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

Elenco delle tabelle

Elenco delle figure

Lista dei simboli

Variabile	Descrizione	Unità
β	Rapporto dei diametri	–
C	Coefficiente di efflusso	–
D	Diametro interno del condotto a monte	m
d	Diametro dell'orifizio	m
ϵ_{STAT}	Errore statistico	°C
F	Frequenza cumulata normalizzata	–
f	Frequenza relativa	–
γ	Rapporto dei calori specifici	–
κ	Esponente isoentropico	–
L	Distanza relativa di una presa di pressione	–
μ	Viscosità dinamica	Pa s
N	Numero di campioni	–
ν	Gradi di libertà	–
p	Pressione statica del fluido	Pa
Re_D	Numero di Reynolds riferito a D	–
ρ	Densità	kg/m^3
σ_T	Deviazione standard della temperatura	°C
$\sigma_{\overline{T}}$	Deviazione standard della temperatura media	°C
SK	Coefficiente di skewness	–
T	Temperatura	°C
t_{95}	Parametro t per intervallo di confidenza al 95%	–
$\overline{T}$	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

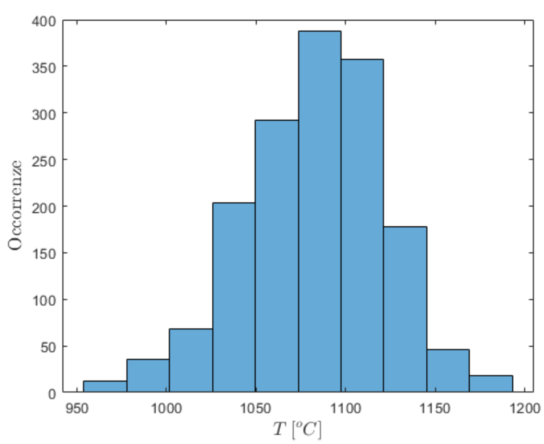
Si riportano i risultati emersi dall'elaborazione dei dati sperimentali. I calcoli sono stati svolti mediante il software *Matlab* e le funzioni built-in.

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 ^{o}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.

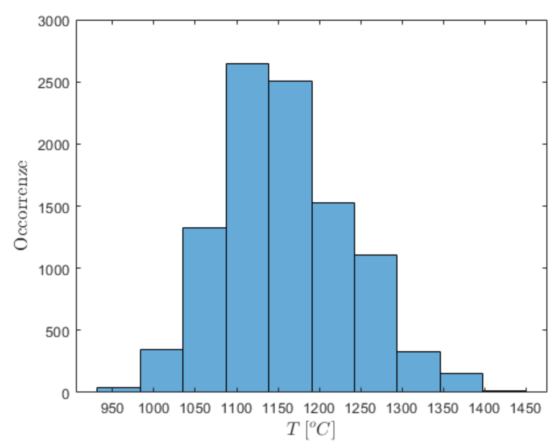
Serie	T_{MIN} [^{o}C]	T_{MAX} [^{o}C]
Corta	953.745910	1193.110960
Lunga	931.352290	1449.917970

Tabella 1.1: Valori estremi di temperatura

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

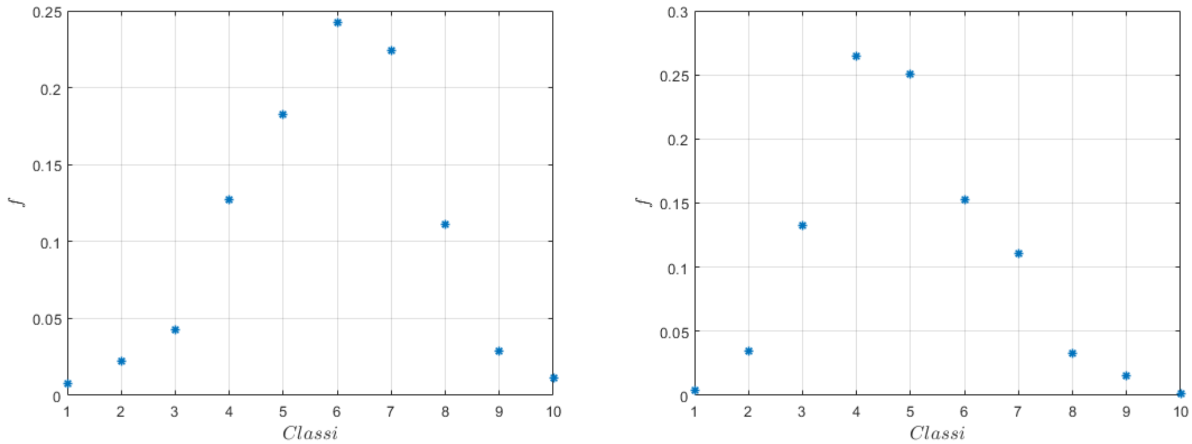


(a) Serie corta



(b) Serie lunga

Figura 1.1: Istogrammi delle due serie



(a) Serie corta (b) Serie lunga

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 ($\overline{T}$) e mediana ($T_{MEDIANA}$) delle due serie, nonché deviazione standard (σ_T) e skewness (SK) delle distribuzioni. I risultati sono presentati in Tab.1.2.

Indice	**Serie corta**	**Serie lunga**
$\overline{T}$ [°C]	1082.8	1159.2
$T_{MEDIANA}$ [°C]	1085.7	1152.4
σ_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 (ϵ_{STAT}). Risulta necessario calcolare la deviazione standard del valore medio di temperatura ($\sigma_{\overline{T}}$) secondo:

$$\sigma_{\overline{T}} = \frac{\sigma_T}{\sqrt{N}} \tag{1.1}$$

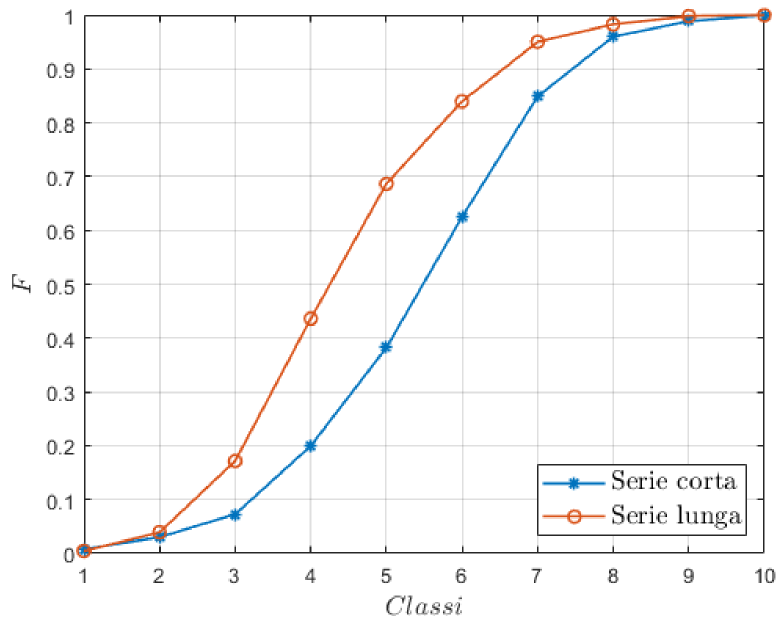


Figura 1.3: Frequenze cumulate normalizzate per entrambe le serie

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

$$\epsilon_{STAT} = \sigma_{\overline{T}} t_{95\%} \tag{1.2}$$

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

Indice	**Serie corta**	**Serie lunga**
$t_{95\%}$	1.9614	1.9602
ν	1598	9998
ϵ_{STAT} [°C]	±1.9202	± 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 σ_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 ($\nu \to \infty$) 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.

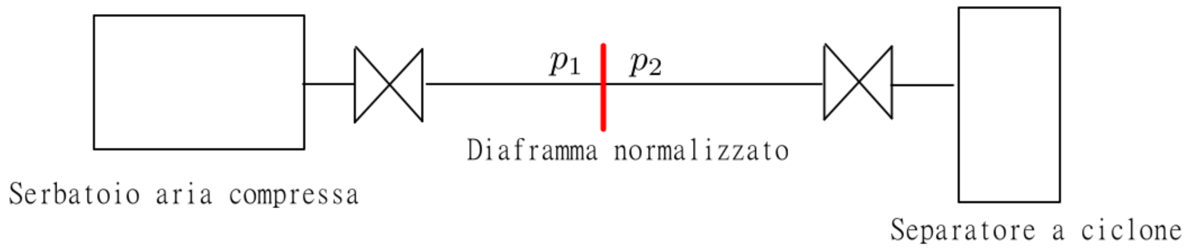


Figura 4.1: Schema del banco prova

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 Nm^3/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:

- $D = 42$ mm;
- $d = 9.94$ mm;
- Prese di pressione sulle flange.

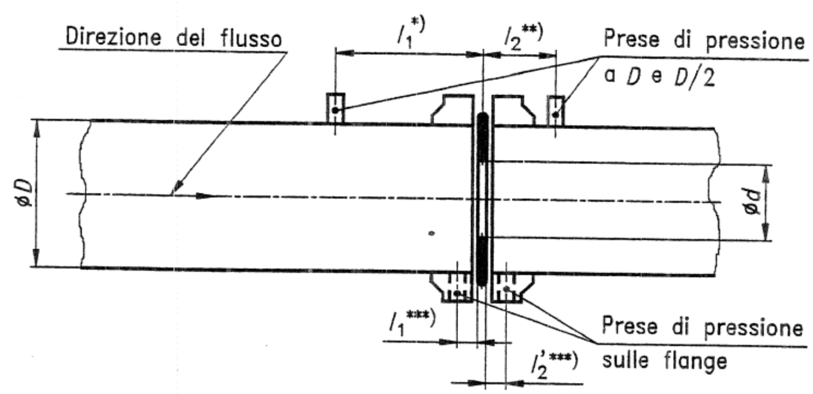


Figura 4.2: Schema del diaframma (Fonte: UNI EN ISO 5167-1 Figura 5)

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
γ	1.4
q_{vN}	96 Nm^3/h
q_m	0.0344 kg/s

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

$$q_m = q_{vN}\,\rho_N/3600 \tag{4.1}$$

con $\rho_{\mathrm{N}} = 1.293$ 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:

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

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

$$\epsilon_2 = \epsilon_1 \sqrt{1 + \frac{\Delta p}{p_2}} \tag{4.4}$$

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 $R = 287$ J/(kgK) per l'aria secca;
- $\kappa = \gamma = 1.4$.

C viene calcolato con la seguente espressione:

$$C = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.1} - 0.1840\beta^8 + 0.0029\beta^{2.5}(10^6/Re_D)^{0.75} + 0.0390L_1\beta^4(1-\beta^4)^{-1} - 0.0337L_2'\beta^3 \tag{4.5}$$

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 $D \leqslant 58.62$ mm;
- $Re_D = 4q_m/(\pi\mu D)$;
- μ a 300 K ottenuta mediante interpolazione dei dati tabulati da Ref.[1].

Quantità	**Valore**
C	0.5979
β	0.2367
ρ_2	4.7073 kg/m^3
L_1, L_2'	0.6048
Re_D	5.362e+4
μ	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. Il risultato è:

$$q_m - C_2(1 - C_1 + C_1\frac{p_2}{p_1})\sqrt{p_1^2 - p_1 p_2} \tag{4.6}$$

dove C_1, C_2 sono costanti ottenute rielaborando le equazioni e che assumono le seguenti espressioni:

$$C_1 = \frac{0.41 + 0.35\beta^4}{\gamma} \tag{4.7}$$

$$C_2 = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^2}}\frac{\pi}{4}d^2\sqrt{\frac{2\rho_2}{p_2}} \tag{4.8}$$

Definendo Eq.(4.6) come $\varepsilon(p_1)$, è possibile utilizzare il metodo di Newton-Raphson (implementato in *fzero* di Matlab) per trovare p_1. Sono utilizzate le tolleranze standard di Matlab. La condizione iniziale è $p_1 = 5e5$. Si osserva che il dominio della soluzione prevede $p_1 \geqslant p_2 \vee p_1 > 0$. Questo è coerente con la fisica del problema, che prevede una perdita di carico in corrispondenza del diaframma.

Risultati La risoluzione del problema numerico porta a determinare un valore di p_1 pari a 460340 Pa, mentre il valore di Δp a cavallo del diaframma ammonta a 55039 Pa.

Affinchè Eq.(4.3) sia valida è necessario che $p_2/p_1 \geqslant 0.75$: calcolando questo rapporto con la soluzione ottenuta si ottiene circa 0.87, quindi la condizione richiesta è verificata.

Per misurare la pressione a cavallo del diaframma è possibile utilizzare un manometro differenziale per gas. Una possibile scelta è il manometro differenziale *RS PRO RS DT*, con campo di misura da -2 bar a 2 bar.

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**	$\boldsymbol{f}$	$\boldsymbol{F}$
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.