

# Calibrazione degli strumenti e misura della costante di tempo di un termometro

CORSO DI TERMODINAMICA E LABORATORIO

(Prof. Daniele del Re, Prof. Eugenio Del Re, Prof. Francesco Santanastasio)

## 0.1 Scopo dell'esperienza

- misura della costante di tempo di un termometro digitale
- calibrazione di un sensore di pressione attraverso la legge di Boyle
- verifica della tenuta pneumatica del sistema cilindro-pistone

## 0.2 Variazione della temperatura indicata da un termometro in funzione del tempo

Usiamo l'espressione della potenza che fluisce attraverso uno spessore  $S$  di materiale di conduttanza unitaria  $H$  (trasmissione di calore per conduzione):

$$\frac{dQ}{dt} = -HS(T_1 - T_2)$$

Se si tratta di un termometro a contatto con una sorgente a temperatura  $\bar{T}$ , abbiamo la seguente espressione per il calore infinitesimo che fluisce attraverso le sue pareti:

$$\delta Q = -HS(T(t) - \bar{T})dt$$

Il calore viene quindi scambiato con il termometro che ha una capacità termica  $C$  e determina una variazione infinitesima della sua temperatura. La sua espressione è:

$$\delta Q = CdT$$

Uguagliando le due equazioni si ottiene:

$$CdT = HS(\bar{T} - T(t))dt$$

Imponendo che il termometro al tempo  $t = 0$  si trovi a temperatura  $T_0$ , possiamo integrare tra  $t = 0$  e  $t$  ottenendo:

$$T(t) = \bar{T} - (\bar{T} - T_0)e^{-t/\tau} \quad (1)$$

dove  $\tau = C/HS$  ed è detta costante di tempo.

## 0.3 Legge di Boyle

Un gas perfetto a temperatura costante segue la legge:

$$pV = nRT = \text{costante} \Rightarrow p = nRT/V \quad (2)$$

Se il gas si trova inizialmente a pressione atmosferica ( $p_0$ ), occupando un certo volume  $V_0$ , e ne cambiamo di poco il volume, possiamo sviluppare in serie di Taylor al primo ordine la pressione intorno a  $p_0$ :

$$p = p_0 + \frac{dp}{dV}(V - V_0) = p_0 - \frac{nRT}{V_0^2}(V - V_0) \quad (3)$$

Definendo  $\Delta p = p - p_0$  e  $\Delta V = V - V_0$  e mettendo insieme le equazioni 2 e 3 si ottiene

$$\frac{\Delta p}{p_0} = -\frac{\Delta V}{V_0} \quad (4)$$

**Figura 1.** Postazioni sperimentali 1-20



**Figura 2.** Postazioni sperimentali 24-30



## 0.4 Apparato sperimentale

- sistema pistone-cilindro: il pistone in grafite può scorrere all'interno del cilindro in pyrex in condizioni di “quasi” assenza di attrito. Il sistema pistone-cilindro non garantisce una perfetta tenuta e di conseguenza il numero di moli di gas interessate potrebbe non mantenersi costante per un tempo di misura lungo oppure per pressioni molto diverse da quella atmosferica. L'apparato possiede connettori a baionetta a bloccaggio rapido che permettono di collegare il cilindro con l'esterno o con un sistema di tubi;
- cilindro con volume fisso e pareti di metallo, tappo di plastica;
- sensore di moto rotatorio (mod. CI-6538 o mod. PS-2120A collegato tramite interfaccia USB link PS-2100), che permette di misurare lo spostamento lineare e quindi la posizione del pistone;
- sensore di pressione (mod. CI-6534 low pressure sensor [sensore di bassa pressione] o mod. PS-2181 dual pressure sensor collegato tramite interfaccia wireless airlink PS-3200), che permette di misurare la pressione dei gas studiati;
- sensore di temperatura (mod. CI-6605 stainless steel temperature sensor [sensore di temperatura con punta in acciaio inox] o PS-3201 wireless temperature sensor);
- due thermos;
- un termometro;
- bollitore;
- una siringa a tenuta;
- una bottiglia di vetro di volume  $V_b = (1111 \pm 5)cm^3$  (tenendo conto anche del volume occupato dal tappo quando è inserito);
- spessori di legno (distanziatori) di diverse misure;
- alcuni pesetti (es. bulloni)

## 0.5 Configurazione sensori (postazioni 1-20)

1. Software: *Datastudio* (pc desktop grandi con windows)
2. Sensore posizione angolare (mod. CI-6538) (jack giallo a sinistra, nero a destra)
  - impostare puleggia a *media* e spostamento a *lineare* (determinato da diametro puleggia);
  - impostare risoluzione angolare massima  $\Rightarrow$  sensibilità ovvero risoluzione = 1/1440 di giro;
  - attivare misura dello spostamento lineare (variazione di posizione in metri).
3. Sensore di bassa pressione (mod. CI-6534)
  - il range è nell'intervallo da 0 (che corrisponde alla pressione dell'ambiente esterno) a 10 kPa;
  - sensibilità ovvero risoluzione = 0.005 kPa (1 atm =  $10^5$  Pa = 100 kPa);
  - il sensore non va calibrato.
4. Sensore di temperatura (mod. CI-6605). Sensibilità ovvero risoluzione = 0.05 °C. Il sensore non va calibrato.
5. Una volta scelta la variabile nel pannello a sinistra, fare doppio click e scegliere il numero di cifre significative da acquisire (in base alla sensibilità ovvero risoluzione del sensore).
6. Impostare una frequenza di acquisizione comune per tutti gli strumenti (es. 10 Hz).

## 0.6 Configurazione sensori (postazioni 24-30)

1. Software: *Capstone* (pc desktop piccoli, avvio su partizione windows)
2. Sensore posizione angolare (mod. PS-2120A) (collegamento tramite cavo USB)
  - impostare puleggia a *media* (medium pulley [Groove]);
  - sensibilità ovvero risoluzione = 1/4000 di giro;
  - attivare misura dello spostamento lineare (variazione di posizione in metri), che sarà riportato in base alla dimensione della puleggia selezionata.
3. Sensore di bassa pressione (mod. PS-2181 + wireless link PS-3200)
  - il sensore ha due modalità di funzionamento. Può misurare due pressioni assolute (una per ciascuna porta) o una differenza di pressione tra le due porte (positiva se la pressione dalla porta 1 è maggiore di quella dalla porta 2);
  - l'intervallo di misura varia a seconda della modalità utilizzata. Misura assoluta [20,200] kPa. Misura relativa [-180;+180] kPa;
  - sensibilità ovvero risoluzione = 0.01 kPa (1 atm =  $10^5$  Pa = 100 kPa);
  - attivare misura della differenza di pressione. Collegare la porta 1 al sistema. Lasciare la porta 2 non collegata, a contatto con ambiente esterno;
  - il sensore non va calibrato.
4. Sensore di temperatura (mod. PS-3201 wireless). Sensibilità ovvero risoluzione = 0.01 °C. Il sensore non va calibrato.
5. Una volta scelta la variabile nel pannello a sinistra (Data Summary), fare click sul simbolo ingranaggio e scegliere il numero di cifre significative da acquisire (in base alla sensibilità ovvero risoluzione del sensore).
6. Impostare una frequenza di acquisizione comune per tutti gli strumenti (es. 10 Hz).

## 0.7 Operazioni per misura costante di tempo del termometro

1. Riempire i due thermos con abbondante acqua (500 ml)  $T_0 \sim 60^{\circ}C$  (usare il bollitore con acqua calda) e  $\bar{T} \sim 25^{\circ}C$  (ambiente).
2. Immergere il termometro nel thermos a temperatura a  $T_0$ . Attendere che raggiunga la temperatura  $T_0$  in modo stabile.
3. Far partire le misurazioni sul software di acquisizione dati.
4. Immergere il termometro nel thermos a temperatura  $\bar{T}$ .
5. Fare un grafico di  $T$  vs  $t$ . Assumendo la relazione specificata in equazione 1, estrarre la costante di tempo  $\tau$  in due modi diversi: 1) linearizzando la relazione ed usando le formule note relative al metodo dei minimi quadrati per un andamento rettilineo; 2) integrando la distribuzione di probabilità a posteriori (posterior) dei parametri del fit, come discusso a lezione.
6. Ripetere l'esperimento con una variante al punto 4: estrarre il termometro dal thermos a temperatura  $T_0$  e lasciarlo equilibrare con l'ambiente esterno, appoggiandolo sul tavolo a contatto con l'aria (si ricordi di rimuovere rapidamente l'acqua in eccesso sulla punta del termometro con un panno di carta). Confrontare la nuova costante di tempo con quella misurata in precedenza e motivare le differenze.

## 0.8 Operazioni per calibrazione del sensore di pressione

1. L'esperimento consiste nel misurare come varia la pressione di un gas (aria) a temperatura ambiente costante in funzione del volume da esso occupato. Il confronto dell'andamento osservato rispetto a quello previsto dalla legge di Boyle, viene utilizzato per calibrare il sensore di pressione.
2. Scegliere una posizione iniziale della siringa che corrisponda a  $V_0$ , cioè il volume di riferimento rispetto al quale calcolare le variazioni di volume  $\Delta V$ .
3. Collegare il sensore di pressione alla base della bottiglia di vetro.
4. Far partire la misurazione del sensore di pressione sul software di acquisizione dati.
5. Eseguire una serie di compressioni con la siringa (almeno 5 punti) in sequenza (ad esempio ad intervalli di  $\Delta V \approx 10$  ml), senza interrompere l'acquisizione dati. Dopo ogni compressione attendere alcuni secondi che il sistema si stabilizzi, raggiungendo la temperatura ambiente. Mantenere la posizione della siringa ferma prima della successiva compressione. NOTA: per realizzare quest'ultima condizione, è possibile utilizzare dei piccoli distanziatori in legno per fissare la posizione del pistone della siringa.
6. Dal grafico della pressione in funzione del tempo, ricavare i valori delle differenze di pressione  $\Delta p = p - p_0$  per ciascun valore di  $\Delta V = V - V_0$ .
7. Ricavare l'andamento  $\Delta p/p_0$  vs  $\Delta V/V_0$  (assumere che la pressione assoluta iniziale  $p_0$  sia quella del sensore di pressione atmosferica presente in aula).
8. Verificare l'accordo dei dati con quello in equazione 4 attraverso un fit lineare. Il coefficiente angolare della retta può essere utilizzato per calibrare il sensore di pressione per le prossime esperienze di laboratorio.
9. Ripetere tutto l'esperimento almeno una volta e confrontare i risultati per valutare le incertezze sistematiche nella misura.

## 0.9 Operazioni per verifica della tenuta del sistema cilindro-pistone

1. Lo scopo è verificare la tenuta pneumatica (e quindi misurare le perdite di aria) all'interno del sistema cilindro-pistone e del cilindro di metallo, in funzione del tempo e della pressione del gas. Queste informazioni sono utili per stimare alcuni effetti sistematici che potrebbero influenzare le future esperienze di laboratorio.
2. Posizionare il cilindro in verticale con il pistone posto circa alla metà della sua corsa. Il pistone deve essere collegato alla puleggia del sensore di posizione angolare mediante un filo, mantenuto in tensione da una piccola massa (basta una piccola graffetta metallica).
3. Collegare il sensore di pressione ed il sensore di posizione all'interfaccia per l'acquisizione dei dati.
4. Inizialmente, collegare il sensore di pressione al solo sistema cilindro-pistone (il cilindro di metallo non viene utilizzato).
5. Dopo aver chiuso il sistema, posizionare un pesetto di massa  $m$ , misurata con la bilancia, sopra il pistone e far partire l'acquisizione dati per circa un minuto. La differenza di pressione rispetto allo stato iniziale sarà  $mg/S$ , dove  $S$  è la superficie del pistone. A causa delle perdite di aria dal sistema, il pistone inizierà a scendere lentamente sotto l'effetto della pressione esterna.
6. Fare un grafico della posizione del pistone  $h$  in funzione del tempo  $t$ . Verificare un andamento approssimativamente lineare e stimare il coefficiente angolare  $\alpha$  della retta.
7. Ripetere la procedura per diverse masse (almeno 4 punti), ottenendo così valori di  $\alpha$  a diverse pressioni.
8. Fare un grafico della quantità  $\beta = \alpha \cdot S$  (espressa in  $\text{cm}^3/\text{min.}$ ), che rappresenta la variazione di volume per unità di tempo, in funzione della differenza di pressione esterna  $mg/S$  (espressa in kPa). A pressione e temperatura costanti,  $\beta$  è proporzionale alla perdita di materia dal sistema per unità di tempo.
9. Verificare l'andamento approssimativamente lineare e stimare il coefficiente angolare  $\omega$  di questa retta (espresso in  $\frac{\text{cm}^3}{\text{kPa min.}}$ ).
10. Ripetere tutto l'esperimento collegando anche il cilindro di metallo al sistema cilindro-pistone e confrontare i due valori di  $\omega$  ottenuti.