



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE - DIN

CORSO DI LAUREA IN
INGEGNERIA AEROSPAZIALE - CLASSE L-9

SVILUPPO E IMPLEMENTAZIONE DI UN SISTEMA DI MISURA E CONTROLLO DELLA TEMPERATURA PER GALLERIA DEL VENTO LONG PIPE CICLOPE

Tesi di laurea in Aerodinamica degli Aeromobili

Relatore

Prof. Alessandro Talamelli

Presentata da

Filippo Zoli

Correlatore

Dott. Ing. Lorenzo Lazzarini

Sessione di Luglio 2025

Anno Accademico 2024/2025

Abstract

Il presente elaborato di tesi affronta il problema della misura e del controllo della temperatura in galleria del vento, con riferimento specifico al Long Pipe del laboratorio CICLoPE.

Poter monitorare e controllare attivamente il valore della temperatura all'interno della camera di prova rappresenta un requisito fondamentale per garantire l'affidabilità delle misurazioni effettuate durante le varie campagne sperimentali.

La variazione della temperatura è causata principalmente da fenomeni dissipativi legati alla presenza di attrito viscoso, generato dallo scambio di molecole tra due particelle fluide vicine nel caso di flusso laminare, che genera dissipazione di calore all'interno del sistema. È stato quindi realizzato un misuratore di temperatura portatile, in modo da poter essere utilizzato in varie sezioni del Long Pipe, con il quale sono stati eseguiti dei test per determinare da quale valore di velocità del flusso sia necessario attivare il sistema di controllo della temperatura per limitarne l'aumento in camera di prova.

Il proseguo del progetto ha poi riguardato lo sviluppo di un sistema di controllo automatico della temperatura mediante controllore PID, in grado di regolare il grado di apertura o chiusura di una valvola che regola il flusso di refrigerante verso lo scambiatore di calore. Il sistema è stato poi collaudato a diversi valori di setpoint e ha mostrato buone prestazioni in termini di stabilità e reattività, seppur con alcune limitazioni dovute alla bassa velocità della valvola a cambiare posizione.

Il lavoro dimostra la validità dell'approccio adottato, offrendo una soluzione pratica e modulare per il controllo della temperatura durante le sperimentazioni, dimostrando come sia necessario poter controllare gli andamenti termici specie quando il fluido entra in un regime di moto turbolento, dove si ha un rimescolamento dello stesso a livello particellare, causando un maggiore rilascio di calore nel sistema.

Ringraziamenti

Ci tengo a ringraziare in primis il relatore Prof. Alessandro Talamelli per la sua professionalità e disponibilità durante lo svolgimento e la stesura della tesi e per avermi dato la possibilità di svolgere questa importante e formativa esperienza presso il gruppo di ricerca del laboratorio CICLOPE. Ringrazio inoltre il correlatore, Dott. Ing. Lorenzo Lazzarini, per avermi seguito attivamente e con pazienza durante tutte le fasi del progetto, sempre disponibile a chiarire eventuali dubbi e a fornire il supporto tecnico e di conoscenze necessario.

Un ringraziamento va anche a tutti i componenti dello staff del laboratorio CICLOPE ed in particolare al Prof. Gabriele Bellani per i suggerimenti dati al fine di migliorare la realizzazione del progetto e al Dott. Lorenzo Magnani per il supporto nella risoluzione di qualche problematica in fase di programmazione.

Devo un grazie speciale ai miei genitori che durante questo ciclo di studi mi hanno sempre supportato, aiutato e spronato a fare e a dare sempre il meglio per raggiungere questo mio importante obiettivo.

Indice

1 Introduzione.....	1
2 Strumento di Misura	4
2.1 Variazione ed effetti della Temperatura	5
2.2 Misura della Temperatura.....	9
2.3 Progettazione e Sviluppo	12
2.3.1 Componenti Hardware	12
2.3.2 Software Arduino	14
2.4 Verifica e Sperimentazione	16
3 Controllo Automatizzato della Temperatura.....	24
3.1 Controlli Automatici e Retroazione	25
3.2 Controllori PID.....	29
3.3 Sistema di Raffreddamento.....	32
3.4 Progettazione e Sviluppo	34
3.4.1 Componenti Hardware	34
3.4.2 Software Arduino	36
3.4.3 Software MatLab	37
3.5 Verifica Funzionamento e Calibrazione.....	39
4 Conclusioni e Sviluppi Futuri.....	50
5 Elenco delle Figure	52
6 Elenco delle Tabelle.....	56
7 Bibliografia	57

1 Introduzione

Il progetto di tesi si inserisce nell'ambito delle attività del laboratorio di Aerodinamica Applicata rivolte alla misura delle forze aerodinamiche e della fisica dello strato limite, in particolare nasce con lo scopo di voler verificare l'andamento della temperatura del flusso dell'aria all'interno della galleria del vento a ciclo chiuso (closed-loop) Long Pipe del laboratorio CICLoPE, acronimo di "Centre for International Cooperation in Long Pipe Experiments", con l'obiettivo finale di implementare un sistema di controllo automatico della temperatura in grado di interfacciarsi con l'impianto di raffreddamento del flusso dell'aria della galleria del vento già installato al laboratorio.

Il laboratorio CICLoPE si trova all'interno delle gallerie dell'ex Industria Aeronautica Caproni di Predappio, la quale si occupava principalmente della costruzione di aeromobili da combattimento per l'aeronautica militare italiana prima e durante il periodo della seconda guerra mondiale. Proprio durante il periodo bellico, per proteggere la produzione dai bombardamenti delle forze alleate, vennero costruite due gallerie, lunghe 130m e con un diametro di circa 9m, all'interno della montagna collegate tra di loro da gallerie laterali più piccole. Questo sito si presta alla realizzazione di questo tipo di laboratori in quanto il fatto che risieda all'interno della montagna ed in un comune a bassa densità abitativa permette di ridurre al minimo le interferenze esterne come: rumore, vibrazioni ed interferenze elettromagnetiche, che potrebbero influire negativamente sui risultati sperimentali.

Il laboratorio è nato con l'obiettivo di offrire un ambiente specializzato per lo studio dei moti turbolenti che sono la principale causa di fenomeni di resistenza aerodinamica di maggiore intensità. Le attività che si svolgono presso il laboratorio prevedono quindi lo studio di questi moti per trovare soluzioni innovative per la riduzione del fenomeno di resistenza che, per esempio, in ambito aeronautico significherebbe una riduzione dei consumi di carburante e quindi riduzione dei costi operativi di un aeromobile. L'infrastruttura principale presente all'interno di una delle due gallerie è appunto il Long Pipe (Fig. 1.1): una galleria del vento di tipo "closed-loop", la cui parte principale consiste di un tubo, formato da elementi modulari, di fibra di carbonio; per una lunghezza totale di 111.5 m ed un diametro interno di 90 cm. L'aria all'interno della galleria del vento è messa in movimento da ventilatori coassiali con una potenza di 400 kW, che consentono di raggiungere una velocità del flusso dell'aria fino a 60 m/s, meccanicamente isolati dal resto del sistema per evitare l'eventuale propagazione di vibrazioni.

Per poter effettuare vari tipi di misurazioni in flusso turbolento, la strumentazione necessaria deve essere affidabile e deve inoltre essere garantito anche un ambiente di prova il più possibile controllato per avere una buona risoluzione e precisione dei dati ottenuti. La tipologia di galleria “closed-loop” consente di poter controllare in maniera accurata le caratteristiche del flusso, soprattutto in termini di velocità, temperatura ed umidità. In particolare, nei test condotti all’interno delle gallerie del vento a ciclo chiuso la temperatura dell’aria rappresenta una variabile importante che può influenzare in maniera significativa i risultati delle varie prove sperimentali. Variazioni anche modeste di questo parametro, dovute principalmente a fenomeni di attrito viscoso e attrito con le pareti della galleria che causano un aumento della temperatura dovuto a fenomeni di dissipazione termica, possono alterare proprietà fondamentali del flusso come la densità, la pressione e la viscosità con ripercussioni dirette sul comportamento del flusso e quindi sulla buona riuscita degli esperimenti.

La temperatura influisce anche sulla misurazione della velocità del flusso (misure di anemometria) effettuate sia tramite l’uso di tubi di Pitot, che si basano sulla misura della pressione, che tramite l’utilizzo di anemometri a filo caldo che sfruttano invece la misura del calore trasferito al flusso d’aria ricircolante della galleria per ottenere una misura di velocità. Questi ultimi, grazie alla loro elevata sensibilità e precisione sono i più utilizzati nell’ambito delle misure in flussi turbolenti, ma per un loro corretto utilizzo necessitano di un processo di calibrazione che avviene ad una determinata temperatura del flusso. Se quest’ultima dovesse variare porta ad errori nelle misure anemometriche per la cui analisi, in una successiva fase di elaborazione dati, si rende necessario l’utilizzo di un termine correttivo diminuendo di conseguenza la precisione del dato ottenuto.

In questo contesto, nasce quindi la necessità di sviluppare un sistema in grado non solo di misurare accuratamente la temperatura del flusso all’interno del Long Pipe, ma anche di controllarla in maniera automatica per mantenerla stabile e costante nel tempo.

Il progetto di tesi si compone di due parti principali che integrano aspetti teorici e pratici degli effetti, della misura e del controllo della temperatura.

Nella prima parte viene progettato e realizzato uno strumento di misura della temperatura portatile, basato su piattaforma Arduino cui è stata collegata una sonda PT100 per la misura della temperatura del flusso dell’aria all’interno del Long Pipe, un sensore per la rilevazione dei parametri ambientali ed un modulo SD per il salvataggio dei dati. Il sistema finale assemblato, all’interno di un contenitore appositamente progettato, è stato poi testato in diverse sezioni della galleria per verificarne il corretto funzionamento ed infine è stato utilizzato per valutare l’andamento della temperatura

a parete all'interno della camera di prova (test section), zona in cui si vuole la massima stabilità della temperatura poiché è qui che vengono effettuati i vari esperimenti, a diversi regimi di rotazione dei ventilatori e quindi di velocità del flusso per verificare da quale regime è necessario un controllo attivo della temperatura.

La seconda parte del progetto si focalizza sullo sviluppo ed implementazione di un sistema di controllo automatico della temperatura che agisce su una valvola in grado di regolare il flusso di fluido refrigerante verso lo scambiatore di calore inserito nel loop della galleria del vento. Il sistema realizzato si basa su un controllore PID (Proporzionale, Integrativo, Derivativo) inserito in un circuito di controllo in retroazione, che effettua rilevazioni della temperatura a parete tramite sonda PT100, per regolare la temperatura ad un valore preimpostato. Il dispositivo creato è stato poi testato e calibrato, scegliendo valori opportuni per le tre costanti che caratterizzano i sistemi PID, analizzando le prestazioni del sistema in termini di precisione, stabilità e tempi di risposta grazie anche ad un'interfaccia grafica sviluppata con MatLab per poter visualizzare l'andamento della temperatura in tempo reale.

In sintesi, questo progetto di tesi fornisce un contributo concreto alla strumentazione per la sperimentazione aerodinamica, proponendo una soluzione tecnica capace di migliorare la qualità e affidabilità delle sperimentazioni nel Long Pipe CICLoPE.

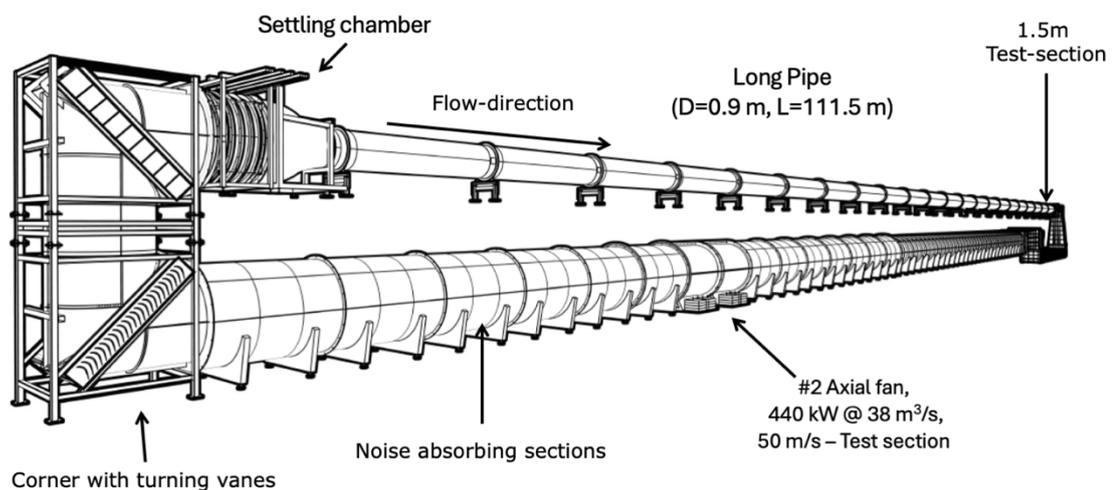


Fig. 1.1: schema 3D del circuito "closed-loop" del Long Pipe CICLoPE

2 STRUMENTO DI MISURA

2.1 Variazione ed effetti della Temperatura

Nel contesto delle sperimentazioni aerodinamiche in galleria del vento specie per la tipologia a ciclo chiuso (closed-loop), come nel caso del Long Pipe presente al laboratorio CICLoPE di Predappio, poter rilevare e controllare la temperatura dell'aria ricircolante costituiscono due azioni fondamentali che incidono direttamente sulla precisione e ripetibilità dei vari test sperimentali da eseguire.

La variazione della temperatura, specie il suo aumento, può diventare particolarmente evidente durante le sessioni di funzionamento ad alte velocità del flusso d'aria all'interno della condotta a causa della presenza dell'attrito, sottoforma di attrito viscoso e attrito con le pareti, che genera quindi dei fenomeni dissipativi ed inoltre, anche se in forma minore, l'innalzamento della temperatura è dovuto anche ai motori dei ventilatori che trasferiscono anch'essi calore all'intero sistema.

Per quanto concerne l'attrito viscoso, si considerino due particelle (si ricorda che una particella è un sistema termodinamico aperto in grado di scambiare molecole) che si muovono l'una sopra l'altra a velocità diverse; quello che si può notare è che la particella lenta tenderà a rallentare la particella veloce, mentre quella veloce tenderà ad accelerare quella lenta. Questo accade poiché si verifica uno scambio di quantità di moto attraverso uno scambio di molecole tra le due particelle che fa sì che la velocità delle due particelle tenda ad omogeneizzarsi. Questa variazione di quantità di moto genera degli sforzi di taglio chiamati sforzi viscosi con direzione tangenziale a quella del moto e rappresentano di fatto quella che è la naturale tendenza del fluido allo scorrimento. Gli sforzi viscosi sono definiti tramite la seguente legge: $\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$; dove μ rappresenta il coefficiente di viscosità dinamica e $\frac{\partial u}{\partial y}$ rappresenta il gradiente di velocità nella direzione y , considerata come quella direzione normale a quella del moto.

Definendo ora il numero di Reynolds come il rapporto tra le forze di inerzia e le forze viscosi: $Re = \frac{\rho UL}{\mu}$; dove ρ è la densità del fluido, U è la velocità del fluido nella direzione del moto, L è una lunghezza caratteristica del corpo (nel caso del Long Pipe del laboratorio CICLoPE è il diametro). Questo numero è in grado di indicare se il fluido si trova in regime di moto laminare o turbolento.

La galleria del vento in esame è nata con lo scopo di voler effettuare degli studi sulla turbolenza; pertanto si opera spesso in regime di moto turbolento e quindi a numeri di Reynolds elevati.

Il moto turbolento presenta alcune caratteristiche principali:

- è caotico ed imprevedibile;
- è vorticoso;
- è tridimensionale;
- presenta appunto numeri di Reynolds elevati.

Tra gli effetti generati dal moto turbolento quello che interessa maggiormente la variazione della temperatura è l'aumento dell'azione di diffusività. Il processo di scambio di quantità di moto descritto in precedenza ora non avviene più attraverso uno scambio di molecole, ma si ha un rimescolamento a livello particellare. Si avrà quindi un aumento della velocità a parete con un conseguente aumento degli sforzi viscosi, dell'attrito e dei fenomeni dissipativi con un conseguente aumento del coefficiente di attrito c_f .

Per trovare una relazione tra il coefficiente di attrito ed il numero di Reynolds si sfrutta dapprima il sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali di Prandtl per la lastra piana ad incidenza nulla, ottenuto dal sistema originario ponendo il termine $\frac{\partial p}{\partial x} = 0$ nella seconda equazione, in modo da semplificare il sistema per poter trovare una soluzione (Fig. 2.1.1):

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \\ \frac{u\partial u}{\partial x} + \frac{v\partial u}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \end{cases}$$

Fig. 2.1.1: sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali di Prandtl per lastra piana ad incidenza nulla

dove $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ è la viscosità cinematica. Si definiscono ora $c_f = \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho U^2}$ ed il coefficiente di attrito globale $c_F = \frac{f}{\frac{1}{2}\rho U^2 L}$ dove $f = \int_0^L \tau dx$ è la forza di attrito globale e L la lunghezza della lastra piana. In regime di moto turbolento l'analisi non si può effettuare soltanto con metodi numerici, ma bisogna usare metodi euristici ovvero metodi che combinano operazioni di calcolo con risultati sperimentali.

Si ottengono quindi le seguenti due relazioni: $c_f = \frac{0.0592}{\sqrt[5]{Re_x}}$ e $c_F = \frac{0.072}{\sqrt[5]{Re_L}}$

La relazione tra il coefficiente di attrito globale ed il numero di Reynolds è normalmente rappresentata, come dal grafico sottostante (Fig. 2.1.1), con un diagramma in scala doppio logaritmica:

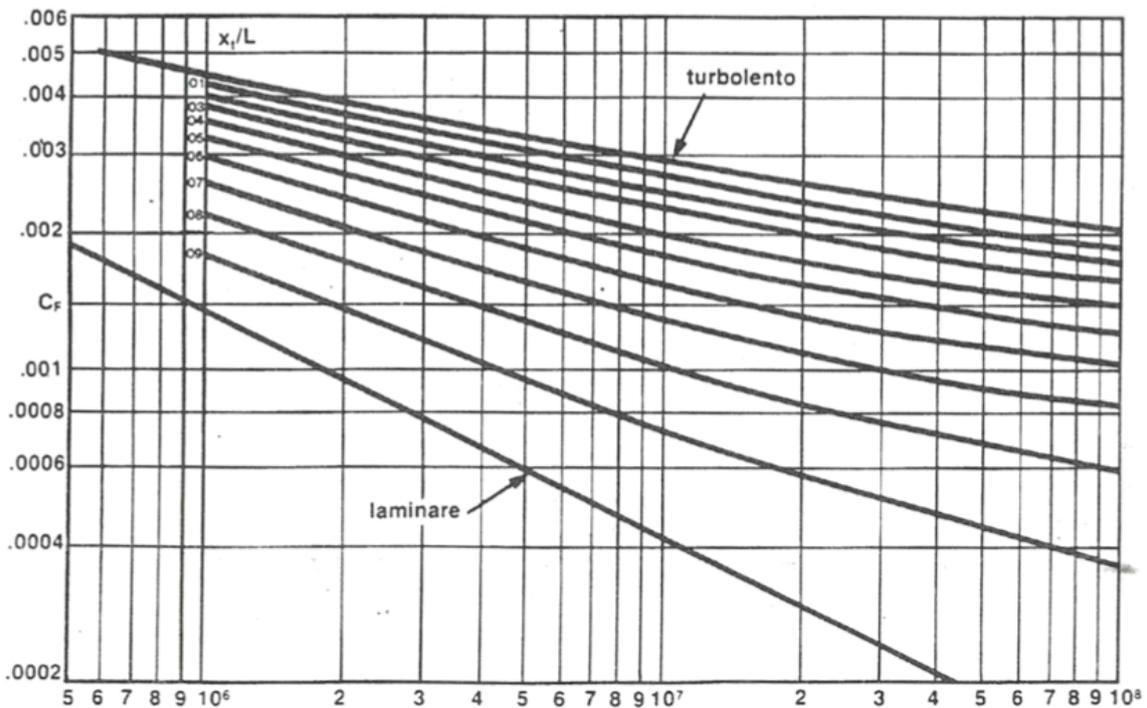


Fig. 2.1.2: grafico in scala doppio logaritmica che illustra la relazione tra il coefficiente di attrito globale C_F (asse y) col numero di Reynolds (asse x)

Gli effetti della variazione di temperatura li possiamo anzitutto notare nel coefficiente di viscosità dinamica μ il quale è direttamente proporzionale alla radice quadrata della temperatura: $\mu = \mu(\sqrt{T})$. Questo implica che una variazione della temperatura ha un effetto diretto sugli sforzi viscosi tra le particelle fluide; non solo dovuto ad una variazione della viscosità, ma anche ad una maggiore agitazione termica delle molecole che intensifica lo scambio molecolare tra le particelle o il rimescolamento particellare in caso di regime di moto turbolento.

Inoltre la temperatura, attraverso la legge dei gas perfetti, va ad influire a seconda di quale sia l'incognita su altri due parametri: pressione e densità del fluido. Si consideri per esempio la legge dei gas perfetti espressa nella seguente forma: $P = \rho \cdot Ra \cdot T$, dove P è la pressione ρ è la densità, $Ra = 287,05$ è la costante dei gas specifica per l'aria e T è la temperatura; si può quindi notare la relazione di proporzionalità diretta tra temperatura e pressione.

Un altro aspetto che è influenzato dalla temperatura in galleria del vento riguarda le misure di anemometria quindi misurazioni di velocità. Esistono essenzialmente due modalità principali con cui rilevare la velocità del flusso: tramite tubo di Pitot che sfrutta misure di pressione oppure con anemometri a filo caldo ("Hot Wire Anemometers") che sfruttano invece la trasmissione del calore.

Nell'ambito degli studi sulla turbolenza l'anemometro a filo caldo risulta essere la scelta migliore in quanto permette di poter rilevare fenomeni particolari come, per esempio, la transizione del flusso da laminare a turbolento.

Il principio alla base del funzionamento di questi anemometri è quello della trasmissione del calore per convezione da un elemento riscaldato elettricamente al fluido in moto in cui è immerso l'anemometro. In genere l'elemento riscaldato (ad una temperatura più alta di quella del fluido in cui è immerso) è un filo sottile dell'ordine di pochi micron generalmente in tungsteno, che viene raffreddato dall'aria della galleria e cede calore al sistema in cui si trova in maniera proporzionale alla velocità del flusso. Per calcolare quindi la quantità di calore ceduta al fluido, il metodo oggi più utilizzato è quello di misurare l'azione necessaria a mantenere il filo ad una temperatura costante. Per un corretto funzionamento gli anemometri a filo caldo necessitano di una calibrazione che avviene ad una determinata temperatura; perciò una variazione della temperatura del flusso dell'aria rispetto a quella rilevata in fase di calibrazione, può portare ad errori nelle misurazioni anemometriche e sarebbe quindi richiesto l'uso di termini correttivi durante la fase di elaborazione dei dati sperimentali.

2.2 Misura della Temperatura

La possibilità di poter misurare la temperatura è una essenzialità nell'automazione ed in tutte le macchine di interesse tecnico, infatti tutti i processi di generazione e trasformazione dell'energia producono calore andando così ad influenzare un processo o il funzionamento stesso di una macchina. Si può affermare in maniera empirica che la temperatura di un corpo o di un fluido è la caratteristica che ne determina la sensazione di caldo o freddo, ma in maniera più precisa la temperatura definisce il grado di agitazione termica di un corpo. Quando due oggetti, per esempio un sensore ed il corpo di cui si vuole conoscere la temperatura, vengono posti in contatto l'oggetto a temperatura più elevata si raffredda e quello a temperatura più bassa si riscalda fino a quando i due oggetti non raggiungono l'equilibrio termico e quindi cessa lo scambio di calore.

Lo scambio di calore avviene in tre modi distinti:

- CONDUZIONE: sfrutta il contatto fisico tra i corpi e ne risulta che la potenza termica è direttamente proporzionale alla differenza di temperatura tra i due corpi, all'area della superficie ed alla conducibilità termica: $\frac{dQ}{dt} = \Delta T A \sigma$
- CONVEZIONE: sfrutta un fluido intermedio per trasportare il calore e può essere naturale o forzata; in questo caso la potenza termica risulta essere direttamente proporzionale alla differenza di temperatura tra i due corpi, all'area e ad un coefficiente convettivo che a sua volta dipende dal calore specifico, viscosità e velocità del fluido: $\frac{dQ}{dt} = \Delta T A \alpha$
- IRRAGGIAMENTO: sfrutta le vibrazioni di atomi e molecole dovute alla loro energia cinetica dipendente dalla temperatura, queste vibrazioni generano un campo elettromagnetico in grado di irradiare una potenza termica che dipende dall'emissività dell'oggetto.

Per ottenere una misura della temperatura è necessario l'inserimento di un sensore all'interno del sistema da misurare, introducendo in questo modo un "effetto di carico" in quanto si va a prelevare parte del calore dal sistema. Nella scelta del sensore bisogna quindi fare attenzione a questo fattore al fine di influire il meno possibile sul naturale svolgimento del processo. Per fare in modo che ciò avvenga ed avere quindi una misura precisa della temperatura il sensore deve possedere una capacità termica, ovvero la quantità di calore che può immagazzinare sottoforma di energia termica, minore della capacità termica del corpo di cui si vuole conoscere la temperatura.

Per effettuare le misurazioni di temperatura si utilizzano dei dispositivi (sensori) in grado di convertire il valore della temperatura in segnale elettrico, di cui si riporta l'andamento della variabile caratteristica in Fig. 2.2.1. Tra le principali tipologie di sensori troviamo:

- **TERMOCOPPIE:** Le termocoppie sono generalmente utilizzate per applicazioni ad alta temperatura (tra i 270 ed i 2500°C), hanno un design relativamente semplice costituito di due materiali conduttori dissimili saldati insieme in due punti chiamati zone di giunzione, che verranno poi poste a temperature diverse. La giunzione alla temperatura incognita viene chiamata giunzione calda mentre quella alla temperatura di riferimento viene chiamata giunzione fredda.

Il loro funzionamento si basa sull'effetto Seebeck, un effetto termoelettrico che comporta che in un circuito costituito appunto da materiali metallici diversi, che quando è alimentato per poter effettuare misurazioni permette il generarsi di un diverso potenziale elettrico tra le due zone di giunzione. Il valore della differenza di potenziale generata è dell'ordine dei microvolt.

Il problema delle termocoppie è che non sono sensori molto accurati e precisi in quanto presa in considerazione la legge che governa la differenza di potenziale $e = \alpha (T_1 - T_2)$, dove e è la differenza di potenziale, α è il coefficiente di Seebeck e T_1 e T_2 sono le temperature delle due giunzioni con $T_1 > T_2$, α dipende dai due materiali e non è costante con la temperatura, pertanto varia con essa. Quindi soltanto per piccole variazioni di temperatura la tensione sarà lineare con la temperatura rendendo quindi necessaria una linearizzazione a posteriori. Un altro problema delle termocoppie è che sono soggette a deriva ovvero la loro precisione si degrada nel tempo.

- **SENSORI A VARIAZIONE DI RESISTENZA (RTD):** sono sensori costituiti da un filamento di un unico metallo, tipicamente platino (denominati PT), e la misura della temperatura viene effettuata attraverso la misurazione della variazione di resistenza elettrica del sensore che è una funzione della temperatura. Gli RTD sono generalmente i più utilizzati in ambito industriale grazie alla loro capacità di operare a temperature comprese tra -200°C e +800°C e sono inoltre stabili, precisi ed hanno una buona sensibilità. Per i sensori al platino la relazione che correla la resistenza con la temperatura è l'equazione di Callendar e Van Dusen: $R = R_0[1 + A\theta + B\theta^2 + C(\theta - 100)\theta^3]$ dove A, B e C sono delle costanti dipendenti dal materiale che per il platino valgono: $A = 3,91 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $B = -0,588 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-2}$ e $C = -0.418 \cdot 10^{-12} \text{ }^\circ\text{C}^{-4}$ se $T < 0^\circ\text{C}$ altrimenti $C = 0$ per $T > 0^\circ\text{C}$; R_0 è la resistenza a 0°C (100 ohm nel caso di PT100) e θ è la temperatura misurata.

Quindi per l'intervallo di temperatura compreso tra 0°C e 630°C l'equazione si può semplificare alla sola equazione di Callendar: $R = R_0[1 + A\theta + B\theta^2]$.

A seconda della precisione richiesta nella misurazione il collegamento del sensore RTD all'apparato di misurazione può essere effettuato in tre modi distinti: a due, tre e quattro fili.

Il collegamento a due fili risulta essere il meno preciso ed utilizzato solo con cavi di collegamento ridotti poiché la resistenza misurata sarà la somma tra quella dell'elemento sensibile e quella dei cavi (si ricorda che la resistenza di un cavo è proporzionale alla sua lunghezza). Il collegamento a tre fili è il più utilizzato in ambito industriale per ridurre gli errori provocati dalla resistenza dei cavi di collegamento. La migliore precisione si raggiunge col collegamento a quattro fili dove due si occupano di alimentare il sensore e sugli altri due fili si andrà poi a misurare la caduta di tensione che dipende unicamente dalla resistenza dell'elemento resistivo. Questo tipo di collegamento è maggiormente utilizzato in ambito laboratoriale.

- **TERMISTORI:** sono un caso particolare dei sensori RTD dove l'elemento di misura è costituito da materiale semiconduttore, come ossidi di nichel, manganese o cobalto, la cui resistenza varia con la temperatura secondo leggi specifiche per ciascun termistore. Presentano una rapida risposta alle variazioni di temperatura risultando quindi più sensibili rispetto agli RTD ed il loro campo di operatività va da -150°C a +750°C. Nei termistori il valore di resistenza non varia linearmente con la temperatura, ma esponenzialmente e questo li rende quindi molto sensibili ed in grado di rilevare variazioni di temperatura molto velocemente. Tuttavia la non linearità rende necessaria una complessa calibrazione del sensore per poter avere misure accurate, ma così facendo si riduce l'intervallo di temperature misurabili con la necessaria precisione. La relazione che lega la resistenza con la temperatura è una equazione esponenziale

del tipo: $R = R_0 e^{\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})}$;

dove R_0 è la resistenza alla temperatura T_0 in genere settata a 25°C.

Questi sensori trovano principalmente impiego in termostati ed elettronica di consumo.

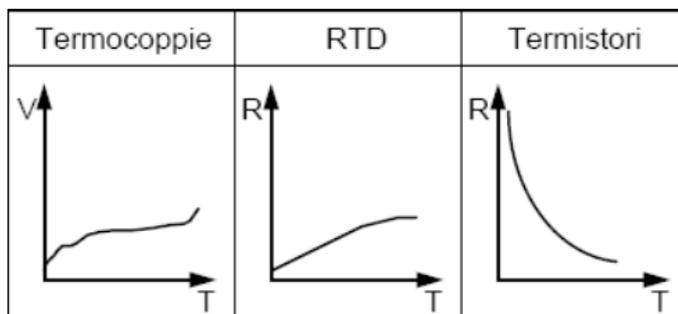


Fig. 2.2.1: comparativa tra gli andamenti della variabile caratteristica in funzione della temperatura dei tre sensori analizzati

2.3 Progettazione e Sviluppo

Nella seguente sezione si procede alla presentazione dello strumento di misura realizzato per poter rilevare la temperatura ed altri parametri all'interno del laboratorio CICLoPE ed in diverse sezioni del LongPipe. Pertanto si fornisce una descrizione delle principali componenti hardware utilizzate e del software Arduino sviluppato. La progettazione e realizzazione del sistema di misurazione, basato quindi sulla piattaforma Arduino, ha perseguito alcuni requisiti tra i quali: possibilità di utilizzo in tutto il laboratorio (portabilità); acquisizione dei valori dei parametri ambientali; registrazione dei dati rilevati per il successivo studio ed elaborazione.

2.3.1 Componenti Hardware

La componente principale che gestisce e coordina la comunicazione tra tutte le altre componenti e si occupa altresì di eseguire il software è la scheda microcontrollore Arduino. Nello strumento di misura realizzato è utilizzata una scheda Arduino Uno R3, basata sul microcontrollore ATmega328P, in quanto il sistema non necessita di una eccessiva potenza di elaborazione. Inoltre, questa scheda soddisfa caratteristiche di compattezza e disponibilità di connessioni sia analogiche che digitali, presenta infatti 14 pin digitali di input ed output (di cui sei fungono anche da uscita PWM) e sei ingressi analogici. L'alimentazione avviene tramite USB oppure tramite fonte esterna attraverso pin Vin o jack DC con una tensione tra 7 e 12 V.

Per effettuare le misurazioni di temperatura all'interno della galleria del vento, in base alle varie caratteristiche dei principali sensori di temperatura analizzate nel paragrafo "2.2 Misura della Temperatura", viene utilizzato un sensore di tipo RTD e nello specifico una sonda PT100 a quattro fili. La PT100 è collegata ad un cavo di prolunga tramite morsettiere ed il collegamento a quattro fili realizzato è necessario per eliminare le impedenze dovute alla lunghezza dei cavi di collegamento, che altrimenti influenzerebbero il valore della temperatura rilevata. Considerato che Arduino è in grado di rilevare delle variazioni di voltaggio e non di resistenza occorre sviluppare un circuito di conversione basato su ponte di Wheatstone, che si occupa della conversione in volt del segnale di resistenza dato dalla sonda, ed amplificatore per portare il valore dell'ordine dei millivolt ottenuto in un intervallo 0 – 5 V comprensibile da Arduino. Per fare ciò viene utilizzato un convertitore analogico digitale MAX31865 che integra le azioni (conversione del valore di resistenza in voltaggio ed amplificazione) richieste in

unico chip e comunica con Arduino tramite interfaccia SPI (Serial Peripheral Interface). Per il collegamento della PT100 con il modulo MAX31865 bisogna individuare quali cavi della sonda sono accoppiati (in genere quelli dello stesso colore) e collegarli, a coppie, in una delle due morsettiere presenti sul modulo amplificatore.

Nella realizzazione dello strumento di misura è stato inserito anche un sensore per la rilevazione dei parametri ambientali, utili per definire le condizioni in cui vengono effettuate le rilevazioni con la sonda PT100. Il sensore in questione è il BME 280 di Bosch che è molto compatto, essendo pensato per applicazioni su dispositivi mobili, ed in grado di rilevare contemporaneamente temperatura ambiente, pressione atmosferica ed umidità relativa. Il sensore è in grado di rilevare temperature da -40°C a $+85^{\circ}\text{C}$, pressioni da 300 a 1100hPa ed umidità relativa dallo 0% al 100%. Questo sensore è anche uno dei più utilizzati nell'ambito delle stazioni meteorologiche; tuttavia soffre di un leggero surriscaldamento e perciò per ovviare al problema, come indicato dal manuale, verrà attivata via software la modalità forzata in modo che questo venga alimentato e sia in grado di effettuare misurazioni solo su chiamata specifica. Il BME 280 comunica con Arduino tramite interfaccia I²C.

I dati rilevati dalla sonda PT100 e dal sensore BME 280 vengono registrati su un file di testo memorizzato su una scheda SD collegata al microcontrollore Arduino tramite apposito modulo con interfaccia SPI.

Al fine di visualizzare i dati anche in tempo reale, è stato inserito un display (con interfaccia I²C) Lcd 16x2 comandato da un joystick a tre assi con il quale è possibile visualizzare in diverse schermate i dati rilevati.

Il collegamento elettrico tra i cavi di prolunga ed il microcontrollore è affidato a morsettiere che consentono l'aggancio e sgancio delle diverse componenti. L'alimentazione elettrica di tutto il sistema è affidata ad una batteria a 9 V collegata ad Arduino tramite un jack standard oppure tramite alimentazione dalla presa USB integrata sulla scheda.

Per il contenimento delle componenti hardware e per garantire il facile utilizzo dello strumento è stato progettato, tramite software CAD, e successivamente stampato in 3D (Fig. 2.3.1) un contenitore con relativo coperchio. All'interno del contenitore sono stati creati dei supporti con fori nei quali sono stati saldati degli inserti filettati di tipo M2 utilizzati per il fissaggio delle varie componenti (Fig. 2.3.2), mentre per la chiusura del contenitore sono stati creati dei supporti con fori nei quali sono stati saldati degli inserti filettati di tipo M3 utilizzati per il fissaggio della copertura (Fig. 2.3.3).

Nel contenitore e sul coperchio sono state opportunamente realizzate delle prese d'aria per consentire la necessaria aereazione e raffreddamento delle componenti elettroniche ed inoltre sul contenitore sono state realizzate le aperture necessarie per le connessioni e periferiche di input ed output (alimentazione; slot per scheda SD; display; joystick ecc.).



Fig. 2.3.1: stampa del contenitore

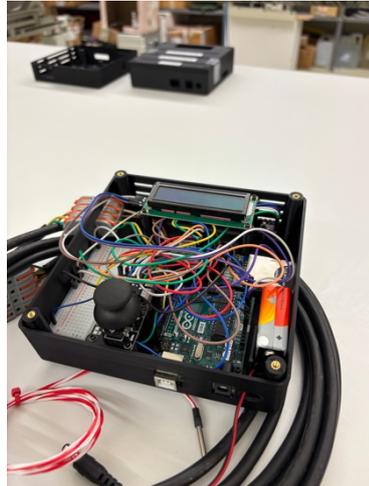


Fig. 2.3.2: contenitore assemblato aperto



Fig. 2.3.3: contenitore assemblato chiuso

2.3.2 Software Arduino

Arduino utilizza un linguaggio proprio di programmazione che si potrebbe definire "C-like" ovvero molto simile al linguaggio C. Come per la maggioranza dei progetti Arduino, anche in questo caso nel codice di programmazione si trovano le due sezioni principali di "setup" e "loop".

Per la migliore comprensione del codice prima della sezione "setup" sono state dichiarate tutte le variabili necessarie al funzionamento del programma, specificate le varie librerie utilizzate ed inoltre il codice è stato opportunamente commentato.

Le azioni principali che vengono svolte nella sezione di "setup" riguardano il controllo del corretto funzionamento e collegamento delle componenti principali, restituendo come messaggio "OK" nel caso sia tutto funzionante o "FAIL" nel caso di un malfunzionamento, in entrambi i casi preceduto dal nome della componente controllata. I controlli riguardano: l'inserimento o meno della scheda SD nell'apposito lettore; il corretto collegamento del sensore BME 280 ed il corretto collegamento del modulo MAX31865 al quale è collegata la sonda PT100. Sempre nel "setup" vengono inoltre inizializzati il monitor seriale ed il display lcd e viene anche attivata la modalità forzata sul sensore BME 280 in modo da evitare il problema del surriscaldamento del

sensores che andrebbe ad influenzare la lettura della temperatura, in questo modo le rilevazioni vengono effettuate solo su chiamata software specifica.

La sezione "loop" del software comanda la rilevazione da parte dei vari sensori: la PT100 effettua delle rilevazioni ogni secondo (1Hz), mentre il sensore BME280 effettua le rilevazioni ogni 30 secondi per evitare il richiamato problema di surriscaldamento.

L'intervallo di misurazione è comandato attraverso "millis" che tiene traccia del tempo trascorso dall'inizio dell'esecuzione del programma ed avendo tenuto traccia del tempo a cui il sensore ha effettuato l'ultima misura, calcolando il tempo trascorso, il software decide se far avvenire o meno la rilevazione. Se inserita la scheda SD i dati vengono registrati ad intervalli di un secondo in un file di testo già opportunamente tabulati in modo da semplificarne la successiva analisi con software tipo Matlab o Excel.

Sempre nel "loop" è presente la parte del codice che permette di visualizzare direttamente sul display i dati rilevati in diverse schermate alle quali è possibile accedere attraverso il joystick. Premendo quindi il pulsante integrato nel joystick si entra in un menu nel quale è possibile navigare utilizzando sempre il joystick.

I dati visualizzabili sul display, che vengono anche registrati sulla scheda SD sono: numero progressivo delle misurazioni; temperatura rilevata dalla PT100 in gradi centigradi; temperatura ambiente in gradi centigradi; pressione atmosferica in hPa; umidità relativa in percentuale; densità dell'aria (considerando una percentuale di umidità relativa dello 0%) in Kg/m³; densità dell'aria (corretta del valore di umidità relativa rilevato) in Kg/m³; altitudine sul livello del mare in metri.

Per ricavare il valore di densità dell'aria a secco il software, rilevati i dati, utilizza l'equazione dei gas perfetti: $P = \rho \cdot Ra \cdot T$, dove P è la pressione ambiente rilevata, ρ è la densità (l'incognita), $Ra = 287,05$ è la costante dei gas specifica per l'aria misurata in J/(Kg·K) e T è la temperatura misura in kelvin.

Per ricavare il valore di densità dell'aria corretto del valore di umidità relativa, il software procede dapprima calcolando la pressione di saturazione del vapore acqueo P_s (in Pa)

tramite la formula di Tetens $P_s = 6,112 e^{\frac{17,67 T}{T+243,5}}$ dove T è la temperatura dell'ambiente in gradi centigradi; successivamente calcola la pressione parziale di vapore acqueo P_v (in Pa) come il prodotto tra l'umidità relativa (non espressa in percentuale) e P_s : $P_v = (\text{umidità relativa}) \cdot P_s$; procede poi calcolando la pressione parziale di aria secca P_a (in Pa) come $P_a = P - P_v$. Infine il codice calcola il valore di densità "umida":

$\rho_{um} = \frac{P_a}{R_a T} + \frac{P_v}{R_v T}$ dove $R_v = 461,495$ è la costante dei gas specifica per il vapore acqueo misurata in J/(Kg·K).

2.4 Verifica e Sperimentazione

Assemblato lo strumento e verificato il corretto funzionamento del software, questo viene ora testato direttamente sulla galleria del vento effettuando misurazioni dirette del flusso dell'aria all'interno del Long Pipe.

Per verificarne quindi il funzionamento vengono individuate tre zone della galleria all'interno delle quali rilevare la temperatura:

- Camera di Prova: è la sezione dove vengono effettuati gli esperimenti e quindi la zona della galleria dove è importante avere una misura ed un controllo preciso della temperatura per consentire la ripetibilità dell'esperimento;
- Pre scambiatore di calore;
- Post scambiatore di calore.

In ciascuna delle tre zone la misura della temperatura, a parete, è stata rilevata per quattro valori diversi di velocità di rotazione dei ventilatori: due basse velocità (200 e 400 rpm) e due alte velocità (600 e 800 rpm); la frequenza di rilevazione è fissata a 1Hz con un tempo totale di misurazione per ogni sezione ad ogni velocità pari a 60s.

Per l'inserimento del sensore PT 100 all'interno delle condotte della galleria sono serviti allo scopo dei fori già presenti nelle diverse sezioni della galleria oggetto dei test (Fig. 2.4.1 e Fig. 2.4.2).

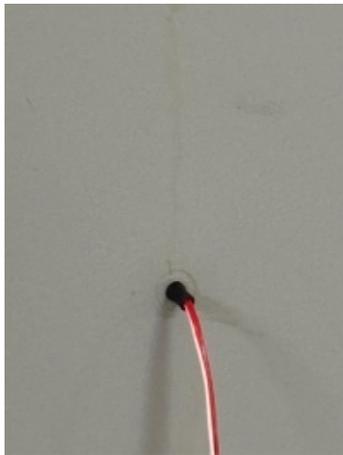


Fig. 2.4.1: sonda PT100 inserita in un foro durante una misurazione



Fig. 2.4.2: set up di misurazione zona pre scambiatore di calore

Durante lo svolgimento dei test era attivo anche il sistema di controllo della temperatura, che prevede un ricircolo di fluido refrigerante attraverso lo scambiatore di calore, in modo da poter osservare il funzionamento dello stesso e per cercare di

mantenere una temperatura costante in camera di prova, simulando così una condizione di utilizzo normale.

Durante questa prima fase di sperimentazione si è potuto quindi osservare il corretto funzionamento dell'apparato di rilevazione della temperatura all'interno della galleria del vento e non sono state osservate anomalie nei dati ottenuti che possano far pensare a false letture date dalla sonda PT100; ne consegue che lo strumento realizzato è in grado di effettuare un'affidabile rilevazione dei dati di temperatura del flusso dell'aria all'interno della galleria del vento.

Confrontando i grafici delle sezioni pre e post scambiatore di calore (Fig. 2.4.3 e Fig. 2.4.4) si vede come effettivamente le temperature ai vari regimi calino a seguito del passaggio attraverso lo scambiatore. In specifico risulta particolarmente evidente come nel caso venga impostata una velocità di rotazione dei ventilatori di 800 rpm che porta il flusso d'aria ad una velocità di circa 38m/s, sia necessario dover raffreddare il flusso d'aria a temperature comprese tra i 18°C e 17.5°C per poter mantenere la temperatura in camera di prova ad un valore pari a circa 21.2°C (Fig. 2.4.5). A questi regimi risulta quindi evidente l'effetto dell'attrito che fa innalzare la temperatura.

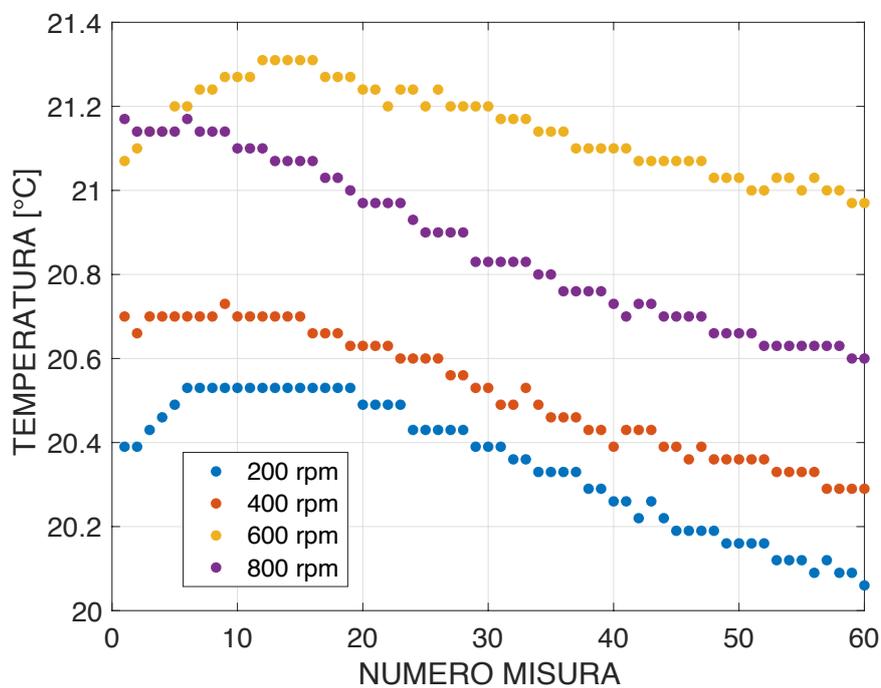


Fig. 2.4.3: rilevazioni pre scambiatore di calore alle 4 velocità utilizzate, con la temperatura rilevata sull'asse y e numero del campionamento eseguito con frequenza di 1Hz sull'asse x

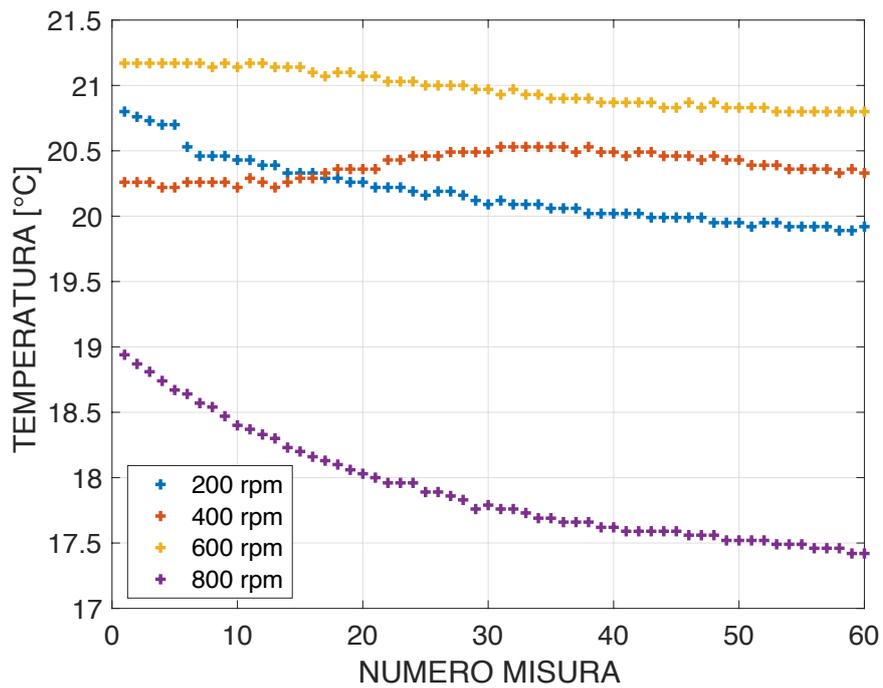


Fig. 2.4.4: rilevazioni post scambiatore di calore alle 4 velocità utilizzate, con la temperatura rilevata sull'asse y e numero del campionamento eseguito con frequenza di 1Hz sull'asse x

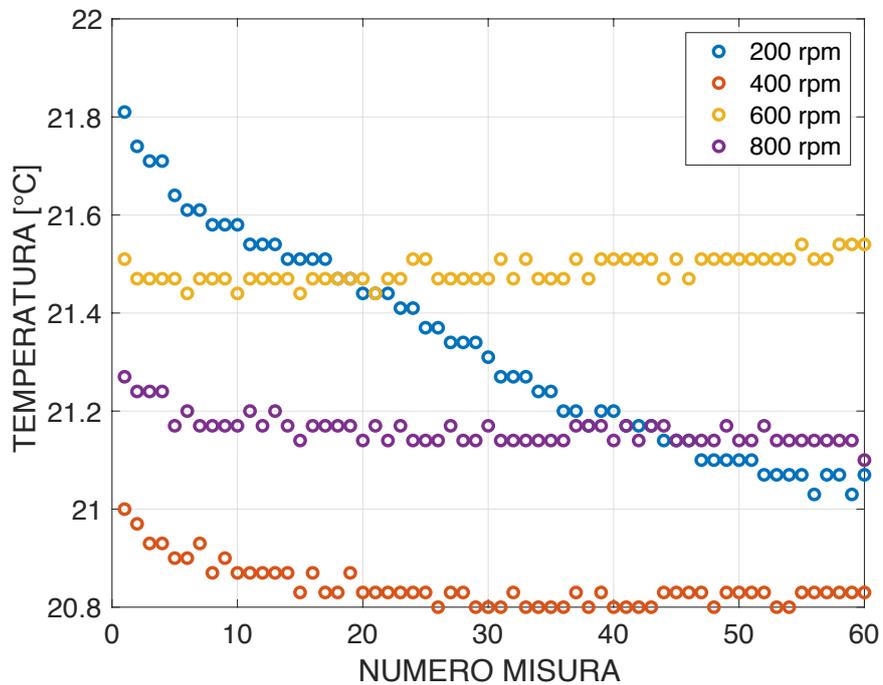


Fig. 2.4.5: rilevazioni in camera di prova alle 4 velocità utilizzate, con la temperatura rilevata sull'asse y e numero del campionamento eseguito con frequenza di 1Hz sull'asse x

In una seconda sessione di sperimentazione, svolta in preparazione alla seconda parte dello studio riguardante il controllo automatizzato della temperatura, si è proceduto a verificare sopra quale regime di rotazione dei ventilatori dovesse essere necessario intervenire attivando il sistema di raffreddamento sulla base della temperatura a parete rilevata in camera di prova, tenendo presente che questo è in grado di regolare la temperatura con un'accuratezza di $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$.

Le misurazioni sono state effettuate a sei velocità diverse: 150rpm; 300rpm; 450rpm; 600rpm; 700rpm e 800rpm. Si analizzano di seguito i risultati ottenuti:

- 150rpm (Fig. 2.4.6): le rilevazioni sono state effettuate su un arco temporale di circa 220s; la media dei valori rilevati risulta pari a 22.28°C e la deviazione standard (ovvero la misura che mi dice quanto i dati si discostano dalla loro media) risulta pari a 0.07°C . In questo caso non è necessario attivare il sistema di raffreddamento in quanto la galleria riesce a smaltire il calore generato in eccesso.
- 300rpm (Fig. 2.4.7): le rilevazioni sono state effettuate su un arco temporale di circa 310s; la media dei valori rilevati risulta pari a 22.13°C e la deviazione standard risulta essere sempre circa 0.07°C . Anche per questa velocità di rotazione dei ventilatori non è necessario dover raffreddare il flusso dell'aria.
- 450rpm (Fig. 2.4.8): le rilevazioni sono state effettuate su un arco temporale di circa 140s; la media dei valori rilevati risulta pari a 22.28°C e la deviazione standard risulta essere di circa 0.08°C . Rispetto ai due casi precedenti si rileva che la media della temperatura rimane più o meno costante, ma la deviazione standard è aumentata. Tuttavia anche per questo caso non è necessario dover raffreddare il flusso d'aria.
- 600rpm (Fig. 2.4.9): le rilevazioni sono state effettuate su un arco temporale di circa 140s; la media dei valori rilevati risulta pari a 22.67°C e la deviazione standard risulta essere di circa 0.13°C . Rispetto ai casi precedenti si nota che la media della temperatura è aumentata così come la deviazione standard. Facendo anche un'analisi visiva del grafico si giunge alla conclusione che da questo regime di rotazione la temperatura tende ad aumentare il suo valore, il che rende necessario dover attivare il sistema di raffreddamento per limitare il fenomeno.
- 700rpm (Fig. 2.4.10): le rilevazioni sono state effettuate su un arco temporale di circa 150s; la media dei valori rilevati risulta pari a 23.24°C e la deviazione standard risulta essere di circa 0.20°C . La media della temperatura continua a salire così come la deviazione standard evidenziando un incremento più rapido della temperatura del flusso, come si può anche notare dal grafico, dovuto alla sua maggiore velocità. Il tutto rende necessario dover attivare il sistema di controllo della temperatura.

- 800rpm (Fig. 2.4.11): le rilevazioni sono state effettuate su un arco temporale di circa 170s; la media dei valori rilevati risulta pari a 24.17°C e la deviazione standard risulta essere di circa 0.22°C. La media della temperatura e la deviazione standard sono aumentate ulteriormente, rendendo necessario anche in questo caso l'attivazione del sistema di controllo della temperatura.

La conclusione finale che si può trarre da questa seconda sperimentazione è che per una buona riuscita degli esperimenti e per garantirne la ripetibilità, dal regime di rotazione di 600rpm che genera una velocità del flusso d'aria all'interno della galleria pari a circa 27m/s, è necessario attivare il sistema di controllo della temperatura della galleria per poter interrompere e limitare l'aumento della stessa in modo da mantenerla attorno ad un valore stabile.

Si riportano di seguito i grafici relativi alle rilevazioni di temperatura alle diverse velocità.

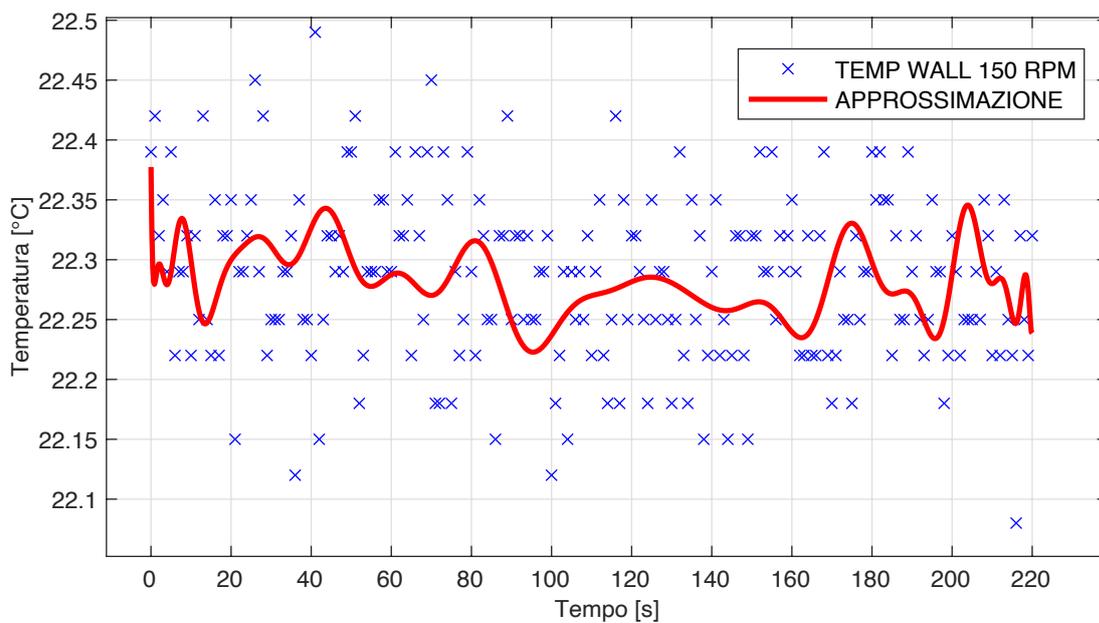


Fig. 2.4.6: andamento della temperatura a 150rpm in funzione del tempo misurato in secondi, in cui si evidenziano con croci blu i singoli campionamenti di temperatura a parete acquisiti con frequenza di 1Hz e con una linea rossa l'approssimazione dei dati eseguita

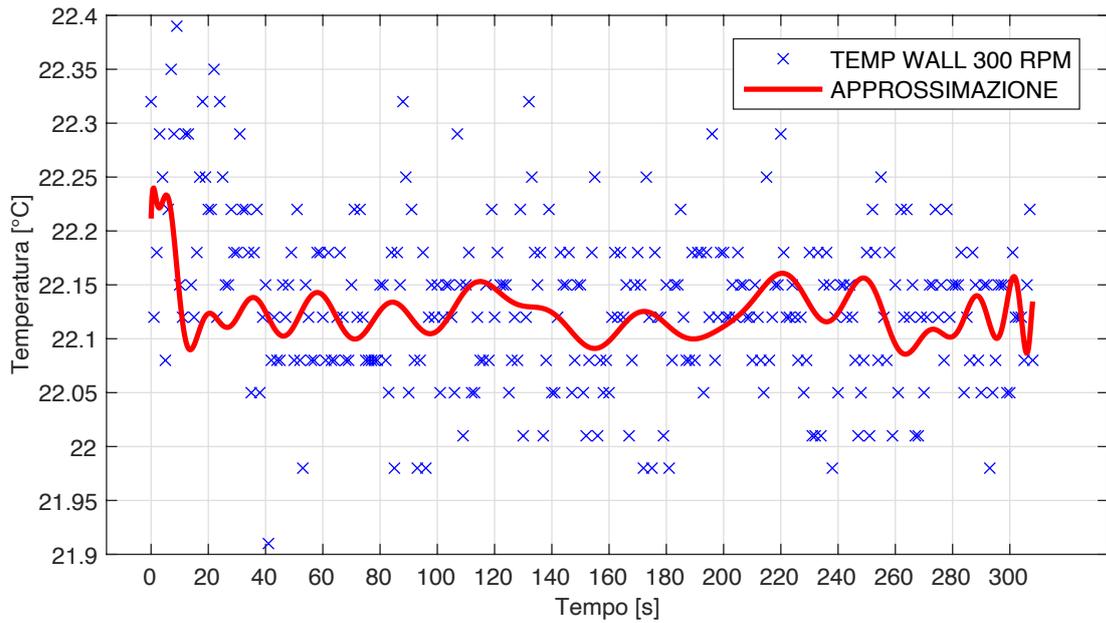


Fig. 2.4.7: andamento della temperatura a 300rpm in funzione del tempo misurato in secondi, in cui si evidenziano con croci blu i singoli campionamenti di temperatura a parete acquisiti con frequenza di 1Hz e con una linea rossa l'approssimazione dei dati eseguita

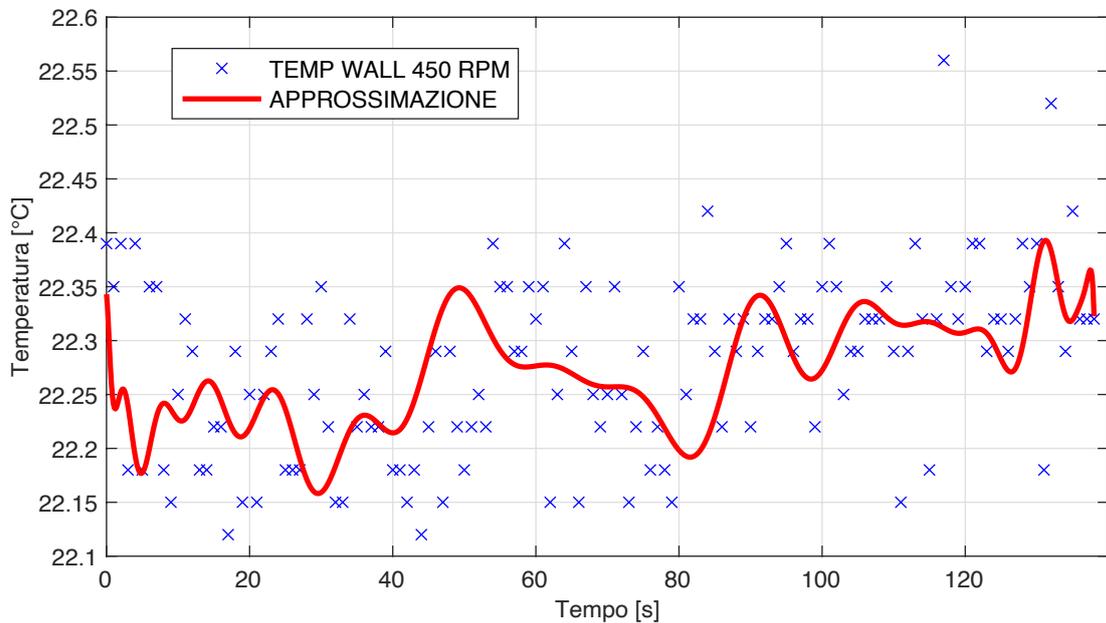


Fig. 2.4.8: andamento della temperatura a 450rpm in funzione del tempo misurato in secondi, in cui si evidenziano con croci blu i singoli campionamenti di temperatura a parete acquisiti con frequenza di 1Hz e con una linea rossa l'approssimazione dei dati eseguita

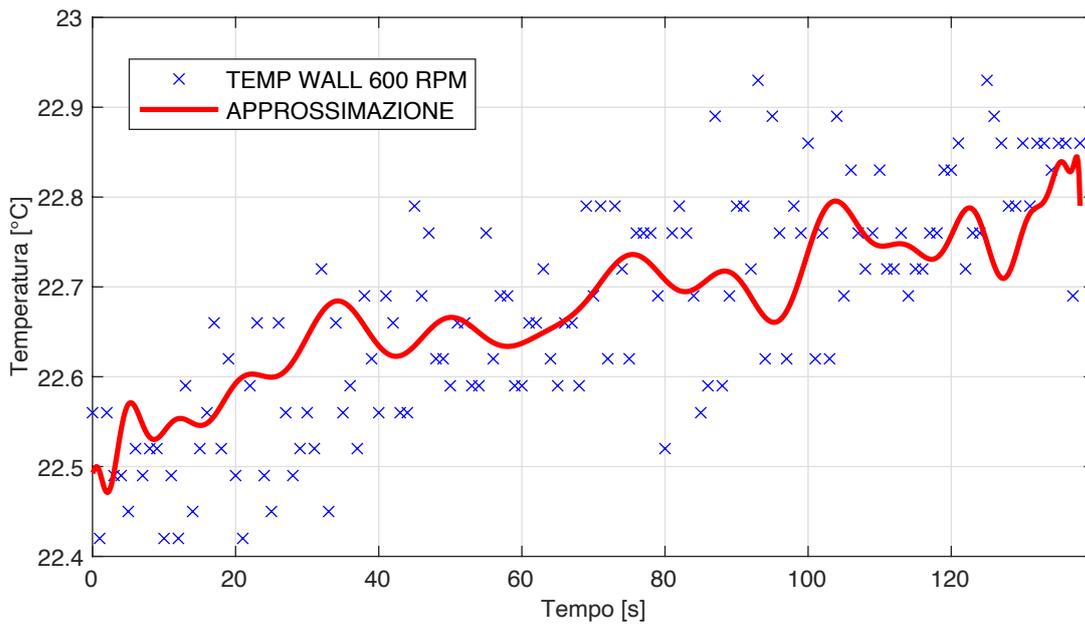


Fig. 2.4.9: andamento della temperatura a 600rpm in funzione del tempo misurato in secondi, in cui si evidenziano con croci blu i singoli campionamenti di temperatura a parete acquisiti con frequenza di 1Hz e con una linea rossa l'approximazione dei dati eseguita

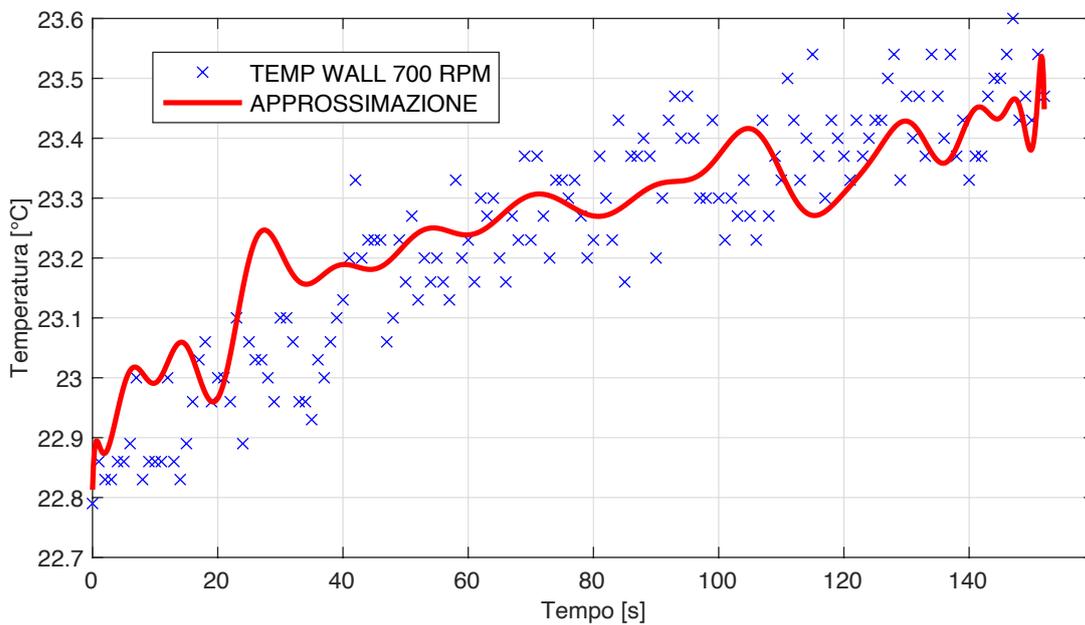


Fig. 2.4.10: andamento della temperatura a 700rpm in funzione del tempo misurato in secondi, in cui si evidenziano con croci blu i singoli campionamenti di temperatura a parete acquisiti con frequenza di 1Hz e con una linea rossa l'approximazione dei dati eseguita

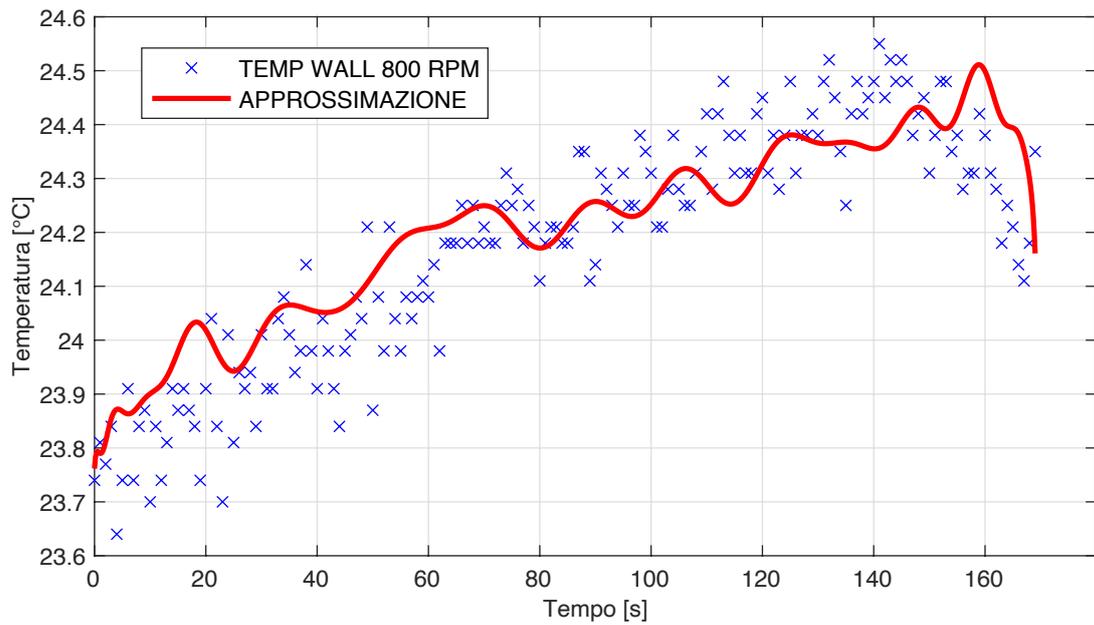


Fig. 2.4.11: andamento della temperatura a 800rpm in funzione del tempo misurato in secondi, in cui si evidenziano con croci blu i singoli campionamenti di temperatura a parete acquisiti con frequenza di 1Hz e con una linea rossa l'approssimazione dei dati eseguita

3 CONTROLLO AUTOMATIZZATO DELLA TEMPERATURA

3.1 Controlli Automatici e Retroazione

I controlli automatici fanno parte dei processi di automazione ovvero di tutte quelle tecniche, dispositivi e tecnologie che permettono a macchine di controllare, nel senso di far svolgere delle azioni ad altre macchine. Si può quindi definire un controllo automatico come un “processo che ha luogo su un sistema fisico naturale o artificiale e ne determina l’evoluzione ed il funzionamento secondo un comportamento prestabilito in modo automatico, cioè senza l’intervento manuale operato dall’uomo”.

La struttura tipica di un controllo automatico è costituita da tre livelli principali:

- al livello più alto si trova il decisore, ovvero colui che decide quale deve essere il funzionamento desiderato del sistema. Questo ruolo spesso è attribuito all’uomo e il risultato in uscita da questo livello è il riferimento, come per esempio un setpoint di temperatura desiderato;
- al livello intermedio si trova il controllore o regolatore il cui compito è quello di interpretare i comandi del decisore ed imporre delle azioni sull’impianto controllato. Per farlo può ricevere informazioni esterne sullo stato di funzionamento dell’impianto stesso;
- infine al livello più basso si trova il sistema su cui si effettua il controllo ovvero l’impianto sulla quale il controllore impartisce comandi per ottenere un comportamento quanto più simile a quello desiderato e richiesto dal decisore.

Le azioni che il controllore impartisce sull’impianto vengono chiamate segnali, che si possono suddividere in segnali di ingresso e di uscita. Come si vedrà meglio nelle sezioni successive, in questa applicazione si studia lo sviluppo di un sistema di tipo SISO (Single Input Single Output).

Per eseguire l’azione di controllo sull’impianto, il sistema può farlo in due modi principali: con un’architettura ad anello aperto, “open loop”, (Fig. 3.1.1) o con un’architettura ad anello chiuso, “closed loop”, (Fig. 3.1.2) chiamata anche retroazione. Nell’architettura ad anello aperto il segnale di riferimento viene dato al sistema di controllo, che agendo sull’impianto fa sì che questo generi l’uscita desiderata (corrispondente al riferimento) previa calibrazione dell’apparato. Questo tipo di architettura, però non è in grado di rilevare la presenza di disturbi nel processo che possono influenzare l’uscita e che quindi non possono essere compensati. Questo problema viene evitato nelle architetture “closed loop” in quanto, pur dovendo creare un sistema più complesso, si misura l’uscita dell’impianto e comparandola col valore di riferimento si genera un segnale di errore ed in base alla sua entità il regolatore produce

un'azione correttiva in modo da cercare di azzerare l'errore tra il valore all'uscita dell'impianto ed il riferimento.

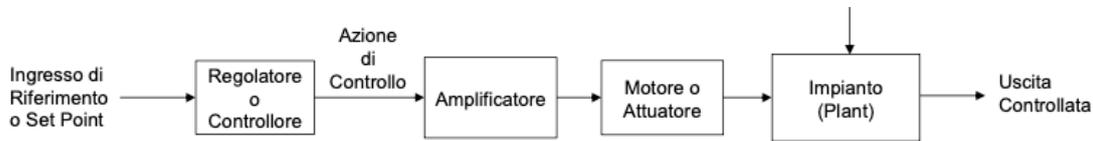


Fig. 3.1.1: schema a blocchi di un sistema di controllo automatico in catena aperta

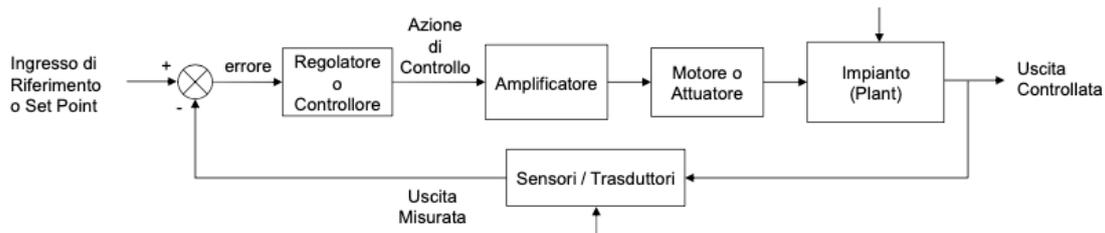


Fig. 3.1.2: schema a blocchi di un sistema di controllo automatico in catena chiusa (retroazione)

Un modello matematico generico valido per sistemi lineari stazionari e SISO è rappresentato da equazioni differenziali ordinarie lineari a coefficienti costanti del tipo:

$$\frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = b_m \frac{d^m x(t)}{dt^m} + \dots + b_1 \frac{dx(t)}{dt} + b_0 x(t);$$

dove $x(t)$ è la funzione del tempo che rappresenta l'ingresso del sistema; $y(t)$ è la funzione del tempo che rappresenta l'uscita del sistema; a_i con $i = 0, 1, \dots, n - 1$ sono gli n coefficienti reali che moltiplicano le derivate dell'uscita e b_i con $i = 0, 1, \dots, m$ sono gli $m + 1$ coefficienti reali che moltiplicano le derivate dell'ingresso.

Per poter risolvere questa equazione si fa ricorso a metodi trasformativi, nello specifico si ricorre alla trasformata di Laplace. L'equazione differenziale vista espone la relazione tra le funzioni di ingresso e l'uscita nel dominio del tempo, dominio a cui dovrà appartenere anche la soluzione cercata. Risolvendo l'equazione mediante trasformata di Laplace si trasforma l'equazione differenziale in un'equazione algebrica di variabile complessa, quindi nel dominio complesso, di più facile risoluzione. Si risolve quindi un problema immagine che fornisce una soluzione immagine e tramite un processo di antitrasformazione si riporta la soluzione trovata nel campo complesso alla sua corrispondente nel dominio del tempo.

La trasformata di una funzione $f(t)$ è indicata con $F(s) = \mathcal{L}[f(t)]$ dove $\mathcal{L} = \int_0^{+\infty} e^{-st} dt$ è l'integrale di Laplace e risulta quindi $F(s) = \int_0^{+\infty} f(t)e^{-st} dt$.

L'antitrasformata di una funzione $F(s)$ è indicata con $f(t) = \mathcal{L}^{-1}[F(s)]$ e risulta quindi

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma_0 - j\infty}^{\sigma_0 + j\infty} F(s)e^{st} dS .$$

Ogni sistema di controllo ed ogni sua componente possono essere espressi da equazioni differenziali anch'esse trasformabili ottenendo così la funzione di trasferimento definita come il rapporto tra la trasformata di Laplace dell'ingresso e la trasformata di Laplace dell'uscita: $G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}$. Lo studio dei poli e degli zeri di questa funzione ci permette di avere un'anteprima sul comportamento del sistema. In base alla loro posizione nel piano complesso zeri e poli mi indicano rispettivamente le frequenze che vengono filtrate dal sistema e le frequenze alle quali il sistema diventa instabile.

Focalizzando l'attenzione sui sistemi in retroazione, si consideri lo schema semplificato di un sistema retroazionato in Fig. 3.1.3.

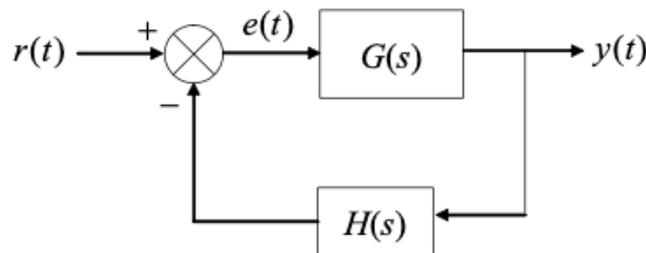


Fig. 3.1.3: schema a blocchi semplificato di un sistema di controllo automatico in catena chiusa

Le funzioni principali presenti sono: $r(t)$ è il set point; $y(t)$ è l'uscita controllata; $e(t)$ è il segnale di errore ottenuto calcolato dal blocco comparatore come la differenza tra $r(t)$ e $y(t)$; $G(s)$ è la funzione di trasferimento della catena diretta ottenuta come moltiplicazione di tutte le funzioni di trasferimento delle componenti presenti in questo ramo (regolatore, amplificatore, ...); $H(s)$ è la funzione di trasferimento del sensore presente nel ramo di retroazione.

Si possono quindi ora definire la funzione di guadagno di anello $G_a(s) = G(s)H(s)$ e la funzione complessiva del sistema retroazionato $G_T(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)}$.

Se si apre l'anello di retroazione in una sezione qualsiasi e si prendono due punti uno subito a valle del sezionamento e l'altro immediatamente a monte del sezionamento, la retroazione si può quindi definire negativa quando una perturbazione propagata a valle del sezionamento si propaga a monte di esso con segno opposto ottenendo così la situazione più desiderabile in quanto è associata ad un comportamento stabilizzante, mentre si parla di retroazione positiva quando la perturbazione da valle a monte del sezionamento non cambia segno, ottenendo quindi un effetto rigenerativo che porta all'instabilità del sistema.

I principali vantaggi di un sistema in retroazione sono:

- Reiezione dei disturbi: attenuazione o compensazione degli effetti dei disturbi sull'uscita;
- Insensibilità alle variazioni dei parametri (robustezza): l'uso ed il funzionamento delle componenti che fanno parte di un sistema fanno sì che i valori dei parametri che li caratterizzano varino nel tempo a causa dell'invecchiamento, per stress meccanico, ecc. Queste variazioni, ovviamente, non sono volute e non dipendono né dal decisore né dal controllore, pertanto un sistema retroazionato riesce ad avere un effetto positivo riducendo l'effetto non desiderato dato dalle variazioni dei parametri;
- Aumento della banda passante: questa è legata alla prontezza del sistema, quindi se viene aumentata il sistema risulta più pronto ed in grado di rispondere a sollecitazioni ad alta frequenza;
- Spostamento dei poli: i poli della funzione di trasferimento del sistema sono diversi da quelli della funzione di trasferimento del sistema equivalente in catena aperta, il che contribuisce a rendere il sistema più pronto, ma l'effetto maggiore si nota sul miglioramento della stabilità anche in sistemi tendenzialmente instabili.

Questi vantaggi derivano dalla possibilità di poter considerare un alto guadagno di anello, in questo modo $G_T(s) = \frac{1}{H(s)}$ e quindi l'uscita non dipende dal ramo in catena diretta, ma solo dal ramo in retroazione rendendo quindi possibile poter trascurare gli effetti che non permetterebbero di avere i benefici sopra elencati.

3.2 Controllori PID

Nella progettazione dei sistemi automatici il controllore più utilizzato è quello di tipologia PID, acronimo delle tre principali azioni svolte: Proporzionale, Integrativa, Derivativa. Il maggiore impiego di questo tipo di controllore è dovuto alla sua semplicità di realizzazione (in quanto crea un'architettura standard per il controllo dei processi), alla sua efficacia negli impianti in cui viene implementato ed alla semplicità della sua struttura matematica. Il suo utilizzo si riscontra in diversi ambiti, tra cui in sistemi per il controllo della portata di un fluido, sistemi di controllo della temperatura e movimentazioni di bracci meccanici.

I PID operano principalmente in sistemi retroazionati e quindi ad ogni ciclo ricevono una lettura effettuata da un sensore, calcolano il valore della variabile di controllo (per esempio il voltaggio) sulla base della differenza tra il valore misurato ed il riferimento chiamato errore. L'errore viene così elaborato ed il PID restituisce un output come la somma delle correzioni proporzionale, integrativa e derivativa moltiplicate per le rispettive costanti K_p ; K_i e K_d .

Come si può notare dallo schema a blocchi nella figura sottostante (Fig. 3.2.1), che è una rappresentazione del funzionamento di questa tipologia di controllori, le azioni proporzionale, integrativa e derivativa, agiscono in parallelo e pertanto la funzione di trasferimento di un controllore di tipo PID risulta essere: $G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$.

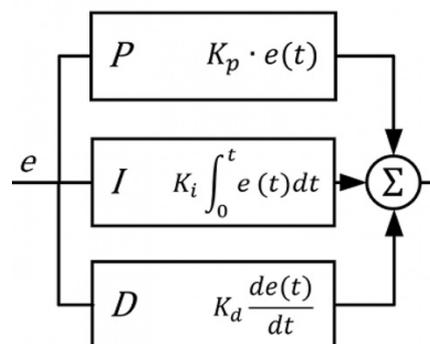


Fig. 3.2.1: schema a blocchi generico di un controllore PID

Per poter variare il comportamento di un PID, in modo che soddisfi le proprie esigenze in termini di velocità e precisione per l'impianto in cui deve essere implementato, l'unico modo per farlo è variare il valore delle tre costanti. Gli effetti delle loro variazioni sono i seguenti:

- Azione proporzionale K_p : si occupa di rendere proporzionale l'azione di controllo all'errore tra il setpoint e il valore misurato della variabile che si vuole controllare, quindi più alto sarà l'errore maggiore sarà l'azione di controllo svolta dal regolatore. L'effetto di questa azione si ripercuote sulla capacità del sistema retroazionato di inseguire il comportamento desiderato. Un regolatore che presenta una sola azione proporzionale, a meno che questo non sia implementato in un sistema asintoticamente stabile, produce una differenza tra il riferimento e il valore realmente ottenuto, non garantendo quindi l'annullamento dell'errore a regime. Per ridurre l'errore e rendere il sistema più reattivo si può aumentare il valore della costante K_p , ma questo può innescare delle oscillazioni non desiderate a regime, senza poi mai raggiungere il valore di set point desiderato.
- Azione integrale K_i : questa azione rende proporzionale l'azione di controllo all'integrale dell'errore. Il suo compito è quello di fare in modo che a regime il valore della variabile che stiamo controllando assuma il valore di setpoint, quindi è come se fosse un dispositivo atto a cercare di azzerare, o minimizzare il più possibile, l'errore a regime che l'azione proporzionale aveva introdotto. L'inserimento di questa azione nel controllore porta ad una maggiore precisione senza un peggioramento delle caratteristiche di stabilità, a meno di valori di K_i troppo elevati, garantendo anche una maggiore velocità di risposta del sistema.
- Azione derivativa K_d : questa azione rende proporzionale l'azione di controllo alla derivata dell'errore, basandosi quindi sulla sua velocità di variazione e fornendo una previsione della sua tendenza futura. Il suo compito è quello di agire come uno smorzatore opponendosi a cambiamenti rapidi dell'errore migliorando quindi la stabilità generale del sistema aiutando anche a ridurre il fenomeno di "overshoot" (superamento del valore di riferimento alla prima oscillazione) introdotto dal valore della costante dell'azione proporzionale.

Per ottenere quindi un controllore PID che meglio possa controllare l'impianto, è necessario trovare la stima migliore delle tre costanti sopra descritte. Si attua così quello che è il processo di taratura dei parametri dei controllori PID ed è in questa fase che si riscontra un altro vantaggio di questa tipologia di regolatori. Questi non rendono necessaria la conoscenza del modello matematico che caratterizza tutto l'impianto, ma è possibile settare il valore delle tre azioni che li costituiscono attraverso prove sperimentali cercando di ottenere l'andamento desiderato. Questa procedura si attua applicando metodi empirici per la sintonizzazione dei parametri. Tra questi i più utilizzati sono tre:

- Tuning Manuale: si parte col solo termine proporzionale e si aggiungono gradualmente il termine integrale e derivativo fino ad ottenere la risposta desiderata. Delle tre procedure è quella più onerosa in termini di tempo di esecuzione.
- Metodo di Ziegler-Nichols: si impongono inizialmente i valori di K_i e K_d pari a zero ed un valore di K_p basso. Si aumenta ora il valore della K_p , ripetendo ogni volta l'esperimento, finché non si nota un'oscillazione stabile permanente (oscillazioni che non si smorzano nel tempo) della variabile controllata attorno al valore di set point. Il valore di K_p che causa questo comportamento viene chiamato critico (K_c). Si misura poi il periodo T dell'oscillazione, per esempio misurando la distanza tra due massimi d'onda, e basandosi sulla tabella sotto riportata (Tabella 3.2.1) si calcolano i valori di K_p , K_i e K_d .
- Metodo di Tyreus-Luyben: si esegue la stessa procedura vista per il metodo precedente, quello che cambia è come questo metodo calcola il valore da assegnare alle tre costanti. Osservando la Tabella 3.2.2, le differenze che traspaiono maggiormente sono che questo metodo si può applicare solo per la progettazione di controllori PI e PID e che il valore della costante K_i prevale in maniera maggiore sulle altre due costanti.

Tipologia	K_p	K_i	K_d
P	$\frac{K_c}{2}$	/	/
PI	$\frac{K_c}{2.2}$	$\frac{T}{1.2}$	/
PID	$\frac{K_c}{1.7}$	$\frac{T}{2}$	$\frac{T}{8}$

Tabella 3.2.1: calcolo parametri PID con metodo Ziegler-Nichols

Tipologia	K_p	K_i	K_d
PI	$\frac{K_c}{3.2}$	$2.2T$	/
PID	$\frac{K_c}{2.2}$	$2.2T$	$\frac{T}{6.3}$

Tabella 3.2.2: calcolo parametri PID con metodo Tyreus-Luyben

3.3 Sistema di Raffreddamento

La gestione della temperatura dell'aria all'interno del Long Pipe del Laboratorio CICLoPE si rende necessaria per i motivi analizzati nel paragrafo "2.1 Variazione ed effetti della Temperatura" della parte relativa alla progettazione dello strumento di misura. E' quindi necessario disporre di un sistema attivo in grado di modificare efficacemente la temperatura per avere condizioni stabili in camera di prova. Questo viene realizzato grazie alla presenza di un sistema di raffreddamento.

L'impianto di raffreddamento si sviluppa sia all'interno che all'esterno delle Gallerie Caproni all'interno delle quali è alloggiata la galleria del vento.

All'esterno si trova la parte di refrigerazione (Fig. 3.3.1) costituita da un gruppo frigorifero che si occupa di portare la temperatura del fluido refrigerante, in questo caso acqua, a 6 - 8°C.



Fig. 3.3.1: gruppo frigorifero all'esterno della struttura del laboratorio CICLoPE

Il refrigerante entra all'interno della struttura, tramite tubature opportunamente isolate, dove si trova il gruppo di ricircolo (Fig. 3.3.2). A questo è collegata una pompa ed una valvola deviatrice (Fig.3.3.3) che se aperta permette al flusso d'acqua di fluire attraverso lo scambiatore di calore inserito nel loop della galleria del vento. La valvola deviatrice può essere comandata a distanza con un segnale di voltaggio compreso tra 0 e 10 V; fornendo 0V la valvola sarà completamente chiusa (non c'è flusso verso lo scambiatore), mentre fornendo 10V sarà completamente aperta. Il tempo misurato per portare la valvola da chiusa (0V) ad aperta (10V) è di 30s.

Il raffreddamento vero e proprio dell'aria avviene grazie al suo passaggio attraverso lo scambiatore di calore, dove il calore dell'aria viene trasferito al fluido refrigerante senza che questi due entrino in contatto. Lo scambiatore è posizionato dopo il diffusore e prima dei ventilatori e permette un controllo della temperatura con una precisione di $\pm 0,1$ °C. Le dimensioni sono piuttosto elevate (2,3 m x 2,7 m) garantendo un'area di scambio di $6,21$ m² in modo da massimizzare lo scambio di calore. La sua potenza termica è di 340 kW e questo permette di stabilizzare e controllare la temperatura anche ad alte velocità del flusso d'aria all'interno del Long Pipe.



Fig. 3.3.2: gruppo di ricircolo del refrigerante con valvola di regolazione del flusso e scambiatore di calore sulla sinistra



Fig. 3.3.3: dettaglio valvola deviatrice del flusso refrigerante

3.4 Progettazione e Sviluppo

In questa sezione si procede alla descrizione delle fasi di progettazione e sviluppo dell'apparato di controllo realizzato per poter controllare il valore della temperatura del flusso d'aria nella camera di prova della galleria in maniera automatica. Il sistema realizzato si basa su un controllore PID realizzato con Arduino inserito in un circuito di controllo automatico posto in retroazione. Il controllore fornisce in output un valore di voltaggio, che viene trasmesso alla valvola che regola il flusso di refrigerante allo scambiatore di calore, basandosi sulle letture di temperatura fornite da una sonda PT100 e confrontate con il valore di set point impostato. Si fornisce quindi una descrizione delle principali componenti hardware utilizzate, del software Arduino sviluppato e del codice Matlab utilizzato per la creazione di un'interfaccia grafica (GUI).

3.4.1 Componenti Hardware

Molte componenti hardware dello strumento di controllo sono comuni allo strumento di misura della temperatura descritto al paragrafo "2.3 Progettazione e Sviluppo", al quale si rimanda per la descrizione dettagliata di tali componenti.

Anche per la realizzazione del sistema di controllo automatico, la componente principale che coordina, mette in relazione tutte le altre ed esegue il software è la scheda microcontrollore Arduino Uno R3. Per la rilevazione della temperatura in camera di prova viene utilizzata una sonda PT100 collegata ad Arduino tramite apposito modulo per la conversione del segnale da analogico a digitale. Collegato al sistema si trova anche un display lcd 16x2 sul quale è possibile visualizzare la temperatura in tempo reale rilevata dalla PT100, il set point di temperatura impostato, il voltaggio (calcolato dal software) che viene erogato e trasmesso alla valvola deviatrice ed infine la modalità di funzionamento automatica o manuale. Per la gestione della modalità manuale è installato un joystick a tre assi che permette di modificare il voltaggio erogato con una regolazione di $\pm 0,05$ V. La rilevazione dei parametri ambientali (sempre utili per definire le condizioni in cui si svolgono le misurazioni) come temperatura, pressione ed umidità vengono affidate sempre al sensore BME280.

Per poter controllare la valvola che regola il flusso di refrigerante allo scambiatore di calore è necessario ottenere da Arduino un segnale analogico tra 0 V e 10 V. La scheda Arduino utilizzata dispone nativamente di pin di output in grado fornire un segnale modulato digitalmente tramite modulazione PWM (Pulse Width Modulation).

Questo tipo di modulazione permette di ottenere una tensione media variabile alternando, più o meno frequentemente, degli impulsi a piena tensione che variano cioè tra il valore minimo e massimo, generando un'onda quadra. La valvola però utilizza un segnale di controllo analogico, perciò il segnale PWM deve essere filtrato tramite filtro passa basso in modo che sia trasformato in un segnale con una forma d'onda più simile a quella di un segnale analogico. Tuttavia il metodo più preciso per ottenere un segnale di controllo analogico da Arduino è attraverso l'uso di un DAC (Digital Analog Converter). Per questa applicazione viene utilizzato il modulo DAC MCP4725 che comunica con Arduino tramite interfaccia I²C (non è quindi necessario utilizzare i pin PWM). Il compito del modulo DAC è quello di fare da "interprete" ricevendo in input un numero tra 0 e 4095, in quanto il DAC usato ha una risoluzione pari a 12 bit, e tradurlo in un valore di tensione analogico.

Per poter pilotare la valvola con un segnale 0-10 V, non essendo possibile farlo nativamente con il solo DAC in quanto fornisce segnali di output in un range 0-5 V poiché alimentato a 5V, si rende necessario dover inserire nel circuito un amplificatore operazionale (alimentato esternamente con una tensione minima di 12 V) che amplifica il segnale in uscita dal convertitore analogico digitale e lo porta nell'intervallo corretto. L'amplificatore utilizzato è un LM358 che viene collegato nella seguente maniera (Fig. 3.4.1): il segnale di voltaggio generato dal DAC viene mandato all'amplificatore tramite collegamento sul pin n.3, che rappresenta un pin di input non invertente, in questo modo l'uscita avrà lo stesso segno dell'ingresso; il pin n.2 viene collegato a ground tramite un resistore dal valore di $R_1 = 10k\Omega$; si instaura poi un collegamento tramite un altro resistore $R_2 = 10k\Omega$ tra il pin n.2 ed il n.1 dal quale si preleva l'output amplificato. Questo tipo di collegamento è illustrato dalla formula che definisce il guadagno dell'amplificatore $G = 1 + \frac{R_2}{R_1}$ ottenendo così un guadagno $G = 2$ che porta l'intervallo di operatività nel range 0-10 V.

L'alimentazione dell'Arduino avviene tramite jack DC o via USB; mentre per poter alimentare l'amplificatore, che necessita di una tensione di alimentazione di almeno 12V (che Arduino non fornisce) per fornire un output di 10V, viene utilizzato un alimentatore da banco regolabile modello EA-PS 2042-10B il quale è in grado di fornire una tensione in corrente continua tra 0 e 42 V.

La cosa importante a cui prestare attenzione nei collegamenti delle varie componenti è che queste abbiano lo stesso ground, in modo da evitare comportamenti indesiderati. Per questo motivo anche il pin n.4 del LM358, al quale viene collegato il negativo

dell'alimentatore esterno, deve essere collegato ad un pin GND di Arduino come tutte le altre componenti.

Per l'assemblaggio finale del dispositivo di controllo è utilizzato lo stesso contenitore già realizzato e descritto nella parte relativa allo strumento di misura (Fig. 3.4.2).

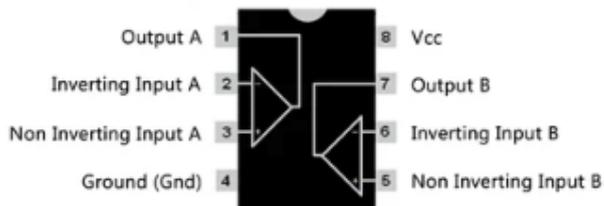


Fig. 3.4.1: piedinatura amplificatore LM358

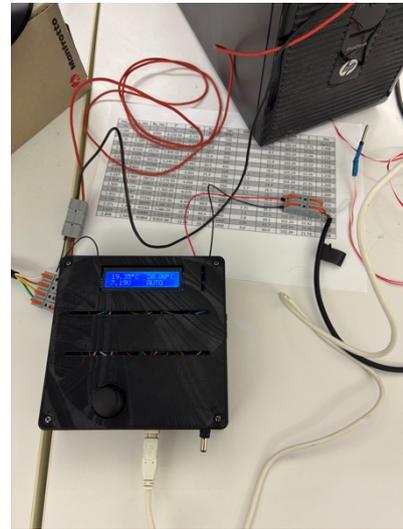


Fig. 3.4.2: sistema di controllo assemblato

3.4.2 Software Arduino

Per la realizzazione del software Arduino per il funzionamento del sistema automatico di regolazione della temperatura, si è presa come base la struttura del software per lo strumento di misura della temperatura.

Prima delle due sezioni principali di "setup" e "loop" sono quindi state sempre dichiarate le variabili, tra cui il set point desiderato ed i tre valori delle costanti caratteristiche dei PID, e specificate le librerie utilizzate come quelle per implementare il controllore PID e quella per gestire il DAC.

La parte del "setup" si occupa, anche in questo caso, del controllo del corretto funzionamento e collegamento delle varie componenti e permette la visualizzazione a display di un messaggio che comunica se il controllo sulla componente in esame è andato a buon fine oppure no. Le verifiche riguardano il corretto collegamento del sensore BME280 (per il quale viene sempre attivata la modalità forzata), del modulo MAX31865, del modulo DAC MCP4725. In questa sezione viene attivata anche, tramite i comandi della libreria, la modalità automatica per il controllore PID e settato l'intervallo di output tra 0 e 10V tramite i comandi: "myPID.SetMode(AUTOMATIC)" e "myPID.SetOutputLimits(0, 10)".

La parte del "loop" si occupa in principio di far avvenire le rilevazioni da parte dei vari

sensori: la PT100, installata in camera di prova, effettua delle rilevazioni ogni secondo (1Hz), mentre il sensore BME280 effettua le rilevazioni ogni 30 secondi per evitare il problema del surriscaldamento. L'intervallo di tempo tra una misurazione e la successiva è comandato attraverso il comando "millis". Successivamente ad ogni nuova rilevazione di temperatura effettuata nella in camera di prova viene calcolato il valore di voltaggio dal controllore PID tramite il comando "myPID.Compute()" per il quale era già stato impostato con la seguente riga "myPID(&ril, &vout, &setpoint, kp, ki, kd, REVERSE)" il fatto di prendere in input le variabili "ril", "kp", "ki", "kd", "setpoint" e fornire in output il valore del voltaggio calcolato salvato nella variabile "vout". Per poter rendere comprensibile al convertitore digitale analogico il valore di tensione, questo deve essere convertito in un numero compreso tra 0 (0V) e 4095 (5V) tramite la seguente formula: $valoreDAC = \frac{vout}{10} 4095$; dove la divisione per 10 si rende necessaria poiché il sistema deve lavorare in un intervallo 0-10V. A questo punto tramite istruzione "dac.setVoltage(valoreDAC, false)" il numero calcolato viene mandato al DAC che si occupa di generare il valore di tensione tra 0 e 5 V che deve essere poi successivamente amplificato dall'amplificatore LM358.

Sul monitor seriale di Arduino (in modo da poter poi essere letti tramite seriale) vengono visualizzati i seguenti valori: numero progressivo delle misurazioni; temperatura rilevata dalla PT100 in gradi centigradi; temperatura ambiente in gradi centigradi; pressione atmosferica in hPa; umidità relativa in percentuale; densità dell'aria (considerando una percentuale di umidità relativa dello 0%) in Kg/m³; densità dell'aria (corretta del valore di umidità relativa rilevato, calcolata secondo le modalità già presentate nella sezione "2.3.2 Software Arduino") in Kg/m³; altitudine sul livello del mare in metri e il voltaggio erogato calcolato dal controllore PID.

Qualora dovesse essere premuto il pulsante integrato nel joystick, il sistema passa alla modalità manuale, fino a nuova pressione, e sul display verrà visualizzata la scritta "MANUAL" al posto della scritta "AUTO". In questa modalità, pensata per una regolazione di fino una volta stabilizzata la temperatura in un range accettabile attorno al set point, è possibile andare ad agire tramite il joystick sull'ultimo valore di tensione calcolato dalla modalità automatica, effettuando delle variazioni di $\pm 0,05$ V.

3.4.3 Software MatLab

Mediante l'applicativo MatLab viene realizzata una GUI (Graphic User Interface) (Fig. 3.4.3), molto semplice, che permette di poter visualizzare in tempo reale su due

grafici distinti il valore attuale della temperatura in camera di prova e il voltaggio erogato per il controllo della valvola deviatrice. Il programma permette anche il salvataggio di tutti i parametri rilevati dai sensori in un file di testo per consentirne la successiva elaborazione. Per fare ciò il software legge tramite seriale i valori dall'Arduino (per questo è necessario scrivere su monitor seriale i valori che si vogliono trasmettere a MatLab) che viene collegato tramite USB al computer. Prima dell'esecuzione del programma bisogna verificare a quale porta USB del computer è connesso l'Arduino e bisogna anche altresì verificare con quale "baud rate" è stata inizializzata la seriale di Arduino (si consiglia di impostarlo a 115200) e fare in modo che quest'ultimo sia lo stesso che usa il codice per leggere i dati.

Una volta partita l'esecuzione del codice questo apre, o crea qualora non esistesse, il file su cui salvare i dati tramite funzione "fopen()" in modalità "append", in modo da non sovrascrivere dati precedentemente salvati. Viene anche creata una prima riga di intestazione per rendere più comprensibile e facile la lettura dei dati. Successivamente il codice procede alla creazione dei grafici tramite l'istruzione "animatedline()" che funziona come il più semplice comando "plot", ma serve per creare grafici animati e permettere l'aggiornamento dinamico di questi durante l'esecuzione del programma. Proseguendo, nel software si trova il loop che permette la lettura dei valori da seriale tramite comando "scanf()" e l'aggiornamento dei grafici tramite le istruzioni "addpoints()" per aggiungere il nuovo punto alla linea e "drawnow" per poterlo visualizzare. Infine i nuovi dati vengono salvati su file con anche un'indicazione della data ed orario della scrittura.

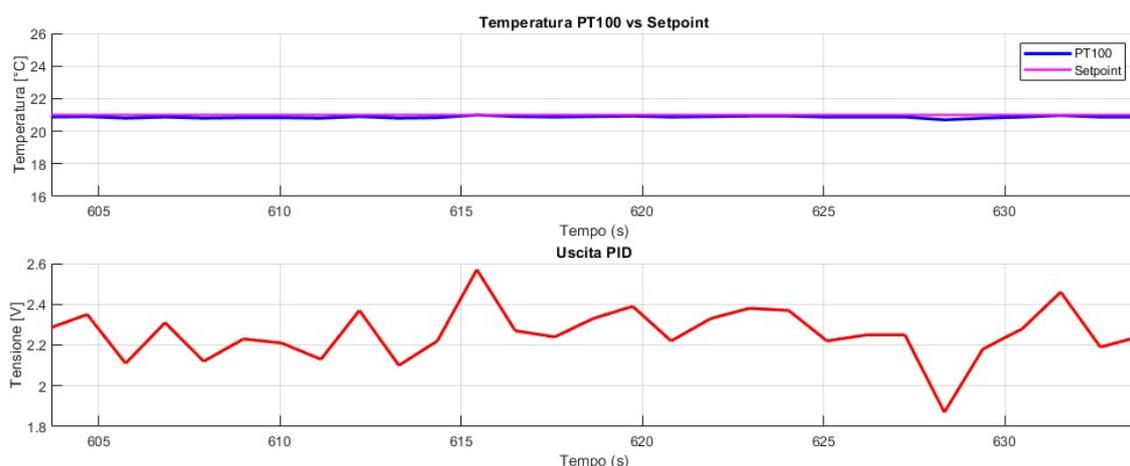


Fig. 3.4.3: esempio di GUI generata durante una sperimentazione in cui nel grafico superiore viene riportato l'andamento istantaneo della temperatura, in funzione del tempo, rilevata dalla PT100 con una linea blu e con una linea magenta viene invece indicato il valore di setpoint impostato. Nel grafico inferiore viene riportata con una linea rossa l'erogazione della tensione istantanea per il comando della valvola deviatrice, calcolata dal regolatore PID, in funzione del tempo

3.5 Verifica Funzionamento e Calibrazione

La fase di sperimentazione e test, effettuata direttamente sul Long Pipe, ha previsto il fissaggio a parete della sonda PT100 all'interno della camera di prova (Fig. 3.5.1 e Fig. 3.5.2), zona dove si vuole controllare la temperatura, ed il collegamento dei cavi per l'invio del segnale alla valvola regolatrice del flusso di refrigerante col positivo collegato all'uscita dell'amplificatore LM358 ed il negativo al ground comune.

L'apparato è stato collegato anche al computer presente in sala controllo (Fig. 3.5.3) in modo da poter sfruttare le funzionalità offerte dal codice MatLab. La frequenza di rilevazione da parte della PT100 è stata fissata a 1Hz ed il tempo delle misurazioni per ogni sperimentazione è stato fissato a 600 s (10 minuti) con qualche eccezione.



Fig. 3.5.1: camera di prova in vista laterale

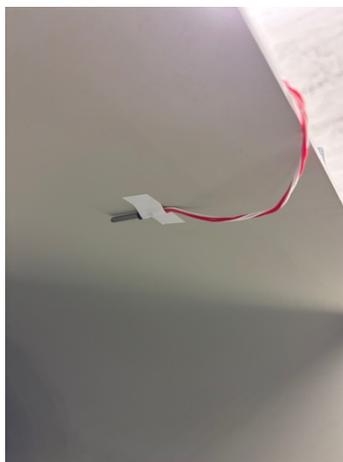


Fig. 3.5.2: PT100 installata all'interno della camera di prova

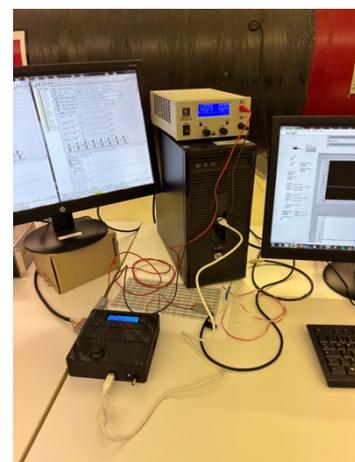


Fig. 3.5.3: postazione in sala controllo

Considerati i risultati ottenuti dalla seconda fase di sperimentazione descritta nella sezione 2.4, i nuovi test vengono svolti a regimi di rotazione dei ventilatori da 600 rpm a salire, per i quali era stato osservato un incremento della temperatura dovuto principalmente a fenomeni di attrito. Il regime di rotazione scelto per i nuovi test è 700rpm, in grado di generare un flusso d'aria con una velocità di circa 32 m/s, che in base a risultati già noti nell'arco di un tempo di misurazione di 150s, aveva fatto registrare una media di temperatura di 23,24°C con una deviazione standard di 0,20°C. Con i primi nuovi test eseguiti si è voluto analizzare il comportamento dell'andamento della temperatura a tre valori diversi di set point (23°C; 21°C e 19°C) con valori delle costanti proporzionale, integrativa e derivativa impostati in maniera generica, ma non completamente casuali, e pari a: $k_p = 2$, $k_i = 0.3$ e $k_d = 0.01$.

I risultati ottenuti sono i seguenti:

- Set Point 23°C: all'attivazione del sistema di controllo della temperatura, impostato per raggiungere una temperatura di 23°C, la galleria presentava una temperatura di circa 24.3°C. Come si nota dal grafico delle temperature, dal momento in cui viene attivato il controllo automatico (istante 0s) per poter osservare delle variazioni significative della temperatura in camera di prova è presente una latenza pari a circa 20s. L'andamento complessivo della temperatura presenta delle oscillazioni smorzate che rendono il sistema complessivamente lento nel raggiungere l'obiettivo. L'inizio della stabilizzazione si raggiunge a circa 500s, ma rimane comunque in un regime oscillatorio. La deviazione standard dei valori nell'intervallo 500-600s è di 0.10°C. (Fig. 3.5.4 e Fig. 3.5.5)

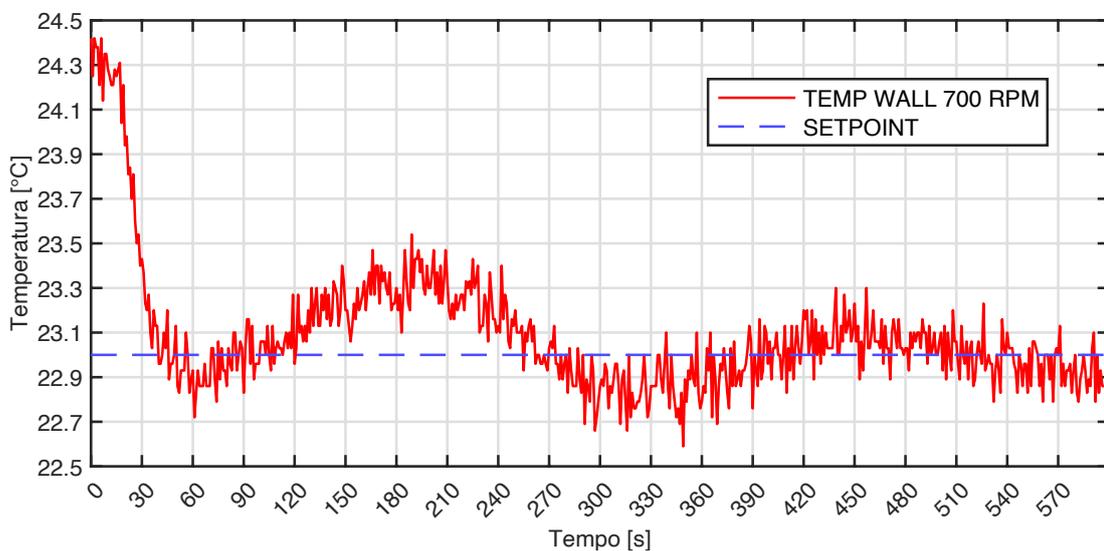


Fig. 3.5.4: andamento temperatura in funzione del tempo in secondi rappresentato da linea rossa e valore di set point a 23°C rappresentato da linea blu tratteggiata con $k_p = 2$; $k_i = 0.3$; $k_d = 0.01$

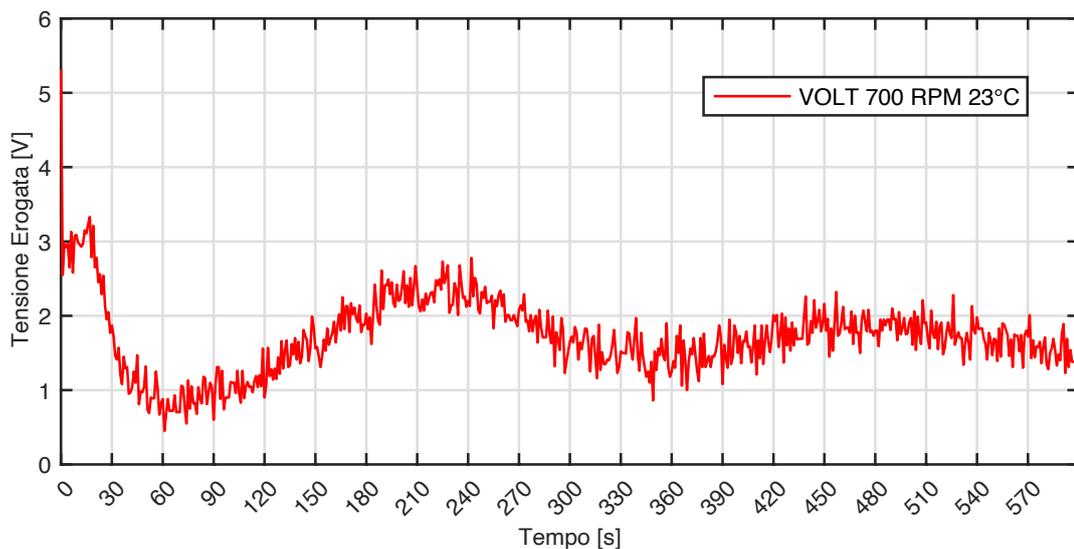


Fig. 3.5.5: andamento erogazione tensione in funzione del tempo in secondi rappresentato con una linea rossa per raggiungere un set point di 23°C con $k_p = 2$; $k_i = 0.3$; $k_d = 0.01$

- Set Point 21°C: la temperatura di partenza del flusso d'aria da portare a 21°C risulta di 23°C ed il tempo di latenza si è ridotto a 10s. Rispetto al caso precedente l'andamento della variazione della temperatura è molto più lineare, infatti non sono presenti oscillazioni significative e non è presente neanche overshoot. La temperatura target viene raggiunta gradualmente in circa 170s per poi stabilizzarsi lentamente nel tempo rimanente. La deviazione standard nell'intervallo 170-600s risulta pari a 0.09°C. (Fig. 3.5.6 e Fig. 3.5.7)

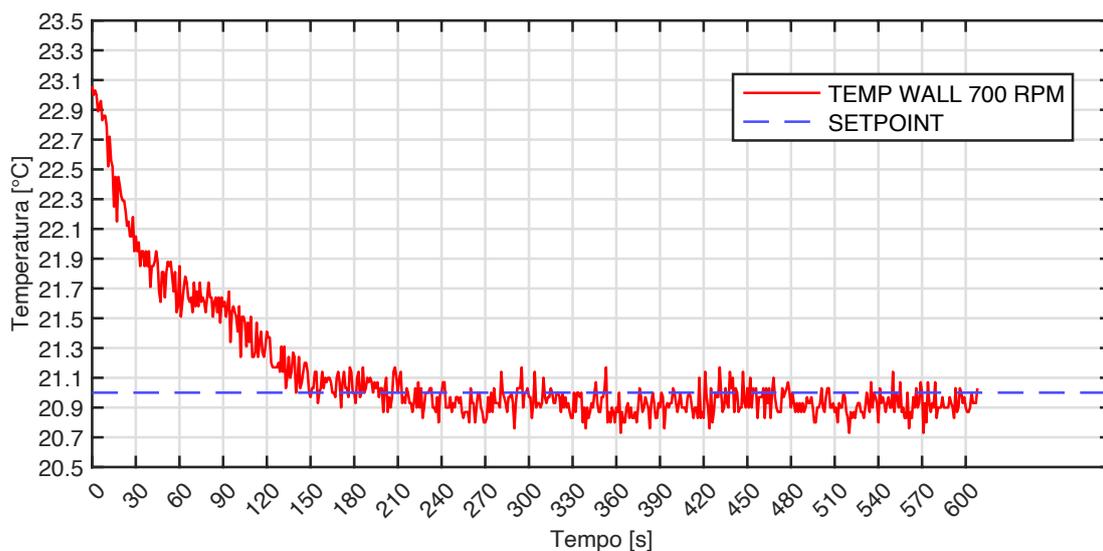


Fig. 3.5.6: andamento temperatura in funzione del tempo in secondi rappresentato da linea rossa e valore di set point a 21°C rappresentato da linea blu tratteggiata con $k_p = 2$; $k_i = 0.3$; $k_d = 0.01$

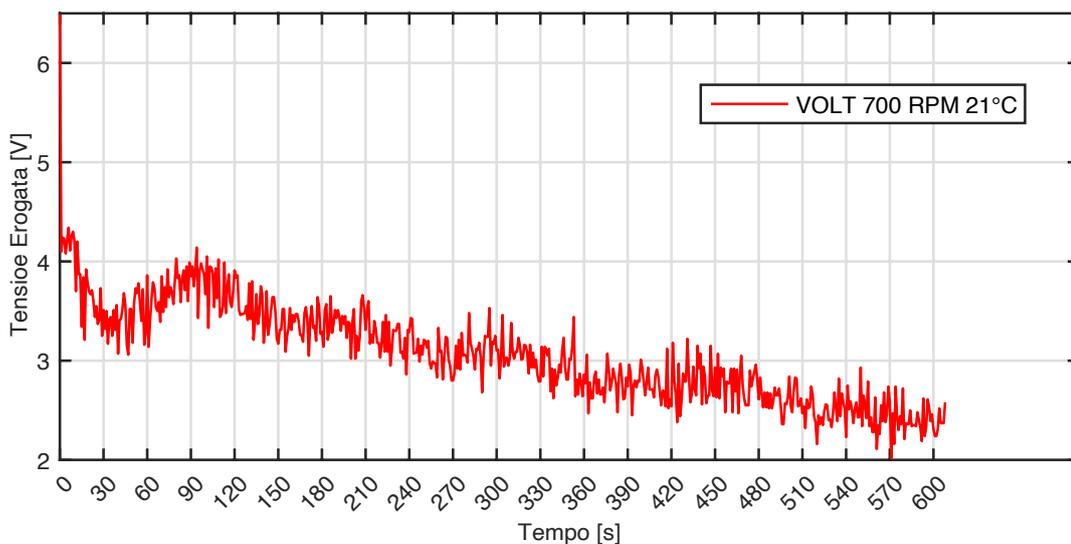


Fig. 3.5.7: andamento erogazione tensione in funzione del tempo in secondi rappresentato con una linea rossa per raggiungere un set point di 21°C con $k_p = 2$; $k_i = 0.3$; $k_d = 0.01$

- Set Point 19°C: la temperatura iniziale prima di iniziare il raffreddamento risulta di 21.2°C ed il tempo di latenza registrato per questa casistica è di 40s. La diminuzione della temperatura è molto graduale e mai brusca, ma ciò comporta il crearsi di una oscillazione di lungo periodo che non permette di raggiungere la temperatura impostata nei tempi delle rilevazioni (Fig. 3.5.8). Questo è dovuto principalmente al fatto che è presente un chiaro overshoot dovuto ad una troppa “aggressività” del sistema che, come si può notare dal grafico della tensione erogata (Fig. 3.5.9), ha portato ad una eccessiva apertura della valvola nell’intervallo tra 50 e 240s fornendo una tensione superiore a 6.5 V.

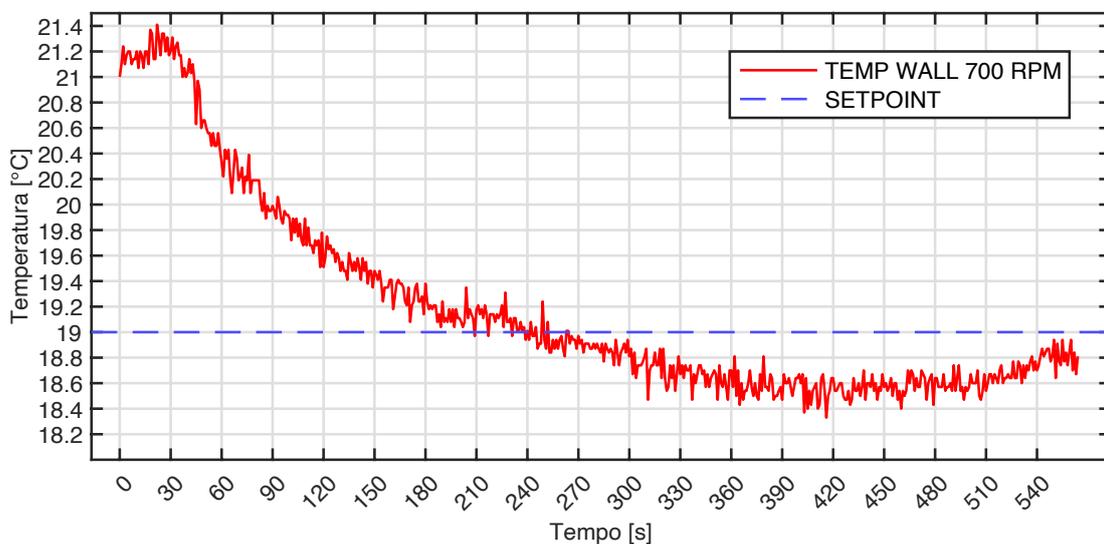


Fig. 3.5.8: andamento temperatura in funzione del tempo in secondi rappresentato da linea rossa e valore di set point a 19°C rappresentato da linea blu tratteggiata con $k_p = 2$; $k_i = 0.3$; $k_d = 0.01$

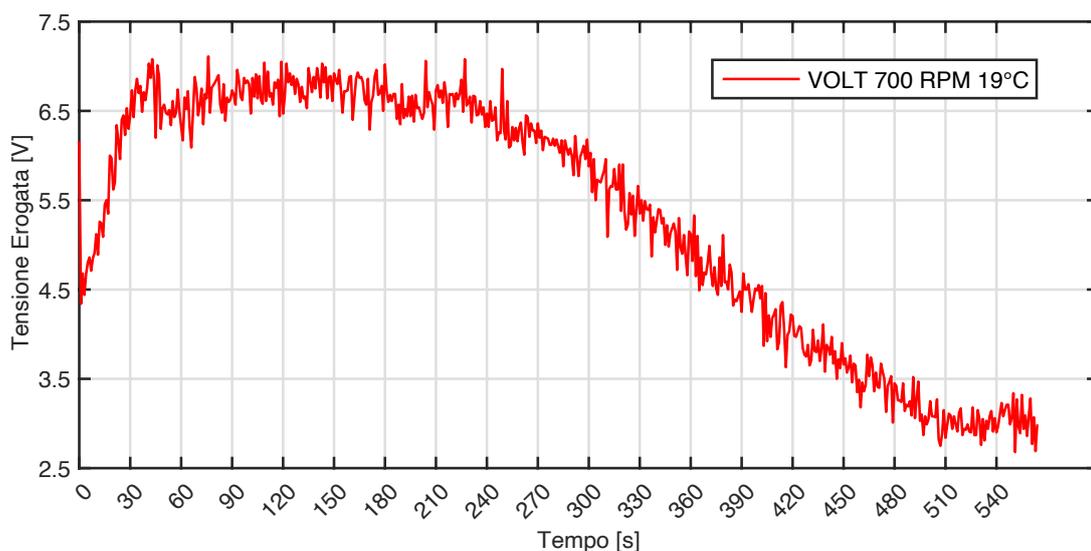


Fig. 3.5.9: andamento erogazione tensione in funzione del tempo in secondi rappresentato con una linea rossa per raggiungere un set point di 19°C con $k_p = 2$; $k_i = 0.3$; $k_d = 0.01$

Dai risultati ottenuti si evince che la casistica migliore risulta quella in cui viene impostato il valore target a 21°C, ma da tutte e tre le casistiche si può intravedere quello che un limite dell'impianto di gestione della temperatura ovvero la bassa velocità della valvola a variare il grado di apertura/chiusura. Questo è evidente specie nel secondo caso dove il controllore, quando la temperatura è quasi a regime, invia delle minime correzioni di posizione ogni secondo che la valvola non riesce a raggiungere; per questo è reso necessario il passaggio alla modalità manuale.

Preso atto di questi risultati ne conseguono altri relativi ad una seconda fase di sperimentazione atta a visualizzare la risposta del sistema a diversi valori delle costanti proporzionale, integrativa e derivativa in modo da determinare quale potesse essere la migliore combinazione delle tre, partendo dai valori delle tre costanti utilizzati nella prima fase di sperimentazione. Le rilevazioni si sono svolte con un regime di rotazione dei ventilatori sempre di 700rpm che ha portato il flusso ad una temperatura di circa 23°C, senza alcun tipo di controllo attivo, per poi attivare il sistema di controllo automatico impostato con un valore target di 21°C. Di seguito i risultati ottenuti:

1. $k_p = 1.7, k_i = 0.3, k_d = 0.01$: attivato il sistema è necessario dover attendere 40s prima di poter osservare un cambiamento significativo del valore di temperatura (Fig. 3.5.10). Nello stesso periodo di tempo il controllore richiede infatti una maggiore apertura della valvola arrivando a 5.5V (Fig. 3.5.11). Pur essendo presente un superamento del valore di target, l'andamento non presenta oscillazioni evidenti e si raggiunge in maniera già buona il set point da 250s. Da questo istante a fine misurazione la deviazione standard è pari a 0.07°C.

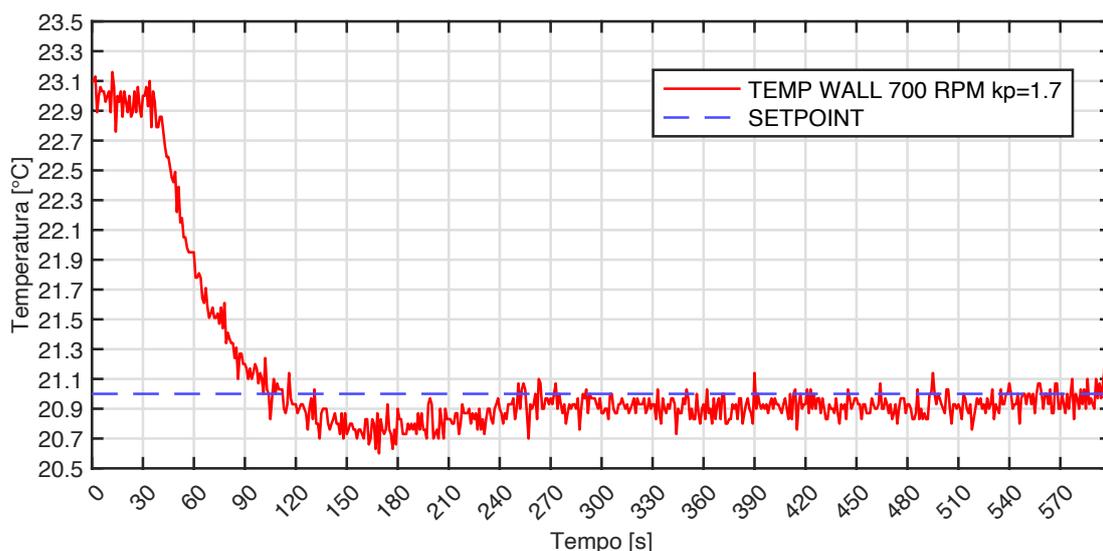


Fig. 3.5.10: andamento temperatura in funzione del tempo in secondi rappresentato da linea rossa e valore di set point a 21°C rappresentato da linea blu tratteggiata con $k_p = 1.7$; $k_i = 0.3$; $k_d = 0.01$

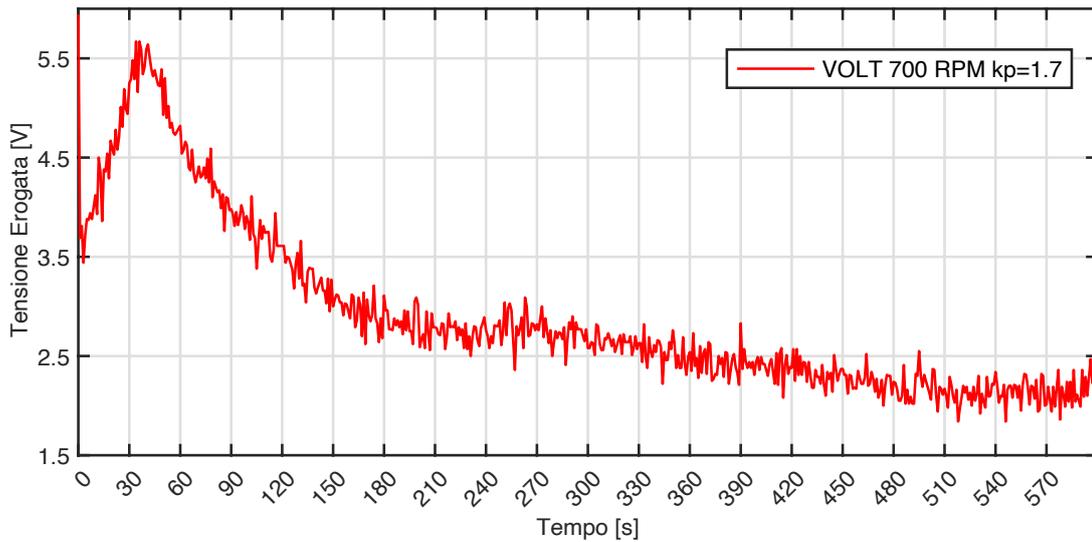


Fig. 3.5.11: andamento erogazione tensione in funzione del tempo in secondi rappresentato con una linea rossa per raggiungere un set point di 21°C con $k_p = 1.7$; $k_i = 0.3$; $k_d = 0.01$

- $k_p = 2, k_i = 0.5, k_d = 0.01$: per questa casistica si riscontra un tempo di 50s prima dell'inizio della variazione della temperatura. Come si nota dal grafico (Fig. 3.5.12) l'aumento del valore della k_i , atto voler cercare di velocizzare il raggiungimento del valore di regime, ha portato a generare delle oscillazioni e quindi ad una instabilità del sistema. Infatti è presente un notevole overshoot rispetto al valore target, facilmente comprensibile dal fatto che tra gli istanti di tempo 40s e 170s la valvola rimane completamente aperta (10v erogati) (Fig. 3.5.13) e per compensare questo effetto il sistema ha poi agito andando quasi a chiudere completamente l'afflusso di refrigerante, causando a sua volta un eccessivo aumento della temperatura.

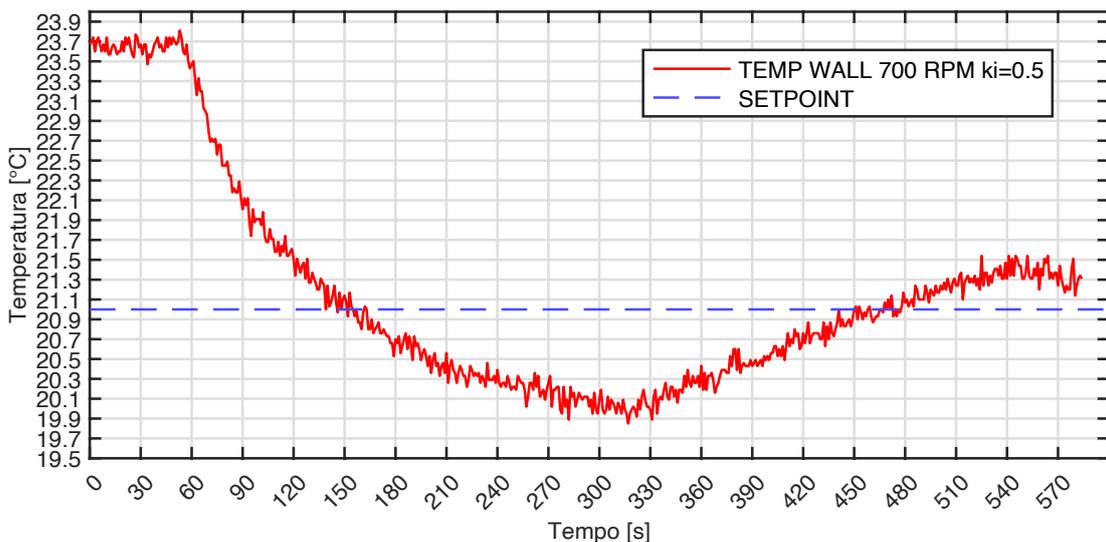


Fig. 3.5.12: andamento temperatura in funzione del tempo in secondi rappresentato da linea rossa e valore di set point a 21°C rappresentato da linea blu tratteggiata con $k_p = 2$; $k_i = 0.5$; $k_d = 0.01$

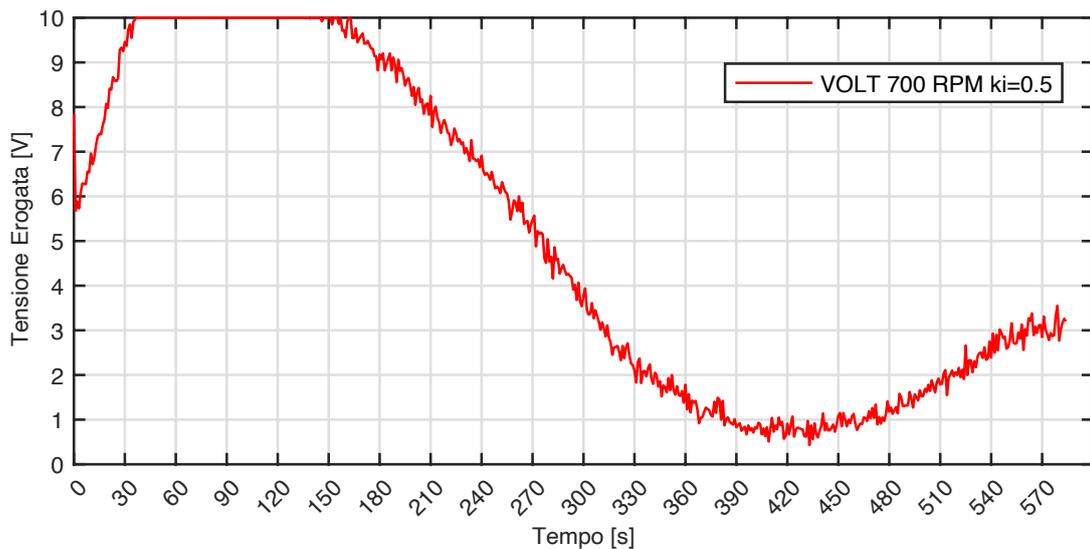


Fig. 3.5.13: andamento erogazione tensione in funzione del tempo in secondi rappresentato con una linea rossa per raggiungere un set point di 21°C con $k_p = 2$; $k_i = 0.5$; $k_d = 0.01$

3. $k_p = 2, k_i = 0.1, k_d = 0.01$: il tempo di attesa per osservare la variazione di temperatura ammonta a 30s cui sussegue un rapido calo fino all'istante 70s (5.5V di erogazione massima). Da questo istante la discesa della temperatura risulta più graduale e lenta rispetto ai casi precedenti raggiungendo il valore impostato con una buona stabilità all'istante di tempo 460s, presentando una deviazione standard di 0.09°C calcolata nell'intervallo 460-580s. (Fig. 3.5.14 e Fig. 3.5.15)

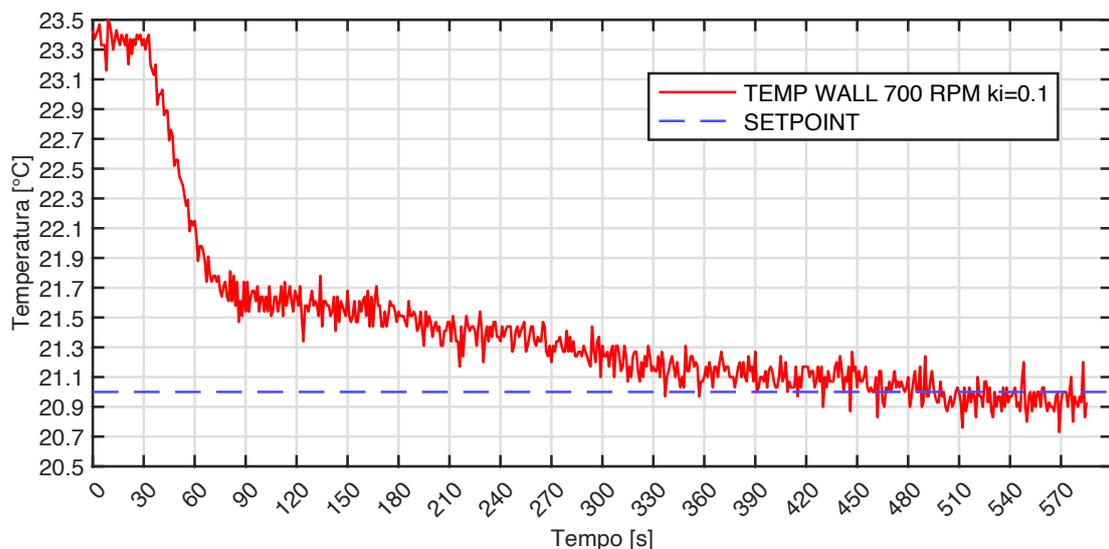


Fig. 3.5.14: andamento temperatura in funzione del tempo in secondi rappresentato da linea rossa e valore di set point a 21°C rappresentato da linea blu tratteggiata con $k_p = 2$; $k_i = 0.1$; $k_d = 0.01$

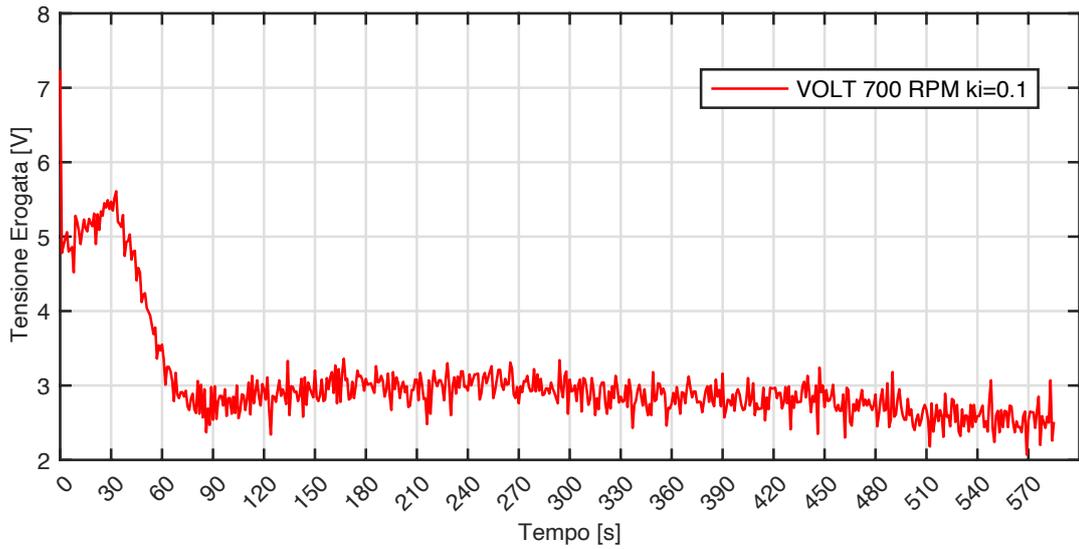


Fig. 3.5.15: andamento erogazione tensione in funzione del tempo in secondi rappresentato con una linea rossa per raggiungere un set point di 21°C con $k_p = 2$; $k_i = 0.1$; $k_d = 0.01$

4. $k_p = 2, k_i = 0.3, k_d = 0$: per questa casistica si osserva anzitutto una latenza di 30s per rilevare variazioni significative nel valore di temperatura. Anche in questa sperimentazione si osserva inizialmente un superamento del valore di riferimento (dovuto ad un'ampia apertura della valvola deviatrice) che però non ha comportato un ampio andamento oscillatorio, ma si ha una rapida stabilizzazione della temperatura, a seguito di esso, raggiunta a 250s con deviazione standard calcolata da questo istante a fine misurazione pari a 0.08°C. (Fig. 3.5.16 e Fig. 3.5.17)

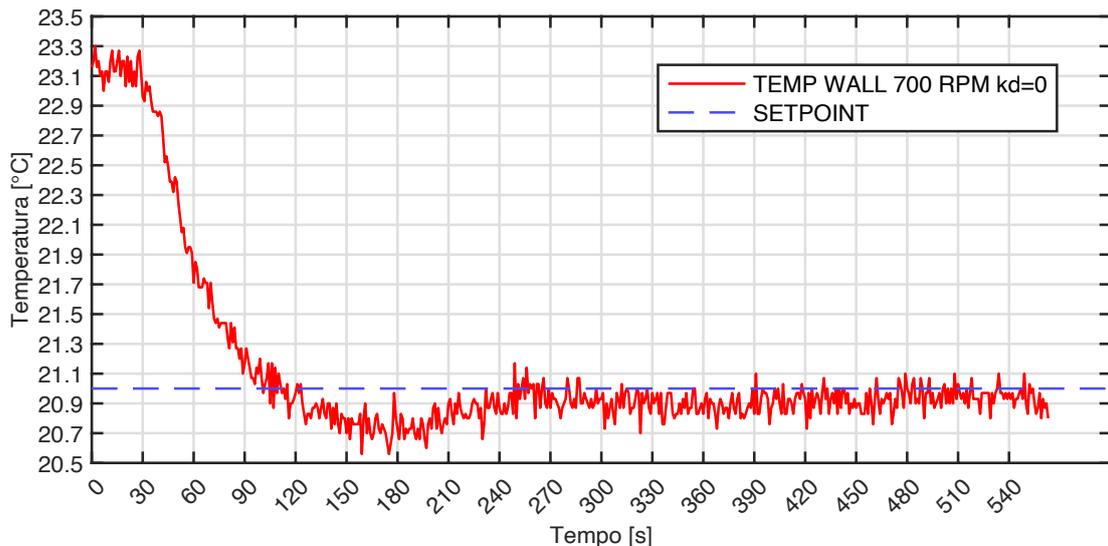


Fig. 3.5.16: andamento temperatura in funzione del tempo in secondi rappresentato da linea rossa e valore di set point a 21°C rappresentato da linea blu tratteggiata con $k_p = 2$; $k_i = 0.3$; $k_d = 0$

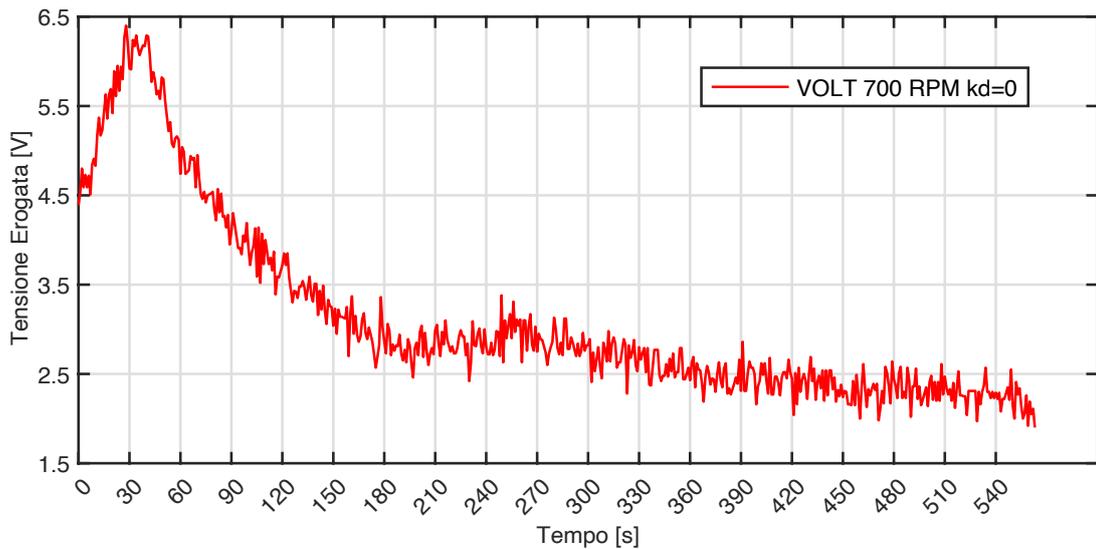


Fig. 3.5.17: andamento erogazione tensione in funzione del tempo in secondi rappresentato con una linea rossa per raggiungere un set point di 21°C con $k_p = 2$; $k_i = 0.3$; $k_d = 0$

5. $k_p = 1.5, k_i = 0.1, k_d = 0.05$: la latenza si attesta attorno ai 20s e complessivamente l'andamento della temperatura verso il valore di regime è lineare senza oscillazioni dovute ad un eccessivo raffreddamento (il voltaggio erogato risulta infatti basso e costante) grazie ad un aumento della k_d . Nonostante ciò, il sistema di controllo con questi valori delle costanti pecca di velocità, infatti si arriva alla temperatura target soltanto all'istante 430s. Da qui a fine misurazioni la deviazione standard risulta 0.08°C. (Fig. 3.5.18 e Fig. 3.5.19)

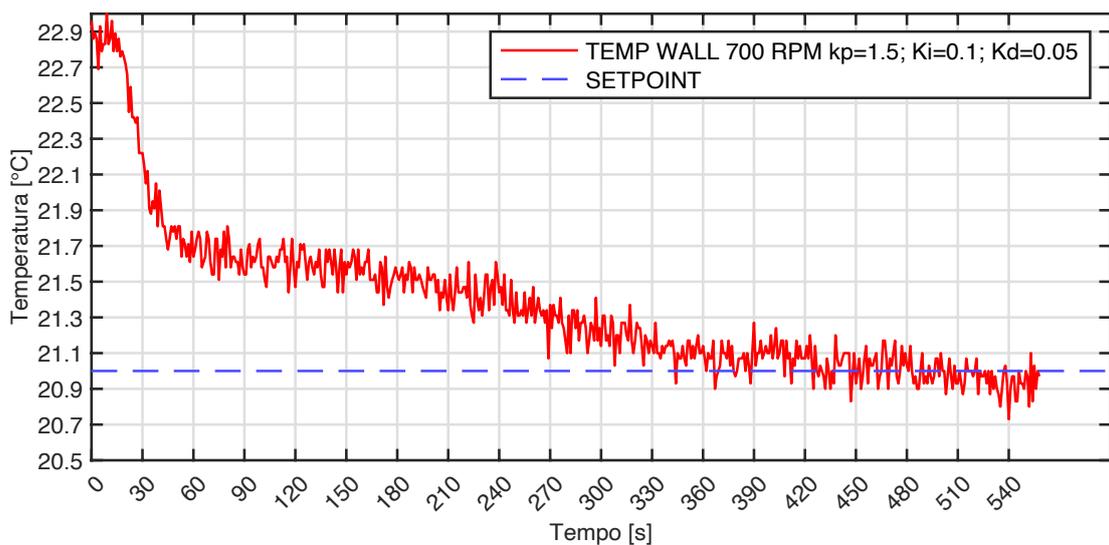


Fig. 3.5.18: andamento temperatura in funzione del tempo in secondi rappresentato da linea rossa e valore di set point a 21°C rappresentato da linea blu tratteggiata con $k_p = 1.5$; $k_i = 0.1$; $k_d = 0.05$

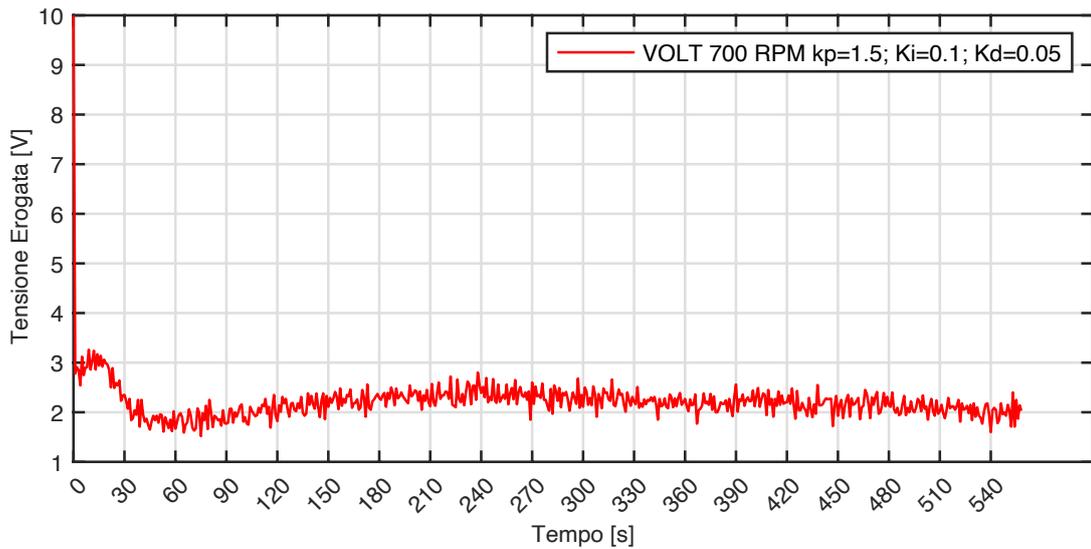


Fig. 3.5.19: andamento erogazione tensione in funzione del tempo in secondi rappresentato con una linea rossa per raggiungere un set point di 21°C con $k_p = 1.5$; $k_i = 0.1$; $k_d = 0.05$

6. $k_p = 1.7, k_i = 0.1, k_d = 0.05$: la latenza iniziale si attesta sui 20s, inoltre l'aumento della k_p , rispetto al caso precedente, ha comportato che sia presente un tratto a pendenza maggiore per un periodo di tempo più esteso, con la conseguenza che si raggiunge in un tempo più breve, pari a 350s, il valore di regime. Da segnalare che dall'istante 470s a fine misurazione il valore di temperatura tende ad allontanarsi dal valore di regime facendo pensare ad un possibile andamento oscillatorio della temperatura. Questo si riscontra anche dal valore di deviazione standard che nell'intervallo 350-580s risulta 0.11°C. (Fig. 3.5.20 e Fig. 3.5.21)

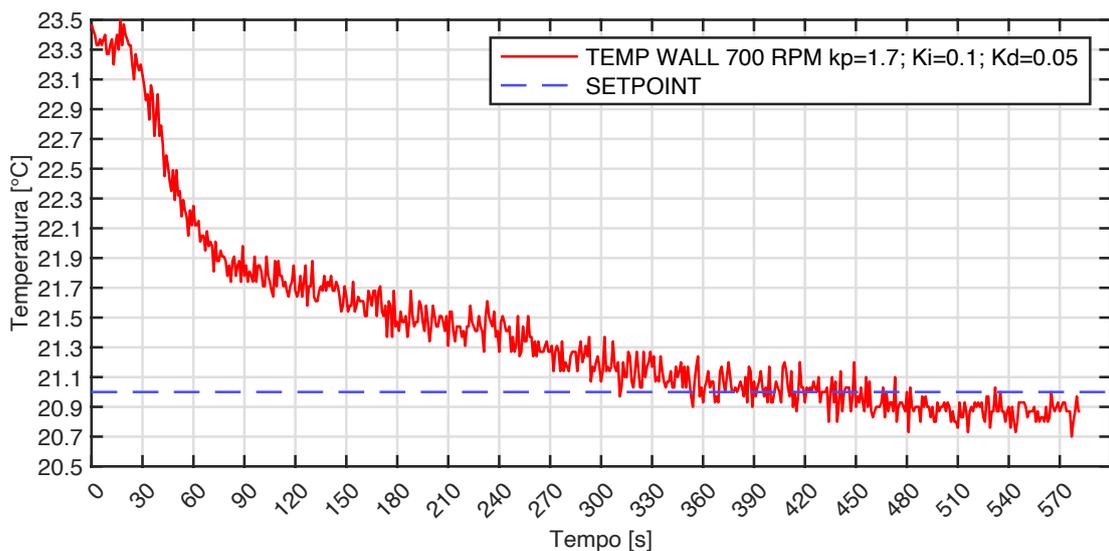


Fig. 3.5.20: andamento temperatura in funzione del tempo in secondi rappresentato da linea rossa e valore di set point a 21°C rappresentato da linea blu tratteggiata con $k_p = 1.7$; $k_i = 0.1$; $k_d = 0.05$

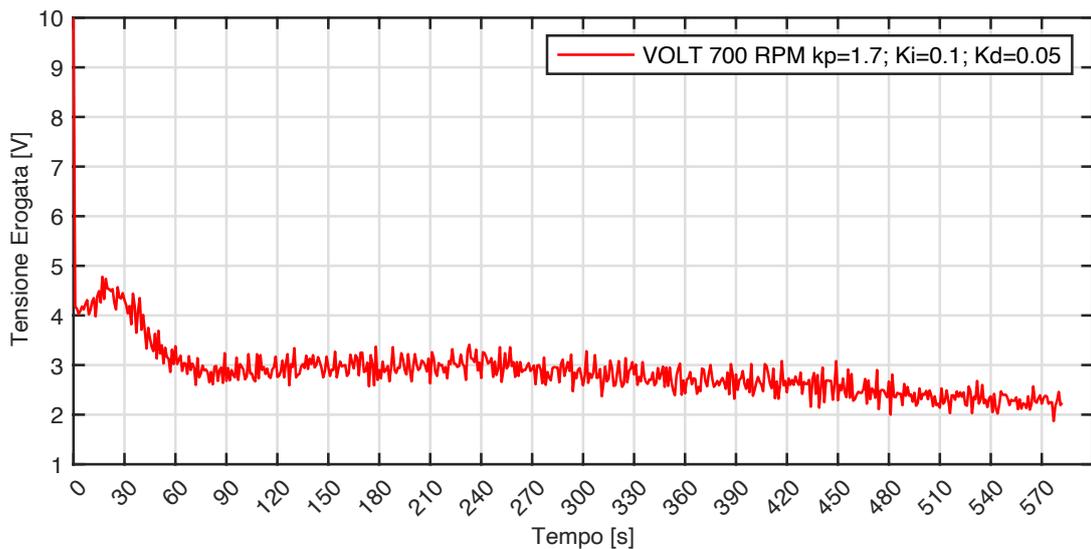


Fig. 3.5.21: andamento erogazione tensione in funzione del tempo in secondi rappresentato con una linea rossa per raggiungere un set point di 21°C con $k_p = 1.7$; $k_i = 0.1$; $k_d = 0.05$

In questa seconda fase di sperimentazione si è potuto quindi osservare come la variazione delle tre costanti caratteristiche della legge di controllo dei regolatori PID influisca sull'andamento, velocità e precisione nel raggiungere il valore di temperatura impostato.

Tra le varie combinazioni di k_p , k_i , k_d analizzate, quella che ha fornito il risultato peggiore è quella che prevede un $k_i = 0.5$ (casistica n.2) che non ha permesso alla temperatura di raggiungere il valore di set point nei tempi previsti per la sperimentazione.

Quella che invece ha fornito la precisione maggiore prevede $k_p = 1.7$, $k_i = 0.3$, $k_d = 0.01$ (casistica n.1). Con questi valori si raggiunge il target in 250s e la deviazione standard assume un valore di 0.07°C.

Riprendendo invece la casistica "Set Point 21°C" della prima fase di sperimentazione, in cui le costanti valevano $k_p = 2$, $k_i = 0.3$ e $k_d = 0.01$, questa è risultata come la combinazione di valori che ha permesso di arrivare a regime nel tempo più breve (170s) a scapito però di una minore precisione (deviazione standard pari a 0.09°C).

4 Conclusioni e Sviluppi Futuri

Il progetto realizzato ha affrontato il problema della misura e del controllo della temperatura all'interno della galleria del vento a ciclo chiuso Long Pipe del laboratorio CICLOPE.

Nella sezione "2 Strumento di Misura" dell'elaborato sono state prima evidenziate da un punto di vista teorico le principali cause dell'aumento della temperatura del flusso dell'aria, riscontrate nella presenza di attrito sia di contatto con le pareti che principalmente sotto forma di attrito viscoso, che causa il rilascio di calore nel sistema dovuto alla presenza di fenomeni dissipativi. L'attrito all'interno del fluido si è visto essere dovuto al trasferimento di molecole tra due particelle fluide vicine, che genera sforzi di taglio in opposizione alla direzione del moto del fluido. Si è poi successivamente visto che in presenza di moto turbolento (numeri di Reynolds elevati) lo scambio già citato avviene a livello particellare facendo aumentare in maniera più consistente gli sforzi viscosi con un conseguente aumento dei fenomeni dissipativi, trovando quindi una correlazione tra la velocità del flusso e l'intensità dei fenomeni di attrito. A questo punto si sono viste le principali conseguenze della variazione della temperatura riscontrate in alterazioni dei parametri di coefficiente di viscosità dinamica, pressione, densità ed in variazioni di velocità in misure di anemometria.

Lo strumento realizzato per la rilevazione della temperatura, basato su Arduino, che utilizza una sonda PT100 a quattro fili ha confermato la validità della scelta del sensore e affidabilità in una prima fase di sperimentazione. In una seconda fase sperimentale si è potuto osservare l'effettiva correlazione tra l'aumento della velocità del flusso dell'aria, ottenuta con un aumento dei regimi di rotazione dei ventilatori, e la variazione della temperatura nella camera di prova del Long Pipe. In particolare, si è notato come da una velocità del flusso di 27m/s (600rpm) sia necessario attivare il sistema di controllo di controllo della temperatura per poterne interrompere o limitare l'aumento (dovuto al regime di moto turbolento) in modo da mantenerla ad un valore stabile per poter garantire una buona riuscita e ripetibilità dell'esperimento.

Nella sezione "3 Controllo Automatizzato della Temperatura", partendo dalla teoria dei controlli automatici, lo studio ha portato allo sviluppo di un sistema di controllo automatico della temperatura posto in retroazione che possa funzionare a diversi valori di setpoint e che implementa un controllore di tipologia PID. Il sistema si occupa quindi, in modo automatico, di regolare il flusso di refrigerante verso lo scambiatore di calore,

agendo sull'apertura o chiusura di una valvola deviatrice, per poter mantenere la temperatura in camera di prova al valore di setpoint impostato.

Dai test sperimentali eseguiti si è dapprima verificata e valutata la risposta del sistema a tre diversi valori di setpoint di temperatura, da cui si è potuto evidenziare quale limite dell'impianto di raffreddamento la bassa velocità della valvola deviatrice a variare il suo grado di apertura/chiusura. Questo è stato notato in particolare quando il controllore invia frequenti richieste di minima correzione della posizione alla valvola (sistema quasi a regime) che non modifica la sua apertura o chiusura con la necessaria precisione e velocità, rendendo così necessario il passaggio alla modalità di regolazione manuale per migliorare ulteriormente precisione e stabilità nel raggiungere il valore di temperatura impostato.

Le ultime sperimentazioni hanno infine riguardato la valutazione dell'andamento della temperatura al variare del valore delle tre costanti specifiche dei controllori PID (proporzionale, integrativa, derivativa). Dai risultati sperimentali si sono quindi potute fornire due terne diverse di queste costanti: una che permette di raggiungere il valore di temperatura impostato meno velocemente, ma con una precisione maggiore ($k_p = 1.7, k_i = 0.3, k_d = 0.01$), mentre l'altra che porta il sistema a regime più velocemente, ma a scapito di una minore precisione ($k_p = 2, k_i = 0.3, k_d = 0.01$).

Lo studio e la sperimentazione hanno confermato la validità dell'approccio adottato e grazie alla modularità del sistema di controllo automatico realizzato, questo si presta facilmente ad eventuali sviluppi futuri che possano riguardare una migliore taratura delle tre costanti PID, al fine di ricercare la terna migliore per ogni diverso valore di setpoint di temperatura. Inoltre per migliorare la velocità di risposta del sistema si potrebbe pensare all'implementazione di un circuito di "feedforward" che, mediante la creazione di un modello matematico che esprima gli andamenti termici in tutto il circuito del Long Pipe a diverse velocità del flusso, possa agire anticipatamente sul grado di apertura o chiusura della valvola deviatrice senza attendere l'azione del meccanismo di retroazione migliorando così la risposta del sistema di controllo della temperatura.

5 Elenco delle Figure

Fig. 1.1: schema 3D del circuito “closed-loop” del Long Pipe CICLOPE	3
Fig. 2.1.1: sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali di Prandtl per lastra piana ad incidenza nulla	6
Fig. 2.1.2: grafico in scala doppio logaritmica che illustra la relazione tra il coefficiente di attrito globale C_F (asse y) col numero di Reynolds (asse x)	7
Fig. 2.2.1: comparativa tra gli andamenti della variabile caratteristica in funzione della temperatura dei tre sensori analizzati	11
Fig. 2.3.1: stampa del contenitore	14
Fig. 2.3.2: contenitore assemblato aperto	14
Fig. 2.3.3: contenitore assemblato chiuso	14
Fig. 2.4.1: sonda PT100 inserita in un foro durante una misurazione	16
Fig. 2.4.2: set up di misurazione zona pre scambiatore di calore	16
Fig. 2.4.3: rilevazioni pre scambiatore di calore alle 4 velocità utilizzate, con la temperatura rilevata sull’asse y e numero del campionamento eseguito con frequenza di 1Hz sull’asse x	17
Fig. 2.4.4: rilevazioni post scambiatore di calore alle 4 velocità utilizzate, con la temperatura rilevata sull’asse y e numero del campionamento eseguito con frequenza di 1Hz sull’asse x	18
Fig. 2.4.5: rilevazioni in camera di prova alle 4 velocità utilizzate, con la temperatura rilevata sull’asse y e numero del campionamento eseguito con frequenza di 1Hz sull’asse x	18
Fig. 2.4.6: andamento della temperatura a 150rpm in funzione del tempo misurato in secondi, in cui si evidenziano con croci blu i singoli campionamenti di temperatura a parete acquisiti con frequenza di 1Hz e con una linea rossa l’approssimazione dei dati eseguita	20
Fig. 2.4.7: andamento della temperatura a 300rpm in funzione del tempo misurato in secondi, in cui si evidenziano con croci blu i singoli campionamenti di temperatura a parete acquisiti con frequenza di 1Hz e con una linea rossa l’approssimazione dei dati eseguita	21

Fig. 2.4.8: andamento della temperatura a 450rpm in funzione del tempo misurato in secondi, in cui si evidenziano con croci blu i singoli campionamenti di temperatura a parete acquisiti con frequenza di 1Hz e con una linea rossa l'approssimazione dei dati eseguita	21
Fig. 2.4.9: andamento della temperatura a 600rpm in funzione del tempo misurato in secondi, in cui si evidenziano con croci blu i singoli campionamenti di temperatura a parete acquisiti con frequenza di 1Hz e con una linea rossa l'approssimazione dei dati eseguita	22
Fig. 2.4.10: andamento della temperatura a 700rpm in funzione del tempo misurato in secondi, in cui si evidenziano con croci blu i singoli campionamenti di temperatura a parete acquisiti con frequenza di 1Hz e con una linea rossa l'approssimazione dei dati eseguita	22
Fig. 2.4.11: andamento della temperatura a 800rpm in funzione del tempo misurato in secondi, in cui si evidenziano con croci blu i singoli campionamenti di temperatura a parete acquisiti con frequenza di 1Hz e con una linea rossa l'approssimazione dei dati eseguita	23
Fig. 3.1.1: schema a blocchi di un sistema di controllo automatico in catena aperta ...	26
Fig. 3.1.2: schema a blocchi di un sistema di controllo automatico in catena chiusa (retroazione)	26
Fig. 3.1.3: schema a blocchi semplificato di un sistema di controllo automatico in catena chiusa	27
Fig. 3.2.1: schema a blocchi generico di un controllore PID	29
Fig. 3.3.1: gruppo frigorifero all'esterno della struttura del laboratorio CICLoPE	32
Fig. 3.3.2: gruppo di ricircolo del refrigerante con valvola di regolazione del flusso e scambiatore di calore sulla sinistra.....	33
Fig. 3.3.3: dettaglio valvola deviatrice del flusso refrigerante	33
Fig. 3.4.1: piedinatura amplificatore LM358.....	36
Fig. 3.4.2: sistema di controllo assemblato.....	36
Fig. 3.4.3: esempio di GUI generata durante una sperimentazione in cui nel grafico superiore viene riportato l'andamento istantaneo della temperatura, in funzione del tempo, rilevata dalla PT100 con una linea blu e con una linea magenta viene invece indicato il valore di setpoint impostato. Nel grafico inferiore viene riportata con una linea	

rossa l'erogazione della tensione istantanea per il comando della valvola deviatrice, calcolata dal regolatore PID, in funzione del tempo.....	38
Fig. 3.5.1: camera di prova in vista laterale	39
Fig. 3.5.2: PT100 installata all'interno della camera di prova	39
Fig. 3.5.3: postazione in sala controllo.....	39
Fig. 3.5.4: andamento temperatura in funzione del tempo in secondi rappresentato da linea rossa e valore di set point a 23°C rappresentato da linea blu tratteggiata con $k_p = 2$; $k_i = 0.3$; $k_d = 0.01$	40
Fig. 3.5.5: andamento erogazione tensione in funzione del tempo in secondi rappresentato con una linea rossa per raggiungere un set point di 23°C con $k_p = 2$; $k_i = 0.3$; $k_d = 0.01$	40
Fig. 3.5.6: andamento temperatura in funzione del tempo in secondi rappresentato da linea rossa e valore di set point a 21°C rappresentato da linea blu tratteggiata con $k_p = 2$; $k_i = 0.3$; $k_d = 0.01$	41
Fig. 3.5.7: andamento erogazione tensione in funzione del tempo in secondi rappresentato con una linea rossa per raggiungere un set point di 21°C con $k_p = 2$; $k_i = 0.3$; $k_d = 0.01$	41
Fig. 3.5.8: andamento temperatura in funzione del tempo in secondi rappresentato da linea rossa e valore di set point a 19°C rappresentato da linea blu tratteggiata con $k_p = 2$; $k_i = 0.3$; $k_d = 0.01$	42
Fig. 3.5.9: andamento erogazione tensione in funzione del tempo in secondi rappresentato con una linea rossa per raggiungere un set point di 19°C con $k_p = 2$; $k_i = 0.3$; $k_d = 0.01$	42
Fig. 3.5.10: andamento temperatura in funzione del tempo in secondi rappresentato da linea rossa e valore di set point a 21°C rappresentato da linea blu tratteggiata con $k_p = 1.7$; $k_i = 0.3$; $k_d = 0.01$	43
Fig. 3.5.11: andamento erogazione tensione in funzione del tempo in secondi rappresentato con una linea rossa per raggiungere un set point di 21°C con $k_p = 1.7$; $k_i = 0.3$; $k_d = 0.01$	44
Fig. 3.5.12: andamento temperatura in funzione del tempo in secondi rappresentato da linea rossa e valore di set point a 21°C rappresentato da linea blu tratteggiata con $k_p = 2$; $k_i = 0.5$; $k_d = 0.01$	44

Fig. 3.5.13: andamento erogazione tensione in funzione del tempo in secondi rappresentato con una linea rossa per raggiungere un set point di 21°C con $k_p = 2$; $k_i = 0.5$; $k_d = 0.01$	45
Fig. 3.5.14: andamento temperatura in funzione del tempo in secondi rappresentato da linea rossa e valore di set point a 21°C rappresentato da linea blu tratteggiata con $k_p = 2$; $k_i = 0.1$; $k_d = 0.01$	45
Fig. 3.5.15: andamento erogazione tensione in funzione del tempo in secondi rappresentato con una linea rossa per raggiungere un set point di 21°C con $k_p = 2$; $k_i = 0.1$; $k_d = 0.01$	46
Fig. 3.5.16: andamento temperatura in funzione del tempo in secondi rappresentato da linea rossa e valore di set point a 21°C rappresentato da linea blu tratteggiata con $k_p = 2$; $k_i = 0.3$; $k_d = 0$	46
Fig. 3.5.17: andamento erogazione tensione in funzione del tempo in secondi rappresentato con una linea rossa per raggiungere un set point di 21°C con $k_p = 2$; $k_i = 0.3$; $k_d = 0$	47
Fig. 3.5.18: andamento temperatura in funzione del tempo in secondi rappresentato da linea rossa e valore di set point a 21°C rappresentato da linea blu tratteggiata con $k_p = 1.5$; $k_i = 0.1$; $k_d = 0.05$	47
Fig. 3.5.19: andamento erogazione tensione in funzione del tempo in secondi rappresentato con una linea rossa per raggiungere un set point di 21°C con $k_p = 1.5$; $k_i = 0.1$; $k_d = 0.05$	48
Fig. 3.5.20: andamento temperatura in funzione del tempo in secondi rappresentato da linea rossa e valore di set point a 21°C rappresentato da linea blu tratteggiata con $k_p = 1.7$; $k_i = 0.1$; $k_d = 0.05$	48
Fig. 3.5.21: andamento erogazione tensione in funzione del tempo in secondi rappresentato con una linea rossa per raggiungere un set point di 21°C con $k_p = 1.7$; $k_i = 0.1$; $k_d = 0.05$	49

6 Elenco delle Tabelle

Tabella 3.2.1: calcolo parametri PID con metodo Ziegler-Nichols 31

Tabella 3.2.2: calcolo parametri PID con metodo Tyreus-Luyben 31

7 Bibliografia

- [1] A. Talamelli & F. Perini “Vehicle Aerodynamics Lecture Notes” (2020)
- [2] L. Franceschelli “Anemometri a filo caldo: studio e progettazione di un sistema di calibrazione” (2018)
- [3] M. De Lucia & C. P. Mengoni “Misure di temperatura” (2020)
- [4] G. Buresti “Elements of Fluid Dynamics”, Imperial College Press (2012)
- [5] H. Alfredson, A. Johansson, I. Marusic, B. McKeon, P. Monkewitz, H. Nagib, J. Österlund, F. Persiani, L. Smits, K. R. Sreenivasan & A. Talamelli “The Long Pipe at CICLoPe” (2004)
- [6] M. Zanzi “Introduzione a Controlli Automatici” (2024)
- [7] M. Zanzi “Equazioni Differenziali e Trasformate di Laplace” (2023)
- [8] M. Zanzi “Retroazione” (2024)
- [9] M. Zanzi “Progetto Regolatori” (2024)
- [10] R. P. Borase, D. K. Maghade, S. Y. Sondkar “A review of PID control, tuning methods and applications”, Int. J. Dynamics Control 9:818–827 (2021).
- [11] P. Rocco “Lezione 12 – Regolatori PID”, Dispense di Automatica