



**POLITECNICO**  
**MILANO 1863**

## Relazione di laboratorio del corso di Sperimentazione nei Propulsori

AA 2023-2024

Autore	Codice Persona	Matricola	Indirizzo Email
Andrea Bassi			

**Professore:** Giulio Angelo Guido Solero

## **Abstract**

Questo documento raccoglie i report delle varie attività laboratoriali svolte nell'ambito del corso di Sperimentazione nei Propulsori. Per ciascuna attività è presentata una sintesi di richieste, metodi risolutivi e risultati criticamente valutati.

# Indice

<b>Abstract</b>	<b>1</b>
<b>Elenco delle tabelle</b>	<b>3</b>
<b>Elenco delle figure</b>	<b>4</b>
<b>Elenco dei simboli</b>	<b>5</b>
<b>1 Misure di temperatura mediante termocoppia</b>	<b>7</b>
1.1 Risoluzione . . . . .	7
<b>2 Stima dell'errore sistematico</b>	<b>10</b>
<b>3 Perdite per irraggiamento</b>	<b>11</b>
<b>4 Misura di portata mediante diaframma</b>	<b>12</b>
4.1 Presentazione del banco prova, dati e richieste . . . . .	12
4.2 Risoluzione . . . . .	13
<b>5 Misure al banco prova</b>	<b>15</b>
<b>A Risultati aggiuntivi dell'analisi statistica delle serie di dati</b>	<b>16</b>
A.1 Classi, frequenze relative e frequenze cumulate normalizzate . . . . .	16
<b>Bibliografia</b>	<b>18</b>

## Elenco delle tabelle

1.1	Valori estremi di temperatura . . . . .	7
1.2	Indici statistici delle due distribuzioni . . . . .	8
1.3	Errore statistico delle due distribuzioni . . . . .	9
4.1	Valori numerici delle quantità di Eq.(4.5) . . . . .	14
A.1	Risultati relativi alla serie corta . . . . .	16
A.2	Risultati relativi alla serie lunga . . . . .	17

## Elenco delle figure

1.1	Istogrammi delle due serie . . . . .	7
1.2	Frequenze relative delle diverse classi . . . . .	8
1.3	Frequenze cumulate normalizzate per entrambe le serie . . . . .	9
4.1	Schema del banco prova . . . . .	12
4.2	Schema del diaframma (Fonte: UNI EN ISO 5167-1 Figura 5) . . . . .	12

## Lista dei simboli

Variabile	Descrizione	Unità
$\beta$	Rapporto dei diametri	—
$C$	Coefficiente di efflusso	—
$D$	Diametro interno del condotto a monte	m
$d$	Diametro dell'orifizio	m
$\epsilon_{STAT}$	Errore statistico	°C
$F$	Frequenza cumulata normalizzata	—
$f$	Frequenza relativa	—
$\gamma$	Rapporto dei calori specifici	—
$\kappa$	Esponente isoentropico	—
$L$	Distanza relativa di una presa di pressione	—
$\mu$	Viscosità dinamica	Pa s
$N$	Numero di campioni	—
$\nu$	Gradi di libertà	—
$p$	Pressione statica del fluido	Pa
$Re_D$	Numero di Reynolds riferito a D	—
$\rho$	Densità	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma_T$	Deviazione standard della temperatura	°C
$\sigma_{\bar{T}}$	Deviazione standard della temperatura media	°C
$SK$	Coefficiente di skewness	—
$T$	Temperatura	°C
$t_{95}$	Parametro t per intervallo di confidenza al 95%	—
$\bar{T}$	Temperatura media	°C
$T_{MEDIANA}$	Temperatura mediana	°C



# 1 Misure di temperatura mediante termocoppia

**Dati e richieste** Vengono fornite due serie di misure di temperatura allo scarico di una camera di combustione, eseguite mediante termocoppia di tipo B. La prima è costituita da 1599 valori ("Serie corta"), la seconda da 9999 ("Serie lunga"). Entrambe le serie sono campionate con una frequenza di campionamento di 100 Hz e vengono fornite mediante file testuale (.txt).

Si chiede di svolgere l'analisi statistica dei dati.

## 1.1 Risoluzione

Si riportano i risultati emersi dall'elaborazione dei dati sperimentali. I calcoli sono stati svolti mediante il software *Matlab* e le funzioni built-in.

**Suddivisione in classi e istogramma** Entrambe le serie sono divise in 10 classi, di uguale ampiezza, costruite affinché non ci possa essere ambiguità nell'attribuzione dei valori: poiché le misure hanno 6 cifre decimali, gli estremi di classe sono definiti con 7 cifre decimali. L'estremo della prima classe viene scelto come il minimo valore di  $T$  a cui viene sottratto  $0.5e-7$  °C. Analogamente, l'estremo superiore dell'ultima classe viene calcolato sommando la stessa quantità al massimo valore di  $T$  nella serie. I valori estremi delle due serie sono mostrati in Tab.1.1, riportati integralmente per mettere in evidenza il numero di cifre decimali.

Serie	$T_{MIN}$ [°C]	$T_{MAX}$ [°C]
Corta	953.745910	1193.110960
Lunga	931.352290	1449.917970

Tabella 1.1: Valori estremi di temperatura

Gli istogrammi relativi alle due serie sono mostrati in Fig.1.1.

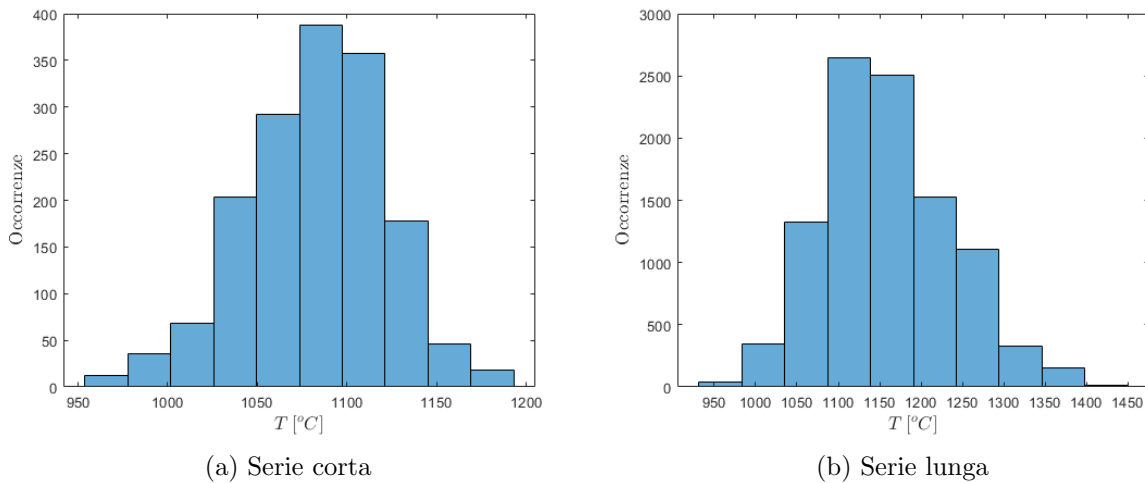


Figura 1.1: Istogrammi delle due serie



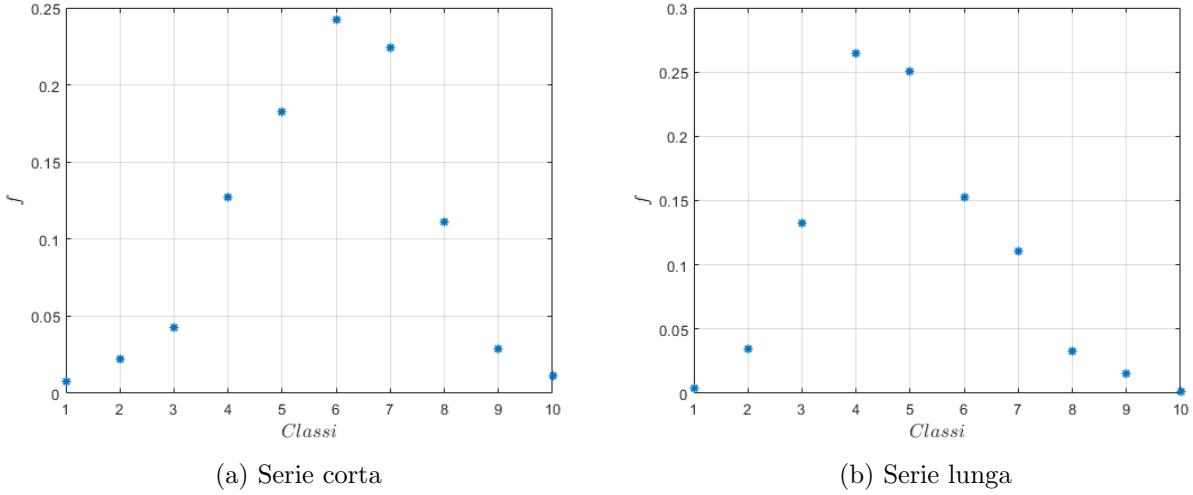


Figura 1.2: Frequenze relative delle diverse classi

Si osserva come entrambe le distribuzioni di dati siano simili alla distribuzione gaussiana, mostrando tuttavia una evidente asimmetria. Quest'ultima è quantificabile dal coefficiente di skewness, riportato in Tab.1.2.

**Calcolo delle frequenze relative e cumulate** Successivamente vengono riportate delle rappresentazioni grafiche delle frequenze relative ( $f$ ) e frequenze cumulate normalizzate ( $F$ ) delle varie classi.

**Calcolo degli indici statistici** L'analisi statistica dei dati viene svolta mediante il calcolo degli indici statistici relativi alle due serie di dati. In particolare, si riportano media ( $\bar{T}$ ) e mediana ( $T_{MEDIANA}$ ) delle due serie, nonché deviazione standard ( $\sigma_T$ ) e skewness ( $SK$ ) delle distribuzioni. I risultati sono presentati in Tab.1.2.

Indice	Serie corta	Serie lunga
$\bar{T}$ [°C]	1082.8	1159.2
$T_{MEDIANA}$ [°C]	1085.7	1152.4
$\sigma_T$ [°C]	39.147	77.841
$SK$	-0.27	0.40

Tabella 1.2: Indici statistici delle due distribuzioni

**Stima dell'errore statistico** Lo studio statistico delle due serie di dati si conclude con la stima dell'errore statistico ( $\epsilon_{STAT}$ ). Risulta necessario calcolare la deviazione standard del valore medio di temperatura ( $\sigma_{\bar{T}}$ ) secondo:

$$\sigma_{\bar{T}} = \frac{\sigma_T}{\sqrt{N}} \quad (1.1)$$

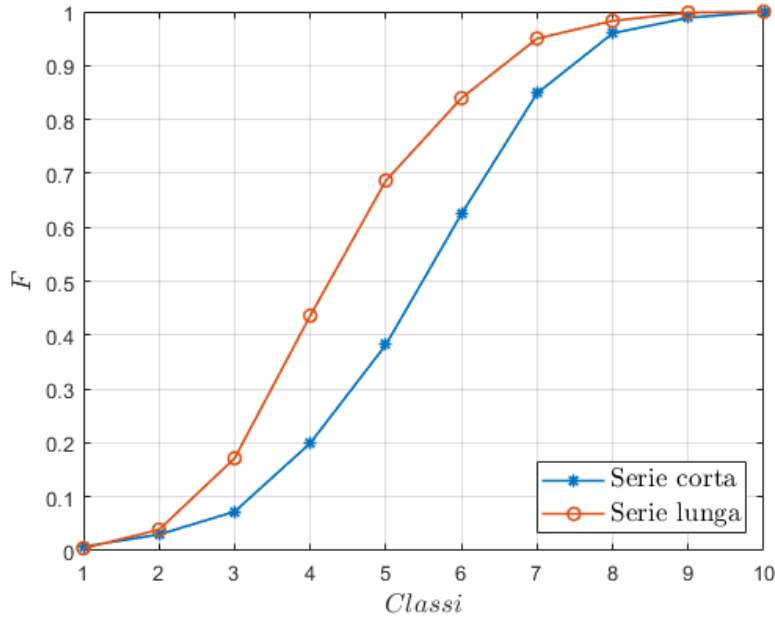


Figura 1.3: Frequenze cumulate normalizzate per entrambe le serie

dove  $N$  è il numero di campioni di ciascuna serie. Infine, il valore di  $\epsilon_{STAT}$  si ottiene con:

$$\epsilon_{STAT} = \sigma_{\bar{T}} t_{95\%} \quad (1.2)$$

dove  $t_{95}$  è ricavato dalla distribuzione t per un intervallo di confidenza al 95% (dove  $\nu = N - 1$ , dove 1 rappresenta il numero di gradi di libertà persi a seguito dell'introduzione di  $\bar{T}$ ).

Indice	Serie corta	Serie lunga
$t_{95\%}$	1.9614	1.9602
$\nu$	1598	9998
$\epsilon_{STAT} [^{\circ}\text{C}]$	$\pm 1.9202$	$\pm 1.5259$

Tabella 1.3: Errore statistico delle due distribuzioni

Da Tab.1.3 si nota come un numero elevato di campioni garantisca un errore statistico molto contenuto, che risulta minore di  $\sigma_T$  di un ordine di grandezza. Questo risultato deriva dalla presenza di  $\sqrt{N}$  in Eq.(1.1), il cui valore ammonta a  $\sim 40$  per la prima serie, a  $\sim 100$  per la seconda. Per quanto riguarda il valore di  $t_{95}$ , si osserva che tende al valore asintotico ( $\nu \rightarrow \infty$ ) di 1.960 in entrambi i casi, quindi l'influenza di tale parametro sull'errore statistico è pari per le due serie.

---

## 2 Stima dell'errore sistematico

---

### 3 Perdite per irraggiamento

## 4 Misura di portata mediante diaframma

### 4.1 Presentazione del banco prova, dati e richieste

Viene assegnato un banco prova per misure di portata mediante diaframma normalizzato, rappresentato schematicamente in Fig.4.1.

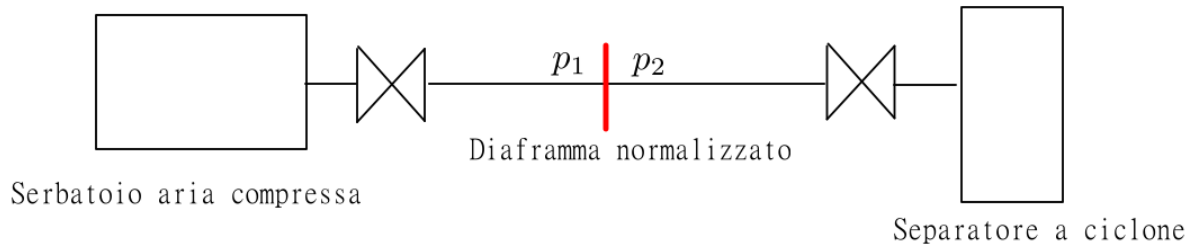


Figura 4.1: Schema del banco prova

In particolare, il separatore a ciclone opera nelle seguenti condizioni nominali:

- fluido di lavoro (fase gas): aria;
- portata di aria nelle condizioni operative nominali:  $96 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ;
- pressione di lavoro: 4 bar;
- temperatura di lavoro (ambiente): 300 K.

Al fine di misurare la portata d'aria si sceglie di utilizzare un diaframma normalizzato conforme alla Norma UNI EN ISO 5167-1, rappresentato in Fig.4.2 e con le seguenti caratteristiche:

- $D = 42 \text{ mm}$ ;
- $d = 9.94 \text{ mm}$ ;
- Prese di pressione sulle flange.

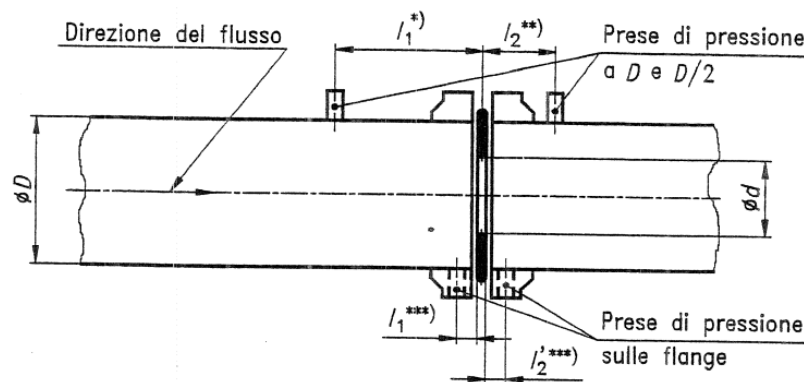


Figura 4.2: Schema del diaframma (Fonte: UNI EN ISO 5167-1 Figura 5)

**Richieste** Si chiede di valutare la pressione minima di esercizio nel serbatoio di alimentazione e di indicare il trasduttore di pressione differenziale da usare sul banco prova per la misura di portata.

## 4.2 Risoluzione

Facendo riferimento a Fig.4.1, si denotino con  $p_1$  e  $p_2$  le pressioni (in Pa) a monte e a valle del diaframma. Si indichi con  $T$  la temperatura di esercizio (in K).

### Ipotesi risolutive

- Le perdite di carico lungo il condotto e nelle valvole sono trascurate per mancanza di informazioni sull'impianto: di conseguenza  $p_1$  è la pressione incognita del serbatoio di alimentazione,  $p_2$  è la pressione operativa del separatore a ciclone.
- L'aria viene considerata come un gas perfetto, per cui  $\gamma = \kappa = 1.4$ , come indicato dalla Norma.
- Tutti i requisiti della Norma sono soddisfatti (Es. scabrosità del condotto, deformazione del diaframma, configurazione dello strumento).

**Riassunto dei dati e conversioni** Si riporta un riassunto sintetico dei dati del problema, convertiti in unità del Sistema Internazionale dove necessario.

Dato	Valore
$D$	4.2e-2 m
$d$	9.94e-3 m
$p_2$	4.053e5 Pa
$T_2$	300 K
$\gamma$	1.4
$q_{vN}$	96 Nm <sup>3</sup> /h
$q_m$	0.0344 kg/s

Al fine di convertire la portata volumetrica normalizzata in una portata massica si adotta la seguente espressione:

$$q_m = q_{vN} \rho_N / 3600 \quad (4.1)$$

con  $\rho_N = 1.293 \text{ kg/m}^3$  la densità dell'aria a 273.15 K e 101325 Pa.

**Svolgimento** La Norma fornisce una serie di equazioni da utilizzare per la misura di portata massica, al cui interno sono definite delle quantità calcolate secondo la Norma stessa. Le equazioni risolventi del problema sono le seguenti:

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1 - \beta^4}} \epsilon_2 \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho_2} \quad (4.2)$$

$$\epsilon_1 = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \frac{\Delta p}{\kappa p_1} \quad (4.3)$$

$$\epsilon_2 = \epsilon_1 \sqrt{1 + \frac{\Delta p}{p_2}} \quad (4.4)$$

Le quantità qui presenti, il cui valore calcolato è riportato in Tab.4.1, sono definite come:

- $\Delta p = p_1 - p_2$ ;
- $C$  ottenuto mediante Eq.(4.5);
- $\beta = d/D$ ;
- $\rho_2 = p_2/(RT_2)$ , entrambe note, con  $R = 287 \text{ J/(kgK)}$  per l'aria secca;
- $\kappa = \gamma = 1.4$ .

$C$  viene calcolato con la seguente espressione:

$$C = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.1840\beta^8 + 0.0029\beta^{2.5}(10^6/Re_D)^{0.75} + 0.0390L_1\beta^4(1 - \beta^4)^{-1} - 0.0337L'_2\beta^3 \quad (4.5)$$

dove:

- le quantità  $L$  sono calcolate in base alla Norma (per prese di pressione sulle flange vale  $L_1 = L'_2 = 25.4/D$ , con  $D$  in mm);
- il coefficiente di  $L_1\beta^4(1 - \beta^4)^{-1}$  è modificato in quanto  $D \leq 58.62 \text{ mm}$ ;
- $Re_D = 4q_m/(\pi\mu D)$ ;
- $\mu$  a 300 K ottenuta mediante interpolazione dei dati tabulati da Ref.[1].

Quantità	Valore
$C$	0.5979
$\beta$	0.2367
$\rho_2$	4.7073 kg/m <sup>3</sup>
$L_1, L'_2$	0.6048
$Re_D$	5.362e+4
$\mu$	1.945e-5 Pa·s

Tabella 4.1: Valori numerici delle quantità di Eq.(4.5)

Lo scopo dello svolgimento è determinare  $p_1$ : a questo fine è possibile riscrivere le Eq.(4.2), (4.3) e (4.4) in funzione di  $p_1$ , unica incognita del problema.

---

## 5 Misure al banco prova



---

## A Risultati aggiuntivi dell'analisi statistica delle serie di dati

### A.1 Classi, frequenze relative e frequenze cumulate normalizzate

Classe	Estremi	Occorrenze	$f$	$F$
1	43535 s74747			
2	43535 s74747			
3	43535 s74747			
4	43535 s74747			
5	43535 s74747			
6	43535 s74747			
7	43535 s74747			
8	43535 s74747			
9	43535 s74747			
10	43535 s74747			

Tabella A.1: Risultati relativi alla serie corta

Classe	Estremi	Occorrenze	$f$	$F$
1	43535 s74747			
2	43535 s74747			
3	43535 s74747			
4	43535 s74747			
5	43535 s74747			
6	43535 s74747			
7	43535 s74747			
8	43535 s74747			
9	43535 s74747			
10	43535 s74747			

Tabella A.2: Risultati relativi alla serie lunga

## Bibliografia

- [1] Yunus A. Cengel. *Termodinamica e trasmissione del calore*. McGraw-Hill.