

Come accennato in precedenza il principio fisico di funzionamento degli anemometri a filo caldo è il trasferimento di calore che avviene dal filo al fluido a causa di quest'ultimo, il quale attraversando il filo posto a temperatura differente, dissipa quest'ultima portando ad una variazione di resistenza o temperatura in base alla modalità operativa dell'anemometro.

Nel filo viene infatti fatta passare corrente fornendo una differenza di potenziale; successivamente a causa dell'effetto Joule l'energia viene dissipata in calore. I parametri fondamentali sono quindi la corrente che fluisce nel filo e la resistenza di quest'ultimo.

Se si assume che nel filo di resistenza R_w passi una corrente I e ai capi ci sia una tensione E , si può esprimere la potenza dissipata dal filo come:

$$P = EI = \frac{E^2}{R_w} \quad 2.1$$

Si assume la velocità U come unico contributo di dissipazione a causa della convezione forzata W .

$$W = hA_w(T_w - T) \quad 2.2$$

Dove h è il coefficiente di trasferimento di calore convettivo, A_w l'area del filo.

$$\Delta T = (T_w - T) \quad 2.3$$

Nelle applicazioni normali il valore di ΔT si aggira sui 200°C.

Si può inoltre introdurre il numero di Nusselt Nu :

$$Nu = hD/k_f \quad 2.4$$

k_f rappresenta la conduttività termica del fluido.

2. Principi e utilizzo degli anemometri a filo caldo

Il numero di Nusselt dipende da numerosi fattori, tra cui il numero di Reynolds, le proprietà del fluido, gli effetti di comprimibilità, la geometria del filo, l'overheat ratio a_T e l'angolo con cui il flusso impatta il filo.

L'overheat ratio è definito di solito in termini di resistenza come:

$$a_R = \frac{R_w - R_0}{R_0} \quad 2.5$$

$$a_T = \frac{T_w - T_0}{T_0} \quad 2.6$$

Lo stato 0 va a definire le condizioni stazionarie a condizioni ambiente.

La resistenza del filo cambia al variare della temperatura in modo lineare fino circa ai 250°C secondo la seguente equazione:

$$R_w = R_0[1 + \alpha(T_w - T_0)] \quad 2.7$$

Dove α indica il coefficiente di temperatura della resistività elettrica del materiale del filo.

$$a_R = a_T \alpha T_0 \quad 2.8$$

Dato che il numero di Nusselt dipende da variabili che sono anche dipendenti tra loro, conviene fare delle ipotesi riguardo al flusso in cui è inserita la sonda e la geometria di quest'ultima.

Si considera ad esempio un fluido incomprimibile, si trascura la convezione libera e si assume che la lunghezza del filo è molto minore del diametro, come in realtà è presente.

Allineando il filo perpendicolarmente al flusso e considerando un fluido che non cambia le sue proprietà chimiche col tempo si può affermare che il numero di Nusselt dipende solo dal numero di Reynolds e da a_T .

La velocità di raffreddamento è legata al numero di Reynolds, il quale è legato a Nu ; questo implica che il numero di Reynolds è legato al riscaldamento elettrico del filo.

Si trova quindi la legge di King:

$$E^2 = A + BU^n \quad 2.9$$

Tale legge è di fondamentale importanza per associare la tensione ai capi del filo conduttore alla velocità del flusso.

Tuttavia, bisogna considerare il fatto che le costanti A e B non sono note ma devono essere ricavate tramite una calibrazione adeguata, come in seguito trattata.

2.1.6 Modalità operative

Si può descrivere il bilancio di energia come:

$$\frac{dQ}{dT} = cm \frac{dT}{dt} = P(I, T) - W(U, T) \quad 2.10$$

Con Q viene rappresentata la capacità termica del filo, c è il calore specifico e m è la massa del filo. Q cambia al variare della differenza tra la potenza elettrica fornita al filo (P) e il calore dissipato (W). Le incognite in questo caso sono tre, U , I e T .

Per risolvere questa equazione e quindi necessario porre un fattore costante e rilevare gli altri due.

Da qui nascono due diverse modalità di utilizzo degli anemometri a filo caldo: la modalità a temperatura costante (CTA) e la modalità a corrente costante (CCA).

La modalità CTA si basa sul tenere la temperatura del filo costante in ogni condizione; ciò si fa tramite un amplificatore differenziale posto in retroazione. Quindi la corrente che il circuito elettrico deve fornire è messa in relazione alla velocità U del flusso. Inoltre, tenendo la temperatura costante si va a elidere il termine differenziale della temperatura; ciò permette di eseguire calibrazioni statiche.

Nella seconda modalità a corrente costante (CCA), viene mantenuta costante la corrente che passa nel filo e si va quindi a vedere come cambia la tensione ai capi del filo, proporzionale alla resistenza che inevitabilmente cambia al cambiare della temperatura.

Il circuito di condizionamento per la modalità CCA è molto più semplice e quindi utilizzato in passato. Tuttavia, il grande limite di questa modalità operativa è la risposta in frequenza che è decisamente più bassa della corrispettiva CTA; quest'ultima, infatti, dipende solamente dalla risposta in frequenza del circuito di feedback e non dalla costante di tempo del filo che è circa due ordini di grandezza più grande. Si ha una frequenza operativa di circa 100hz per la CCA rispetto a 50 khz della CTA.

2.2 Calibrazione anemometri a filo caldo

Nelle equazioni descritte nella sezione 2.1.5, si sono trascurati diversi fattori per trovare un'unica equazione (2.9) che lega la tensione ai capi dell'anemometro alla

2. Principi e utilizzo degli anemometri a filo caldo

velocità del fluido. È quindi necessario andare ad effettuare una calibrazione precisa che possa tenere in considerazione i fattori trascurati e le condizioni ambientali, non trascurabili, come la temperatura ambientale. Tuttavia, è importante mantenere queste condizioni ambientali costanti durante la calibrazione e nel caso si verificassero variazioni, bisogna tenerne conto in una elaborazione successiva.

Innanzitutto, bisogna settare l'overheat ratio considerando di non aumentare in modo eccessivo la temperatura per non rovinare il filo.

La calibrazione può quindi avvenire *in situ* o *ex situ*; la prima è consigliata qualora il flusso sia omogeneo e con basso livello di turbolenza perché avviene direttamente all'interno della camera nella quale si effettuano le successive rilevazioni, quindi vengono tenuti in conto gli effetti di interferenza con il supporto e altri disturbi. Qualora non fosse possibile calibrare *in situ* occorre avere un dispositivo apposito che permetta di creare un flusso laminare a più velocità.

In ogni caso è necessario avere un tubo di pitot che possa acquisire la variazione di pressione ed associare ad essa una velocità tramite l'equazione di Bernoulli:

$$U = \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} \quad 2.11$$

Considerando ρ la densità dell'aria ricavabile tramite l'equazione dei gas perfetti.

Δp è definito come la differenza tra pressione totale e pressione dinamica.

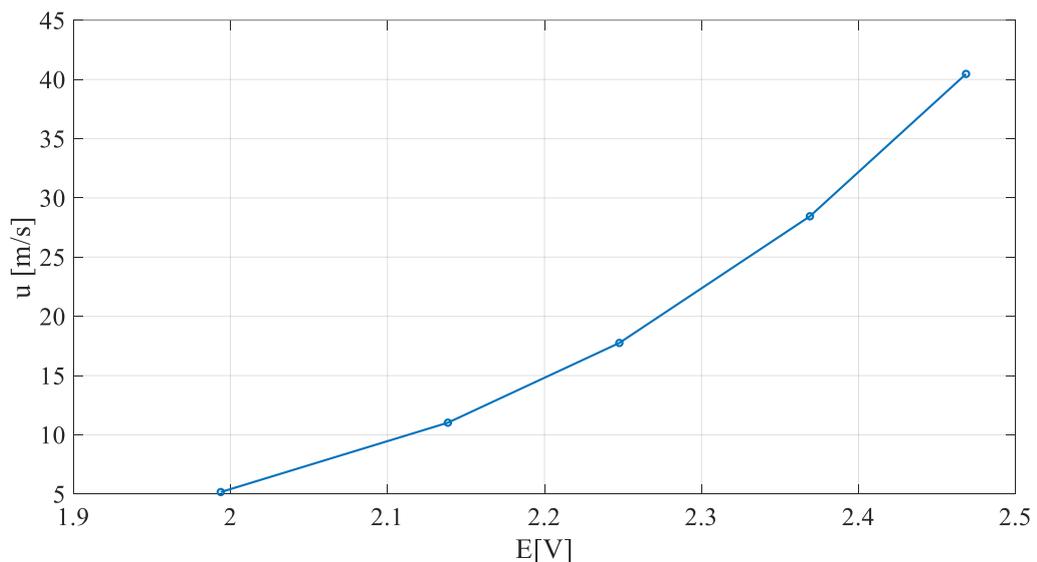


Figura 2-1 curva di calibrazione con sonda a filo singolo

2.2.1 Sonda a filo multiplo

Si possono calibrare anche sonde con più di un filo per determinare più componenti di velocità. Sono comuni le sonde a X in cui si dispongono due fili con un'inclinazione di 45° fra loro per determinare le componenti di velocità perpendicolari al piano dei fili.

Per calibrare questo tipo di sonde è necessario disporre di un sistema che possa inclinare la sonda centrata in uno stesso punto e acquisire le velocità a più inclinazioni.

Per una spiegazione più dettagliata si rimanda alla sezione 4.3.1.

2.2.2 Calibrazione della temperatura

La temperatura è un parametro fondamentale nel processo di calibrazione dato che la legge di King dipende in modo diretto dalla variazione di temperatura tra il filo e il flusso.

È importante quindi che la temperatura rimanga costante nel tempo, e qualora ciò non possa essere verificato, bisogna adottare metodologie di correzione.

Nella calibrazione *ex situ* il problema si fa più evidente perché si calibra in una condizione ambientale abbastanza diversa da quella che poi si verificherà nella galleria del vento.

Tuttavia, possono essere presenti problematiche anche in una calibrazione *in situ*, perché la dissipazione di energia a causa di molteplici fattori strettamente legati al progetto della galleria del vento, come le perdite di carico, può andare ad aumentare la temperatura in modo rilevante al variare della velocità.

È importante quindi capire quanto le variazioni di temperatura possano influire sulla accuratezza di una misura.

La relazione 2.12 fornisce un valore piuttosto preciso della tensione dell'anemometro a filo caldo corretta in base alla differenza di temperatura fra la calibrazione e l'esperimento.

$$E(T_0) = E(T) \sqrt{\frac{T_w - T_0}{T_w - T}} = E(T) \left(1 - \frac{T - T_0}{\frac{a_R}{\alpha}} \right)^{-1/2} \quad 2.12$$

Si può dimostrare che anche una differenza di un solo grado centigrado fra la temperatura di calibrazione e quella dell'esperimento può portare ad errori percentuali oltre al 3% per un filo in tungsteno; è quindi necessario cercare di correggere questo tipo di

errore che risulta essere anche quello di maggiore importanza. Ciò verrà discusso con maggiore dettaglio nella sezione 4.

3 CICLOPE E CALIBRATORE A GETTO PIANO

3.1 GALLERIA DEL VENTO CICLOPE

La galleria del vento CICLOPE si trova a Predappio, all'interno di una galleria scavata in una montagna; creata con l'obiettivo della ricerca scientifica, viene utilizzata in modo particolare per lo studio del moto turbolento ad alti numeri di Reynolds. Infatti, questa galleria chiamata anche *Long Pipe* è unica nel suo genere; è a ciclo chiuso e presenta un range di velocità subsoniche (massimo 60 m/s) con una lunghezza di 111,5m per creare il moto turbolento in modo naturale.

Lo strumento maggiormente utilizzato per la misurazione della velocità è l'anemometro a filo caldo grazie alle caratteristiche descritte nella sezione 2.1, che lo rendono uno strumento unico.

In questo caso specifico, tuttavia, non è possibile effettuare una calibrazione *in situ* senza commettere un errore intrinseco causato dalla geometria e dalle finalità per le quali questa galleria del vento è stata costruita. Avendo infatti al proprio interno un flusso turbolento, risulta impossibile rilevare una velocità di riferimento accurata tramite il tubo di pitot. Quest'ultimo infatti necessita di un flusso il più omogeneo e laminare possibile.

È stato quindi necessario provvedere il centro di ricerca di un dispositivo in grado di calibrare gli anemometri che saranno poi utilizzati nella galleria del vento principale. Per fare ciò si è creato un calibratore a getto piano di cui sarà discusso in seguito.

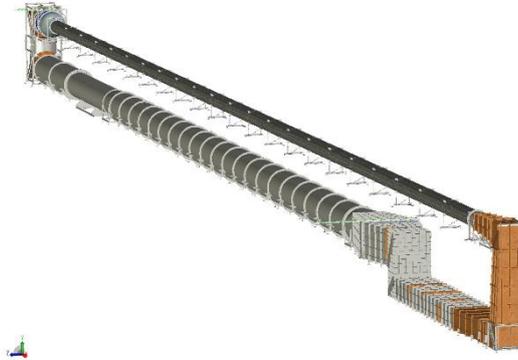


Figura 3-1 galleria del vento CICLoPE

3.2 CALIBRATORE A GETTO PIANO

Per la calibrazione degli anemometri a filo caldo (singolo o multipli), è stato creato un calibratore apposito che genera un getto piano con caratteristiche adatte per raggiungere precisioni elevate.

Dato che questo calibratore è stato costruito in modo particolare per la galleria del vento CICLoPE, si ha una velocità massima d'uscita all'imbocco di 70 m/s.

Le caratteristiche principali sono elencate di seguito:

- Potenza massima: 5,5 kW
- Altezza imbocco: 20 mm
- Lunghezza imbocco 450 mm

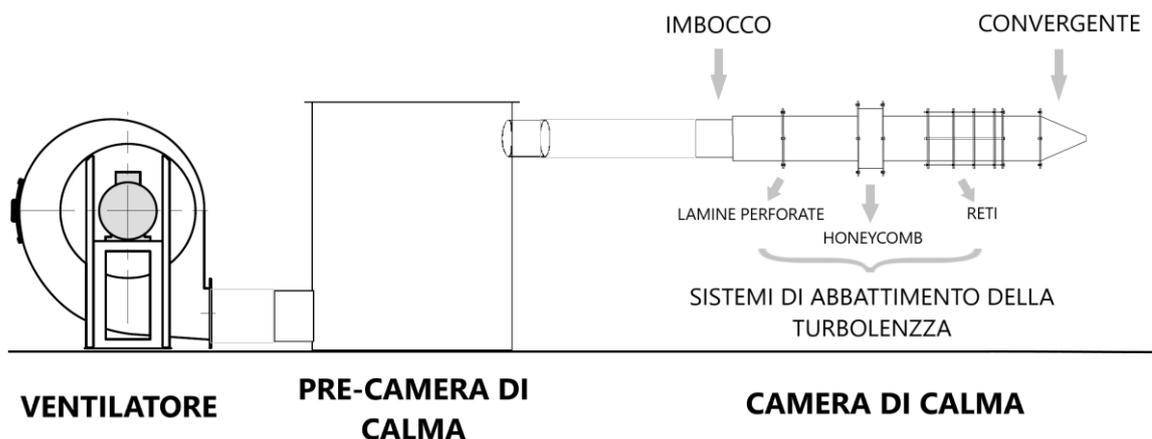


Figura 3-2 configurazione calibratore

3. Ciclope e calibratore a getto piano

Per rendere il flusso il più uniforme possibile con un basso livello di turbolenza si sono adottati dispositivi per l'abbattimento della turbolenza e un convergente finale per rendere il moto laminare e per accelerarlo.

Tali componenti necessari presentano perdite di carico che devono essere vinte da una differenza di pressione generata da un ventilatore. In questo caso si è utilizzato un ventilatore centrifugo di 5,5 KW.

Le componenti principali del calibratore sono quindi il ventilatore, una precamera di calma che permette di dissipare l'energia cinetica, un imbocco per generare il flusso piano, gli abbattitori di turbolenza e infine il convergente che porta alla camera di prova, all'esterno del calibratore. La camera di calma dove sono presenti gli abbattitori di turbolenza presenta una struttura modulare, cioè le varie reti, lamine perforate e honeycomb si possono sostituire o eliminare per fare analisi sulla turbolenza del flusso in uscita.



Figura 3-3 calibratore di anemometri a filo caldo



Figura 3-4 calibratore di anemometri a filo caldo

3.3 CARATTERISTICHE GETTO PIANO

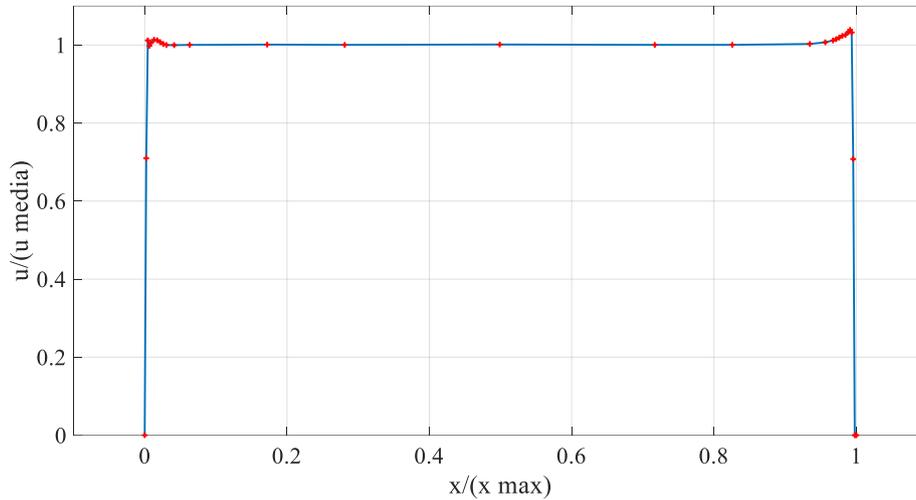


Figura 3-5 profilo orizzontale del flusso in uscita del getto piano, con la larghezza del getto e la velocità adimensionalizzate

Una delle applicazioni del getto piano è la calibrazione degli anemometri a filo caldo, grazie alla larga porzione di spazio nella quale il flusso è laminare e a velocità costante. Nella Figura 3-5 è rappresentato il profilo di velocità lungo l'apertura del getto piano; è facile notare che è presente una larga parte nella quale la velocità è costante. Questo permette di calibrare più di un anemometro alla volta con una accuratezza globale inferiore all'1%, senza considerare i bordi. In questi ultimi la velocità tende ad aumentare per la vicinanza con la parete fino a circa il 5% in più della velocità al centro, rendendo non possibile la calibrazione. Si può comunque stabilire una notevole porzione del flusso, circa 80% della ampiezza dell'imbocco, nella quale è possibile calibrare più anemometri senza variazioni superiori all'1%.

4 CALIBRAZIONE E ANALISI DELLA TEMPERATURA

Il problema di avere una temperatura costante durante la calibrazione, e inoltre una differenza non elevata fra la calibrazione e le successive misurazioni, è di fondamentale importanza. Per questo si è voluto fare una analisi dettagliata di quelle che sono le variazioni di temperatura nel calibratore a getto piano al variare della velocità.

4.1 SETUP OPERATIVO DI MISURA

Per effettuare una calibrazione di un anemometro a filo caldo è necessario rilevare la pressione dinamica (legata alla velocità tramite la legge di Bernoulli) e la tensione dell'anemometro a filo caldo.

Dato che si sta eseguendo una analisi della temperatura del flusso, si è utilizzata anche una termocoppia a fianco dell'anemometro.

In seguito verranno descritte le caratteristiche dei tre strumenti di misura.

4.1.1 Tubo di pitot

Il tubo di pitot rileva una pressione dinamica tramite un trasduttore di pressione; in questo caso si è utilizzato un BARATRON con un fondo scala di circa 13000 Pa.

Facendo una stima della pressione differenziale massima richiesta a una velocità di 60 m/s, si trova il valore di circa 2100 Pa, in linea con la scelta del trasduttore.

La risoluzione è di 0,2 Pa.

4.1.2 Anemometro a filo caldo

L'anemometro a filo caldo è condizionato tramite il dispositivo DANTEC in modalità CTA. Il filo è in tungsteno con una costante di temperatura α di $3,6 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Come overheat ratio a_T si è impostato 0,8.

Utilizzando un convertitore analogico-digitale a 16bit, si ha una risoluzione in tensione di $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ V}$.

4.1.3 Sensore di temperatura

Come sensore di temperatura si è optato per una termocoppia accoppiabile col DANTEC, avente una risoluzione di $0,1^\circ\text{C}$.

4.1.4 Sistema di Riferimento

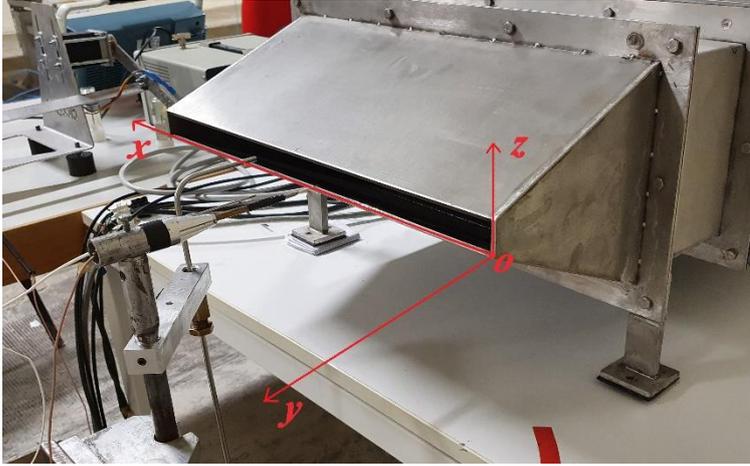


Figura 4-1 Sistema di Riferimento utilizzato per le misurazioni

Come sistema di riferimento per le misurazioni effettuate si è utilizzata una terna destra centrata come in Figura 4-1.

4.2 RISULTATI DELL'ANALISI DI TEMPERATURA

Si è effettuata una doppia analisi del comportamento della temperatura nel calibratore per anemometri a filo caldo, posizionando la termocoppia e l'anemometro a filo caldo a circa 10 mm di distanza dall'imbocco.

Come prima cosa è stato importante valutare il tempo caratteristico di stabilizzazione della temperatura al variare della velocità. Per fare ciò si è innalzata la velocità a step di 10 Hz dell'inverter del ventilatore, da 10 a 50, analizzando il tempo caratteristico di stabilizzazione della temperatura entro la risoluzione della termocoppia.

In secondo luogo, tramite gli stessi dati, si è potuto capire la variazione di temperatura nel range di utilizzo del getto piano. Questo procedimento è stato effettuato sia partendo da 10 Hz fino a 50 Hz (Figura 4-2) con il calibratore a temperatura ambiente, sia tornando indietro da 50 Hz fino a 10 Hz (Figura 4-3).

Si nota quindi che c'è circa 1°C di differenza fra la temperatura ambiente e la temperatura stabilizzata dopo essere partiti da 50 Hz fino a 10 Hz.

In generale la variazione di temperatura fra temperatura ambiente e temperatura a velocità massima si aggira sui 6°C.

L'analisi del tempo caratteristico di stabilizzazione della temperatura è presente in Figura 4-4, dove si può notare che dopo due minuti si può considerare la temperatura costante ad una data velocità.

4. Calibrazione e analisi della temperatura

La prima analisi ha messo in mostra l'impossibilità di non considerare la temperatura durante la calibrazione con l'utilizzo del calibratore a getto piano. In secondo luogo, è stata fornita un'indicazione del tempo necessario per stabilizzare la temperatura ed effettuare una calibrazione precisa per ogni velocità.

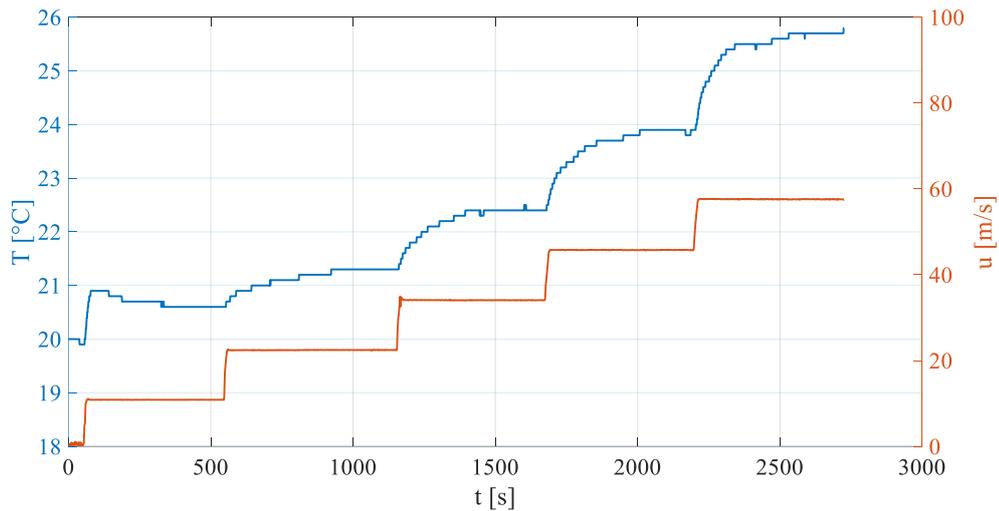


Figura 4-2 Variazione della temperatura all'imbocco al variare del tempo, con velocità d'uscita del flusso variabile a scalini ad ogni stabilizzazione della temperatura

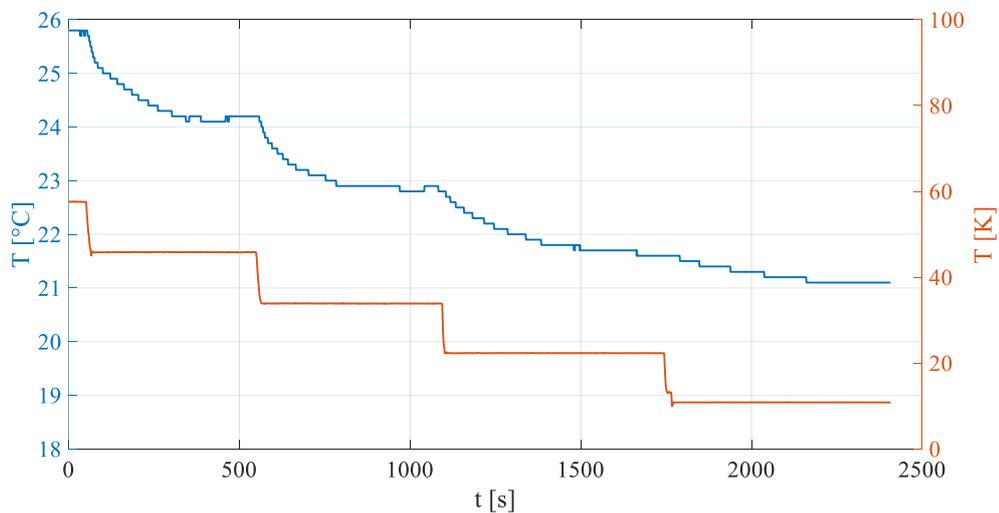


Figura 4-3 Variazione della temperatura all'imbocco al variare del tempo, con velocità d'uscita del flusso variabile a scalini ad ogni stabilizzazione della temperatura

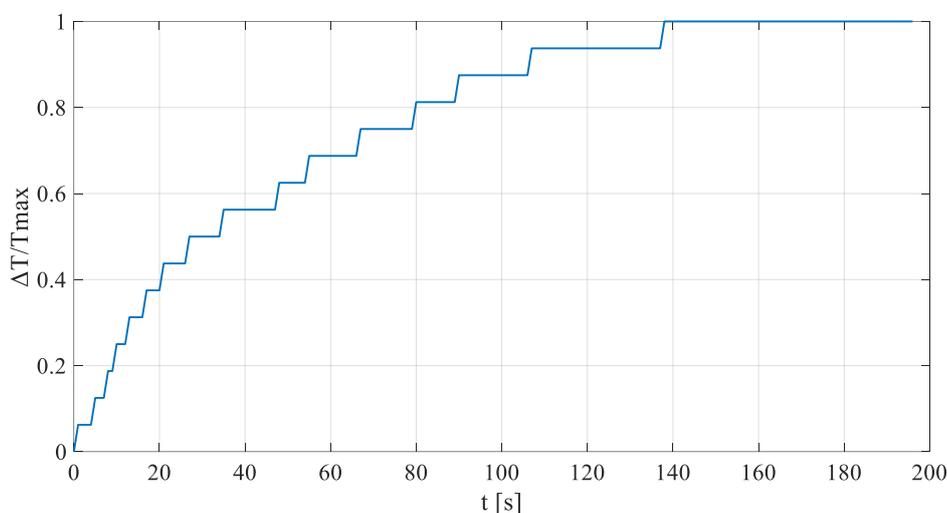


Figura 4-4 Variazione di temperatura adimensionalizzata al variare del tempo

4.3 PROCEDURA DETTAGLIATA DI CALIBRAZIONE

Come introdotto nella sezione 2.2 una calibrazione accurata dell'anemometro a filo caldo è necessaria per rilevare la velocità in modo preciso. A tal proposito è altresì necessario includere un'acquisizione della temperatura durante la calibrazione a causa delle problematiche descritte nella sezione 4.2.

In seguito verrà fornita una descrizione dettagliata della procedura di calibrazione con particolare riferimento al getto piano e alla problematica della temperatura.

Come descritto precedentemente, la calibrazione dell'anemometro associa una tensione ad una determinata velocità nota, acquisita dal tubo di pitot. Quest'ultimo, quindi, fornisce la precisione minima della calibrazione e di ogni successiva misurazione di velocità tramite anemometro a filo caldo.

Dato che la curva di interpolazione si trova tramite un polinomio di quarto grado, è necessario avere a disposizione almeno cinque punti.

Per ogni punto è importante conoscere la velocità reale acquisita dal tubo di pitot (Figura 4-6), la tensione dell'anemometro a filo caldo (Figura 4-5) e la temperatura rilevata tramite termocoppia. Quest'ultima costante nel tempo se si rispettano i tempi caratteristici descritti nella sezione 4.2 (Figura 4-4).

Tutte le variabili sono acquisite per un tempo di 30 secondi ad una frequenza di 1000 Hz, tranne la temperatura, campionata ad 1 Hz. La scelta è stata fatta in base all'errore statistico che risulta essere inferiore all'1% e alle caratteristiche specifiche dei sensori.

4. Calibrazione e analisi della temperatura

Successivamente le variabili vengono mediate nel tempo di acquisizione, in questo caso 30 secondi, e viene quindi associata una tensione ed una temperatura ad una velocità, creando due distinte curve interpolate rispettivamente con un polinomio di grado 4 e uno di grado 2.

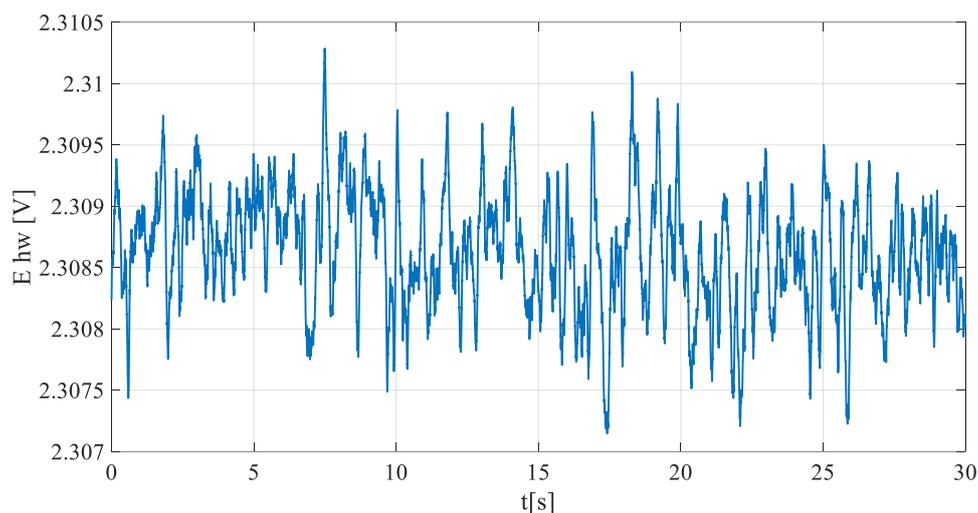


Figura 4-5 Andamento della tensione dell'anemometro filtrata con media mobile 0.1Hz al variare del tempo

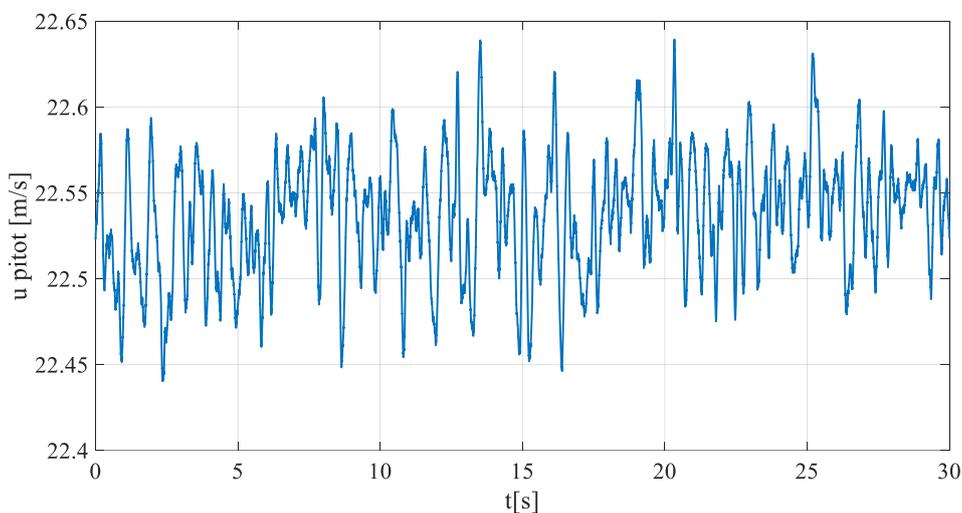


Figura 4-6 Andamento della velocità del tubo di pitot filtrata con media mobile 0.1Hz al variare del tempo

Mediando la velocità e la tensione si ottiene la curva di interpolazione come mostrato in Figura 4-7. Essendo una curva creata partendo da un polinomio e non dalla vera legge, è importante specificare che non è valida al di fuori del range di tensioni misurate. Ciò è da tenere in considerazione quando si sceglie il range di calibrazione, il

4. Calibrazione e analisi della temperatura

quale deve essere compatibile con le velocità che si andranno a rilevare in fase di sperimentazione.

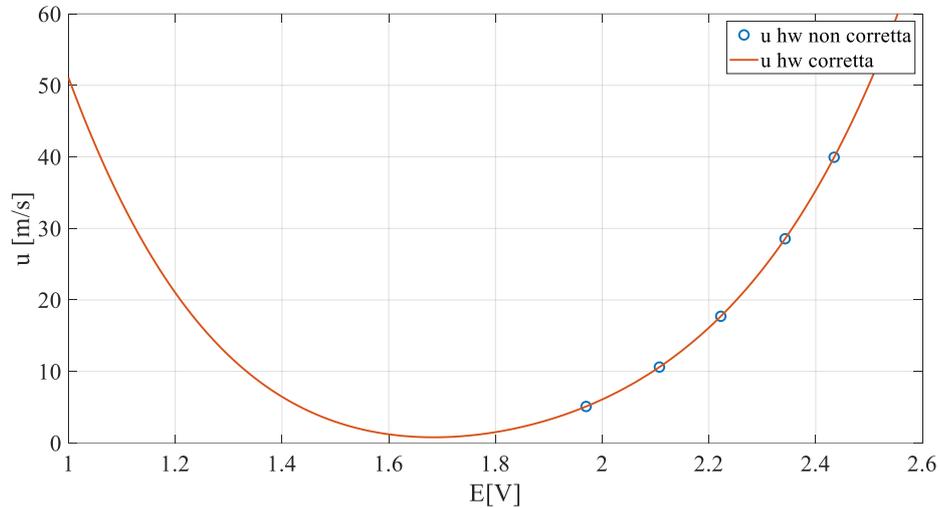


Figura 4-7 Curva di interpolazione polinomiale di quarto grado generata dai cinque punti evidenziati in blu, velocità all'imbocco in funzione della tensione corrispettiva

Per quanto riguarda la temperatura è necessaria la creazione di una curva che leghi la temperatura in uscita al getto piano con una velocità come mostrato in Figura 4-8

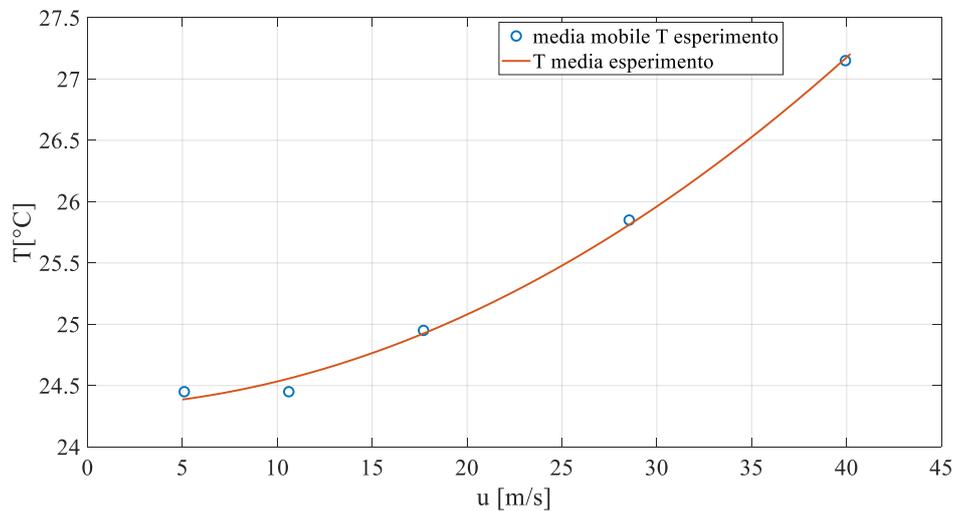


Figura 4-8 Curva di interpolazione polinomiale di secondo grado generata dai cinque punti evidenziati in blu, temperatura all'imbocco in funzione della velocità corrispettiva

4.3.1 Calibrazione X-wire

La calibrazione dell'anemometro a filo doppio segue gli stessi passaggi concettuali della calibrazione dell'anemometro a filo singolo; tuttavia, bisogna considerare il fatto che i due fili, disposti ad X devono essere calibrati anche rispetto a più angoli fra essi e il flusso. Questo procedimento porta a ricavare funzioni interpolate che forniscono le due singole componenti della velocità, una volta noto il legame di tensione fra i due fili.

Il procedimento consiste nell'acquisire punti ad inclinazioni diverse ma note, e a diverse velocità note.

Per quanto riguarda la calibrazione effettuata con il getto piano, si è utilizzato un sistema di traversing per ottenere inclinazioni sia positive che negative dell'anemometro rispetto al flusso, mantenendo la sonda centrata in un punto fisso.

Il grafico che si ottiene, rappresentato in Figura 4-9, mette in relazione le tensioni dei fili, sia all'angolo che l'anemometro assume rispetto all'imbocco, sia alle diverse velocità in uscita dal getto piano. Per facilità di lettura sono state evidenziate le frequenze dell'inverter del ventilatore, proporzionali alla velocità d'uscita del flusso dall'imbocco. Noto il fatto che il calibratore presenta delle variazioni di temperatura non trascurabili al variare della velocità e del tempo, le curve sono state corrette seguendo l'equazione 2.12. Come temperatura di riferimento si è scelto arbitrariamente 23°C; tuttavia la temperatura da riferirsi è quella dell'esperimento nel quale questo anemometro è coinvolto. È da notare il fatto che le singole curve corrette non rappresentano solo una traslazione, bensì anche una rotazione rispetto a quelle originali, dovuta al fatto che la temperatura non è costante per ogni velocità ma varia col tempo anche durante l'acquisizione dei punti a diversi angoli a velocità di uscita dell'imbocco costante.

4. Calibrazione e analisi della temperatura

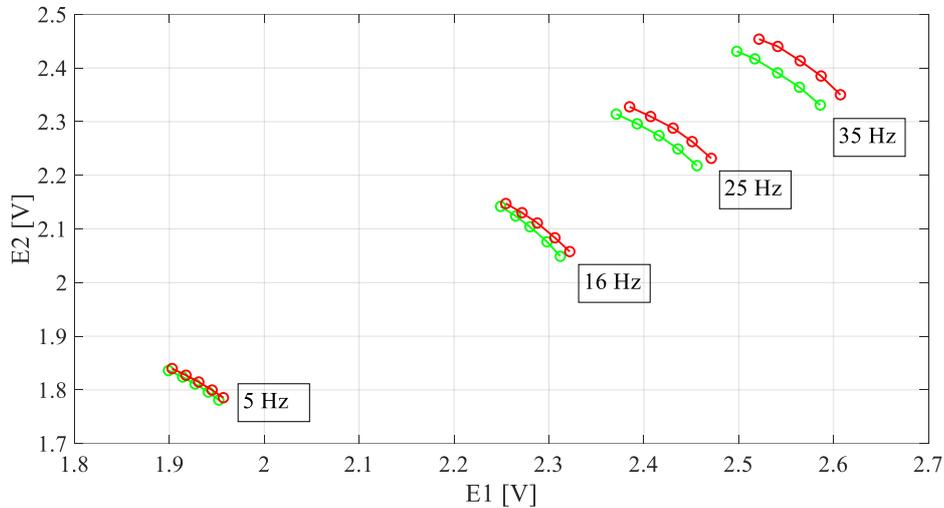


Figura 4-9 Curve di tensione dei due fili a X, da -14.4° a 14.4° , in verde le curve originali, in rosso le curve riportate ad una temperatura di riferimento, assunta in questo caso di 23°C . Sono inoltre evidenziate le frequenze dell'inverter del ventilatore, proporzionali alla velocità in uscita dal getto piano.

Successivamente è possibile creare due grafici differenti, i quali rappresentano le due componenti di velocità in relazione alle tensioni misurate da entrambi i fili immersi nel flusso. Le componenti di velocità, comunemente indicate con u e v , si ricavano sapendo la velocità totale U e l'angolo α fra questa e l'anemometro.

$$u = U \cos(\alpha) \quad 4.1$$

$$v = U \sin(\alpha) \quad 4.2$$

Quindi le due componenti possono essere anche scritte come:

$$u = f(E1, E2) \quad 4.3$$

$$v = f(E1, E2) \quad 4.4$$

4. Calibrazione e analisi della temperatura

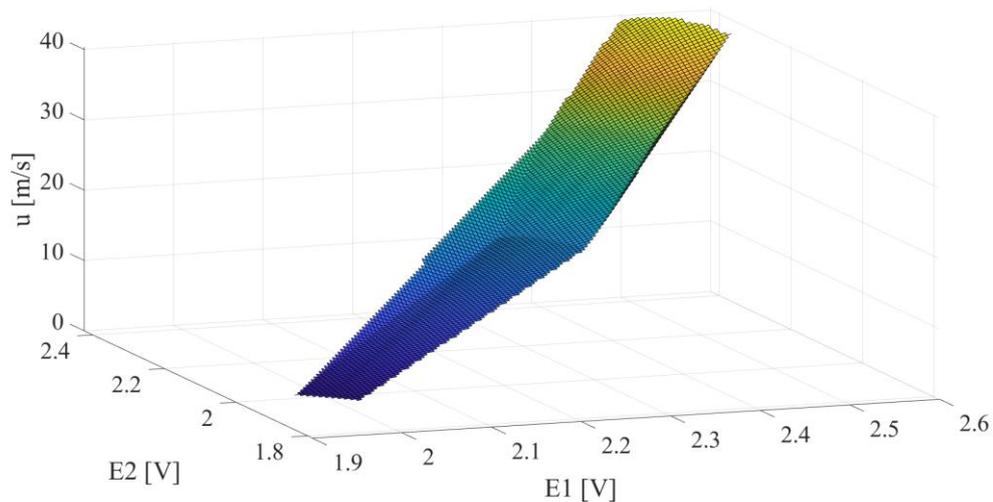


Figura 4-10 Superficie interpolata rappresentante la componente di velocità u in funzione delle due tensioni $E1$ ed $E2$

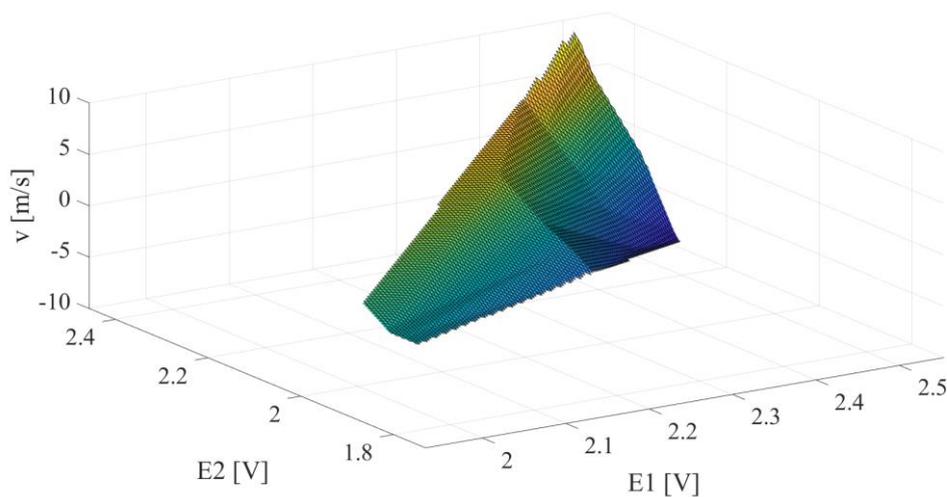


Figura 4-11 Superficie interpolata rappresentante la componente di velocità v in funzione delle due tensioni $E1$ ed $E2$

La Figura 4-10 e la Figura 4-11 rappresentano le due superfici interpolate dalle quali è possibile ricavare le componenti di velocità sapendo le tensioni dei singoli fili; infatti, per ogni coppia di valori $E1$ ed $E2$ esiste solo un valore di u e v .

Le curve sono state ricavate tramite interpolazione lineare con i valori di tensione già corretti rispetto alla temperatura di riferimento adottata (in questo caso 23°C , ma da scegliere in base alle condizioni ambientali dell'esperimento).

4.4 METODI DI CORREZIONE DELLA TEMPERATURA

Constatato il problema rilevante della variazione di temperatura al variare della velocità e del tempo, si sono sviluppati dei metodi di correzione della velocità in base alla variazione di temperatura seguendo l'equazione 2.12.

In particolare, si sono adottate due strategie, le quali seguono entrambe la stessa equazione di base (2.12) ma che differiscono in modo sostanziale per certe tipologie di applicazioni.

Si è svolta una analisi sia a temperatura dell'esperimento costante, sia a temperatura variabile, in modo da confrontare le due metodologie non solo sulla stessa applicazione, ma in previsione di esperimenti a condizioni ambientali non costanti.

In seguito vengono quindi descritti i due metodi e l'analisi comparativa fra i due.

La fase di calibrazione dell'anemometro a filo caldo e le variabili acquisite sono in comune con le due metodologie.

Durante la calibrazione è stato importante rilevare le differenti temperature per ogni punto acquisito, in modo da creare una curva di interpolazione della temperatura come quella seguente.

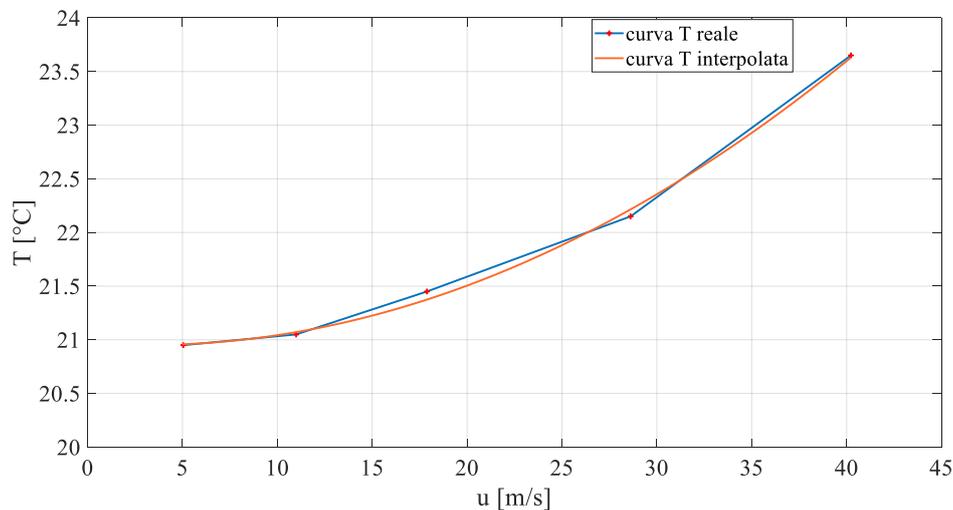


Figura 4-12 Curva di temperatura reale e interpolata durante la calibrazione

4.4.1 Primo metodo

- **Calibrazione**

Per ogni punto di calibrazione si acquisisce la velocità del pitot $U_{pitot-cal}$, la tensione E_{hw} e la temperatura T_{cal} .

Date queste variabili si può creare la curva di calibrazione che relaziona ogni velocità alla tensione dei vari punti e inoltre ci si può ricavare la curva di calibrazione della temperatura.

- **Esperimento**

Durante l'esperimento, oltre alla velocità, bisogna inevitabilmente misurare la temperatura che successivamente trova fondamentale importanza nella correzione dei valori di velocità.

- **Correzione della velocità**

Avendo entrambe le temperature, sia quella di calibrazione che quella dell'esperimento, il metodo consiste nel correggere la tensione rilevata dall'anemometro a filo caldo seguendo l'equazione 2.12, trovando come risultato la tensione corretta che verrà poi convertita in velocità tramite la stessa curva di calibrazione. Come variazione di temperatura si utilizza la differenza fra la temperatura di esperimento e quella di calibrazione associata alla velocità del tubo di pitot, ricavabile dalla curva di temperatura di calibrazione precedentemente interpolata.

4.4.2 Secondo metodo

- **Calibrazione**

Questa verrà effettuata nelle stesse modalità del primo metodo descritto nel paragrafo 4.4.1

- **Esperimento**

Anche durante l'esperimento si seguono gli stessi passaggi del paragrafo 4.4.1.

- **Correzione della velocità**

In questo caso la correzione avviene sulla curva di calibrazione $U_{pitot-cal} - E_{hw}$. Si viene quindi a creare una seconda curva di calibrazione modificando la tensione dei punti acquisiti in calibrazione seguendo sempre l'equazione 2.12. Come variazione di temperatura si utilizza la differenza fra la temperatura media dell'esperimento e la temperatura dei singoli punti acquisita durante la calibrazione.

4.4.3 Confronto fra i due metodi di correzione della velocità

Il confronto fra i due metodi è descritto nella Figura 4-13 dove si è voluto rappresentare l'andamento dell'errore relativo fra la velocità reale e corretta, al variare del ΔT . Con

4. Calibrazione e analisi della temperatura

quest'ultimo simbolo viene rappresentata la differenza di temperatura fra la condizione ambientale dell'esperimento e quella di calibrazione alla determinata velocità acquisita dal tubo di pitot. La velocità media del pitot, infatti, viene assunta come riferimento, cioè il valore più veritiero della reale velocità in uscita dal getto piano.

Dal grafico si evince che non esiste una differenza apprezzabile fra i due metodi, tuttavia sono state analizzate variazioni di temperatura contenute, entro il mezzo grado. L'errore relativo si attesta in generale abbondantemente sotto l'1%, il che porta a considerare entrambe le metodologie efficaci nella correzione di piccole variazioni di temperatura, costanti nel tempo, rispetto alla condizione di calibrazione.

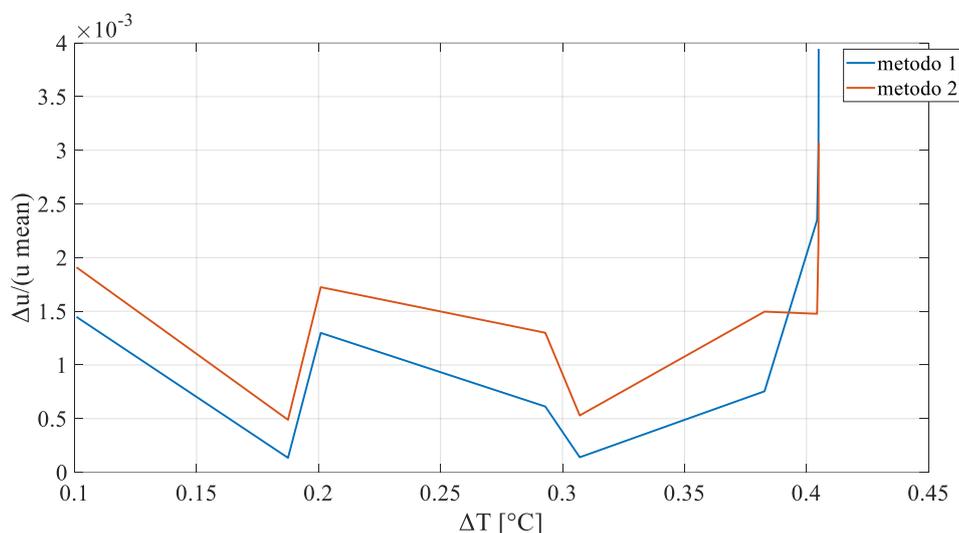


Figura 4-13 Confronto dell'andamento dell'errore relativo dei due metodi al variare della differenza di temperatura, ΔT è la variazione fra le temperatura di esperimento e quella di calibrazione riferita alla velocità media dell'esperimento, $\Delta u / (u \text{ mean})$ rappresenta l'errore relativo fra la velocità corretta e quella reale acquisita dal pitot

Nel grafico seguente (Figura 4-14) si sono analizzate le velocità ricavate dai due metodi di correzione al variare del tempo, in confronto con la velocità non corretta e quella reale; è importante notare dalla Figura 4-15 che la temperatura varia in modo notevole durante il tempo di acquisizione dei segnali. Ciò è stato fatto per verificare l'efficacia delle correzioni in presenza di temperature non costanti nel tempo. La velocità non corretta presenta un forte drift causato dall'importante variazione di temperatura.

4. Calibrazione e analisi della temperatura

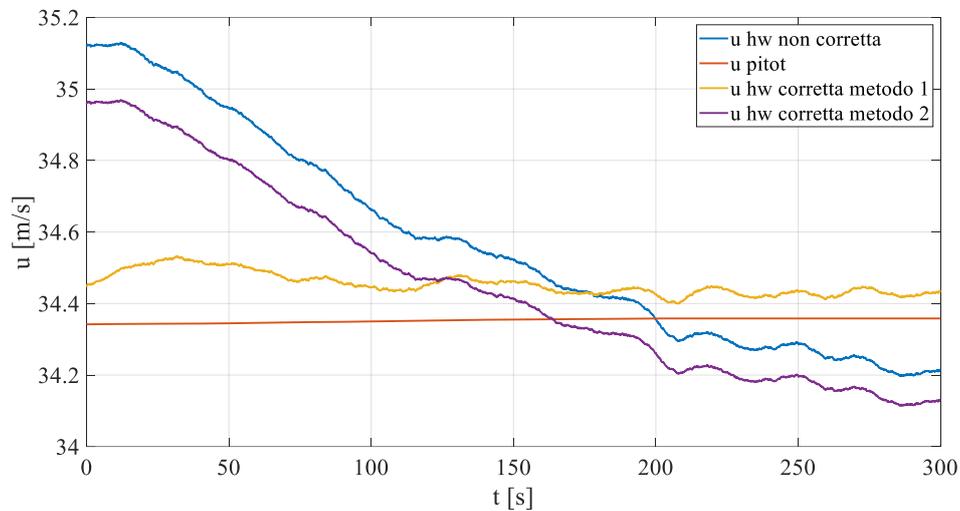


Figura 4-14 Confronto della velocità corretta dei due metodi rispetto a quella non corretta e quella reale del pitot. u_{hw} rappresenta la velocità rilevata dall'anemometro a filo caldo.

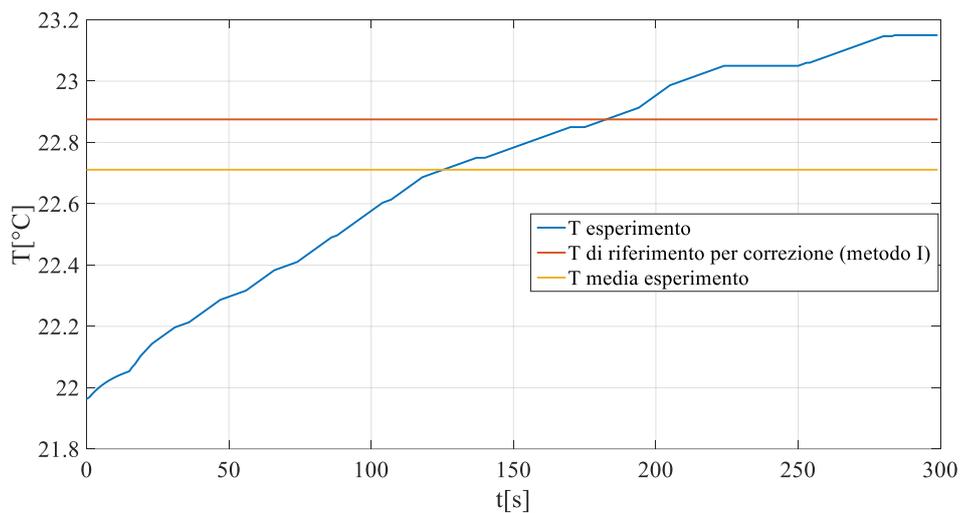


Figura 4-15 Media mobile della temperatura, temperatura media e di riferimento, riferite al confronto fra le metodologie di correzione di Figura 4-14.

Nella Figura 4-15 si nota la temperatura al variare del tempo, la temperatura media dell'esperimento e la temperatura utilizzata come riferimento per la correzione del metodo I. Quest'ultima temperatura è ricavata, come spiegato nella sezione 4.4.1, dalla curva di interpolazione della temperatura di calibrazione corrispondente alla velocità reale del pitot.

In questo caso la variazione di temperatura è molto elevata e quindi si può evidenziare il fatto che senza nessuna correzione l'errore relativo è maggiore del 2% per una

differenza di temperatura di circa 1°C . Uno scostamento così importante dimostra quanto descritto nelle sezioni 2.2.2 e 4.2 riguardo la fondamentale importanza della correzione di temperatura.

Infatti, come constatato nella sezione 3.3, il getto piano presenta una accuratezza di misura inferiore all'1%, quindi un errore superiore al 2% non è ammissibile. Oltretutto la variazione di temperatura nel range di velocità ammissibili dal calibratore a getto piano supera abbondantemente 1°C , portando facilmente l'errore relativo ad ordini di grandezza del 10%.

Dato che il secondo metodo analizzato sfrutta la temperatura media dell'esperimento, modificando direttamente la curva di velocità-tensione, qualora sia presente una variazione di temperatura col tempo durante l'acquisizione della tensione dell'anemometro, si deve fare riferimento solamente alla prima metodologia indicata nella sezione 4.4.1. Analizzando quindi l'unico metodo efficace per la correzione di temperatura variabile col tempo dell'esperimento, si nota che l'errore massimo è di circa 0,5% per differenze di temperature di circa 1°C , arrivando ad un minimo di 0,1% per scarti di temperatura più ridotti.

4.5 DETERMINAZIONE DELLA COSTANTE DI TEMPERATURA DELLA RESISTENZA DEL FILO

Considerando la formula 2.12, si può notare come la costante di temperatura della resistenza del filo α trovi una fondamentale importanza nella determinazione della tensione in base alla variazione di temperatura. Infatti, considerando l'equazione 2.7 è facile constatare come α rappresenti la costante di proporzionalità fra la resistenza e la variazione di temperatura.

Questo valore, come intuibile, è determinato in modo principale dal materiale del filo, quindi teoricamente è noto a priori. Tuttavia, è utile determinare questo coefficiente in modo sperimentale perché ogni filo presenta caratteristiche diverse che portano a piccole variazioni della costante dal valore nominale, con conseguente minore precisione sia nella determinazione della velocità, sia in una possibile correzione rispetto a una temperatura di riferimento.

Considerando la variazione di temperatura a cui il calibratore è soggetto e di cui si è discusso nella sezione 4.2, si può determinare il valore della costante α valutando le

4. Calibrazione e analisi della temperatura

tensioni acquisite dall'anemometro a filo singolo proprio sfruttando questa temperatura variabile.

Ci si è ricavati α partendo dall'equazione 2.12, avendo note sia la variazione di tensione, che di temperatura, acquisita tramite la termocoppia; dopo di che si è utilizzata una temperatura come riferimento, con la sua tensione corrispondente.

Per avere un ΔT elevato, si è acquisita la temperatura e tensione mandando al massimo la velocità d'uscita del getto. In questo modo si è avuta una apprezzabile variazione di temperatura di circa 4°C .

La curva di temperatura si è quindi interpolata tramite un esponenziale di secondo ordine, rappresentata in Figura 4-16.

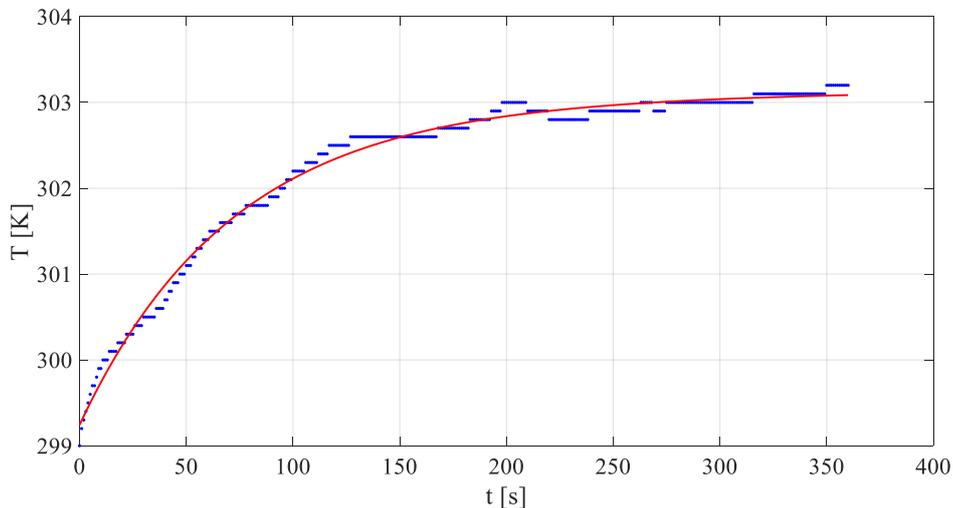


Figura 4-16 Curva della temperatura acquisita rappresentata con punti blu, curva esponenziale interpolante rappresentata con curva rossa.

La tensione dell'anemometro a filo caldo è stata acquisita a 1000 Hz, quindi è stata filtrata con media mobile a 1 Hz per eliminare il rumore ed è stata sottocampionata per portarla ad 1 Hz come la temperatura. Infine, come riferimento si sono prese la temperatura all'istante finale e la tensione associata a questo valore di temperatura.

Il filo utilizzato nell'anemometro a filo caldo è in tungsteno e presenta un α nominale di $3,6 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Il grafico risultante è rappresentato in Figura 4-17.

4. Calibrazione e analisi della temperatura

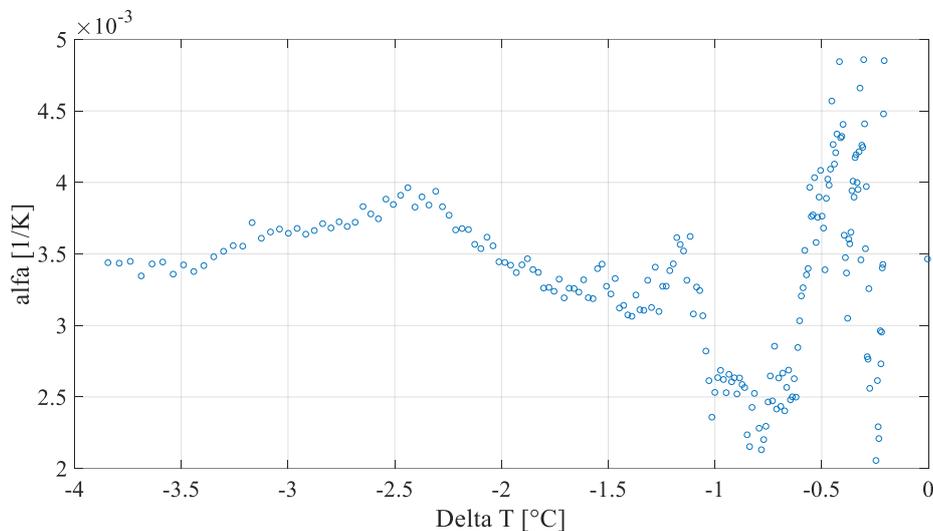


Figura 4-17 Valore di α trovato sperimentalmente al variare della variazione di temperatura rispetto a un riferimento preso nell'istante finale, dove la temperatura è pressoché costante.

Si può notare come il valore della costante α tenda ad un valore pari a circa $3.4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ per una ΔT di circa -4°C . questo valore può ritenersi veritiero data lo scostamento non troppo elevato dal valore nominale. Tuttavia, sono presenti criticità che non permettono l'individuazione del valore della costante in modo più accurato.

In particolare, la risoluzione della termocoppia è molto bassa, quindi ciò porta inevitabilmente una incertezza di misura del ΔT che si ripercuote sulla determinazione di α . Inoltre, la termocoppia presenta una propria inerzia termica non trascurabile che fornisce un'ulteriore incertezza.

Nella Figura 4-18 viene rappresentata la correzione di temperatura con il relativo grafico mostrati nella sezione 4.4.3, a cui però viene aggiunta una ulteriore correzione con il valore della costante α trovato sperimentalmente. Non si notano variazioni evidenti rispetto al valore di α nominale.

5. Conclusioni

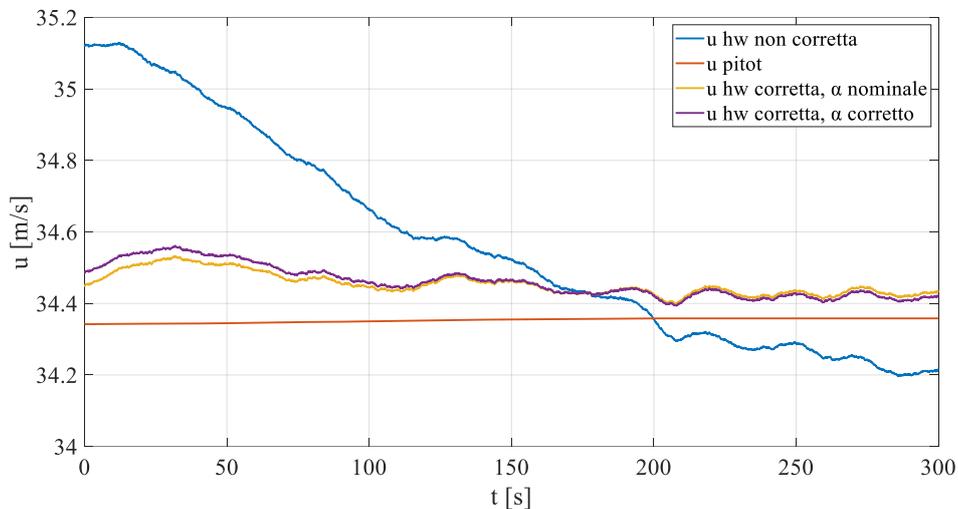


Figura 4-18 Confronto della velocità corretta dei due metodi rispetto a quella non corretta e quella reale del pitot. u hw rappresenta la velocità rilevata dall'anemometro a filo caldo. Inoltre, è rappresentata la differenza fra le due curve nel caso di α corretto e nominale.

5 CONCLUSIONI

Si è descritto il profilo di velocità del calibratore a getto piano, il quale presenta una variazione percentuale massima di velocità al di sotto dell'1%, non considerando l'effetto dei bordi. Si è quindi discussa la problematica della variazione di temperatura, sia con la velocità, circa 6°C , sia con il tempo, individuando sperimentalmente la costante di tempo del calibratore, poco meno di 60 secondi.

Sono state fornite quindi le indicazioni dettagliate per una calibrazione di anemometri sia a filo singolo che doppio a X, con la possibilità per entrambe di una correzione rispetto ad una temperatura di riferimento.

Si sono discussi due metodi per la correzione della velocità dell'anemometro a filo caldo rispetto ad una variazione di temperatura, dimostrando che sono entrambi efficaci per quanto riguarda un esperimento a temperatura costante, portando la variazione percentuale massima entro un valore accettabile dello 0,5% per ΔT di circa 1°C . Tuttavia, qualora la temperatura vari col tempo, è possibile utilizzare solamente il metodo I.

Infine, si è trovato sperimentalmente il valore della costante di temperatura associata alla resistenza del filo, evidenziando che il procedimento risulta corretto ma l'analisi

presenta troppe incertezze a causa, principalmente, della termocoppia. Quest'ultima, infatti, presenta sia una bassa risoluzione, sia un tempo di risposta che non permette una sufficiente accuratezza del valore di α . Sarebbe quindi interessante validare questi dati con un sensore di temperatura differente.

6 BIBLIOGRAFIA

Franceschelli L., *Anemometri a filo caldo: studio e progettazione di un sistema di calibrazione*, Università di Bologna, A.A. 2017-2018;

Bruun H. H., *Hot-Wire Anemometry, Principles and Signal Analysis*, Oxford University Press, 1995;

Discetti S., Ianiro A., *Experimental Aerodynamics*, CRC Press, 2017;

Matsubara M., Alfredsson P. H., Segalini A., *Linear modes in a planar turbulent jet*, J. Fluid Mech, 2020;

Lundström H., *Investigation of heat transfer from thin wires in air and a new method for temperature correction of hot-wire anemometers*, Experimental Thermal and Fluid Science, 2021;

Comte-Bellot G., *Hot-wire anemometry*, Annual Review of Fluid Mechanics, 1976.