

Boris Igor Palella

Esercitazioni di Fisica Tecnica



Copyright © MMIX
ARACNE editrice S.r.l.

www.aracneeditrice.it
info@aracneeditrice.it

via Raffaele Garofalo, 133 A/B
00173 Roma
(06) 93781065

ISBN 978-88-548-2397-6

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento anche parziale,
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: marzo 2009

Indice

Capitolo 1. <i>Bilanci di massa e di energia</i>	15
Capitolo 2. <i>Secondo principio della termodinamica</i>	23
Capitolo 3. <i>Gas</i>	29
Capitolo 4. <i>Vapori</i>	47
Capitolo 5. <i>Perdite di carico</i>	61
Capitolo 6. <i>Aria umida</i>	65
Capitolo 7. <i>Introduzione ai meccanismi di scambio termico</i>	75
Capitolo 8. <i>Conduzione</i>	81
Capitolo 9. <i>Irraggiamento termico</i>	89
Capitolo 10. <i>Convezione</i>	101
Capitolo 11. <i>Scambiatori di calore</i>	107
Capitolo 12. <i>Problemi di ricapitolazione</i>	111
Appendice A. <i>Soluzione dei problemi proposti nel capitolo 12</i>	127
Appendice B. <i>Richiami di termodinamica</i>	239
Appendice C. <i>Richiami di trasmissione del calore</i>	261
Appendice D. <i>Dati termodinamici, abachi e tabelle</i>	277
Appendice E. <i>Risultati</i>	317

Prefazione

Questa raccolta di esercizi, nata sulla base dell'esperienza maturata dall'Autore nell'ambito delle lezioni tenute nei corsi di Fisica Tecnica delle Facoltà di Ingegneria e di Architettura, si pone come principale obiettivo quello di costituire un utile supporto esercitativo al testo "Lezioni di Fisica Tecnica" di Alfano, Betta, d'Ambrosio e Riccio, del quale può essere considerata un completamento.

La raccolta è suddivisa in dodici capitoli e cinque appendici. Nei primi undici capitoli sono presentate tracce di problemi, raggruppati per argomento con un livello di difficoltà progressivamente crescente, coerentemente con l'impostazione del testo di riferimento; di questi problemi vengono forniti unicamente i risultati, in Appendice E. Per fornire agli allievi un ulteriore sussidio didattico, che consenta loro di confrontarsi con problemi più complessi, che presuppongono la conoscenza di argomenti diversi del corso, nel dodicesimo capitolo sono riportate le tracce d'esame proposte dall'Autore nell'arco degli anni accademici 2006-07 e 2007-08; in questo caso, a differenza di quanto fatto per le tracce che si riferiscono ai singoli argomenti, in Appendice A vengono proposte e discusse le soluzioni.

Nelle Appendici B e C sono poi richiamati i concetti fondamentali di termodinamica applicata e trasmissione del calore utili alla impostazione di ciascun problema. Infine, nell'Appendice D, sono riportati i dati termodinamici necessari allo svolgimento delle tracce proposte e i risultati numerici relativi a quelle riportate nei primi undici.

Napoli, febbraio 2009

V. Betta, F.R. d'Ambrosio, G. Riccio

Premessa

Come risolvere un problema

- 1) Individuare i dati di ingresso e di uscita** – Individuare schematicamente quali siano i dati di ingresso (dati noti) e quali siano quelli di uscita (dati incogniti). Questa fase richiede che il testo del problema sia letto e riletto con molta attenzione.
- 2) Schematizzare il sistema e i dati** – Lo studente deve rappresentare mediante un disegno od un semplice schema (qualora non fornito dal testo) il sistema oggetto di interesse, (p.e. un sistema chiuso od aperto, la geometria del sistema, i flussi di energia coinvolti, ecc.) ed infine individuare in maniera scrupolosa il volume di controllo più adeguato alle esigenze imposte dal testo. Di fondamentale importanza è l'organizzazione dei dati di ingresso attraverso opportune tabelle riepilogative: esse rappresentano un vero e proprio "pannello di controllo" di estrema utilità sia in fase di analisi che di risoluzione. A tal scopo si rende necessario "etichettare" ciascuna delle trasformazioni (p.e. stato 1, trasformazione 1-2 ecc.) in atto all'interno del sistema ed i relativi stati termodinamici.
- 3) Definire le ipotesi** – Ogni problema necessita di congrue assunzioni finalizzate a semplificarne la soluzione; ovviamente tali assunzioni (p.e. condizioni di regime permanente, unidimensionalità, uso di equazioni costitutive o correlazioni) devono essere effettuate in maniera assolutamente pertinente, onde evitare clamorosi errori (p.e. uso della legge dei gas ideali per il calcolo delle proprietà dell'acqua liquida). Si osservi che questa fase è spesso implicitamente condotta nelle fasi (2) e (3).
- 4) Definire le proprietà da calcolare ai fini della individuazione degli stati termodinamici** – Sulla falsariga di quanto già anticipato nel punto (3) è necessario non solo organizzare le proprietà in opportune tabelle, ma anche "prevedere" quelle che sia necessario valutare per la soluzione del testo. Sarebbe preferibile che lo studente indicasse le fonti. Lo studente inoltre, è chiamato a far

molta attenzione alla didascalia delle tabelle riportate in appendice in modo tale da minimizzare eventuali errori di distrazione.

- 5) **Risolvere il problema** - A partire dalle assunzioni adottate nel punto (4) il problema deve essere prima risolto, per quanto possibile, in forma simbolica, in modo da confinare la fase di calcolo solo alla fine. In ogni caso è necessario il controllo della coerenza dimensionale di ciascuna relazione in modo da limitare al minimo errori legati alla distrazione ed all'uso improprio dei dati di ingresso. In questo modo, quando ogni equazione ed ogni dato sono ormai disponibili, è possibile sostituire i valori numerici.
- 6) **Controllare i risultati** – Il risultato ottenuto deve essere sottoposto ad una attenta ed approfondita analisi da parte dello studente. Innanzitutto occorrerà verificare se il valore numerico ottenuto sia compatibile con il suo significato fisico (p.e. un rendimento termodinamico è per definizione positivo e minore di uno, una temperatura assoluta è intrinsecamente positiva e così via). Di non secondaria importanza è il confronto dell'ordine di grandezza del risultato ottenuto con i dati di ingresso. Questa fase, se ben condotta, consente non solo di scoprire eventuali errori di calcolo o, peggio, di interpretazione della traccia, ma consente allo studente specialmente in sede d'esame la necessaria "tranquillità" non essendo a lui noto il risultato.

Capitolo 1

Bilanci di massa e di energia

Problema 1

Una comune utilitaria, caratterizzata da una sezione frontale di area $A = 1,60 \text{ m}^2$ ed un coefficiente di penetrazione aerodinamica $C_x = 0,330$, si trova in movimento alla velocità costante $w = 110 \text{ km/h}$. Sapendo che la forza di attrito esercitata dall'aria nei confronti del veicolo è esprimibile attraverso la relazione:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho \cdot w^2 \cdot A \cdot C_x$$

e che la densità dell'aria è pari a $\rho = 1,07 \text{ kg/m}^3$ determinare la potenza meccanica necessaria al veicolo per bilanciare la sola resistenza aerodinamica. Inoltre:

- 1) si ripeta il calcolo per una velocità $w = 150 \text{ km/h}$;
- 2) si ripeta il calcolo a parità di C_x , nel caso di un sommergibile militare assumendo che la superficie interessata dagli attriti sia la superficie laterale di un cilindro della lunghezza $L = 90 \text{ m}$ e diametro $D = 10 \text{ m}$, che la velocità di punta del mezzo sia pari a $36,0 \text{ km/h}$ e che la densità dell'acqua marina sia pari a $1,03 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

Problema 2

Una massa di gas, contenuta in un sistema pistone cilindro, occupa inizialmente un volume $V_1 = 90,0 \text{ l}$ alla pressione $p_1 = 100 \text{ kPa}$; assumendo che esso sia oggetto di una compressione quasi statica durante la quale la pressione ed il volume variano linearmente, si calcoli il lavoro di variazione di volume qualora nello stato finale la pressione ed il volume raggiungano rispettivamente valori pari a $3,00 \text{ bar}$ e $0,030 \text{ m}^3$. Si riporti infine sul piano p, V l'andamento qualitativo della trasformazione.

Problema 3

Una corrente di acqua liquida attraversa un condotto convergente tronco-conico con un diametro d'ingresso pari a 1,25 m. Desiderando raddoppiare la velocità del fluido in corrispondenza della sezione d'uscita del condotto, valutarne la lunghezza nell'ipotesi in cui la misura del suo angolo di apertura sia pari a $\pi/6$. Si consideri costante la densità del fluido.

Problema 4

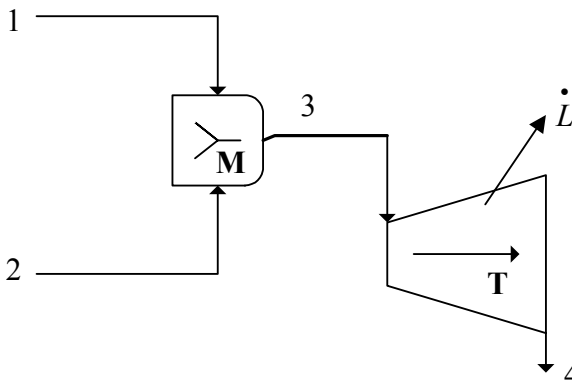
Un serbatoio cilindrico aperto di altezza $H = 20,0$ m e diametro $D = 1,50$ m riempito fino alla sua sommità, viene svuotato liberamente in virtù di un orifizio circolare del diametro di 4,00 cm praticato al centro della sua base inferiore. Assumendo che la velocità del fluido in corrispondenza dell'orifizio possa essere valutata mediante la relazione di Torricelli ($w = \sqrt{2gz}$ in cui g e z rappresentano rispettivamente il modulo dell'accelerazione di gravità e la quota del pelo libero del fluido durante lo svuotamento), calcolare il tempo di svuotamento.

Problema 5

Un sistema chiuso inizialmente in quiete di massa $m = 2,0$ kg è sottoposto ad una trasformazione in cui cede 5,97 kcal sotto forma di energia termica all'ambiente circostante portandosi ad una quota posta 700 m più in alto rispetto a quella iniziale. Assumendo che l'energia interna specifica del sistema diminuisca di 15,0 kJ/kg per effetto delle trasformazioni, valutare l'energia scambiata sotto forma di lavoro.

Problema 6

Due correnti 1) e 2) si mescolano in un miscelatore adiabatico M, a norma di quanto riportato schematicamente in figura.



La corrente 1) esibisce un'entalpia specifica pari a 1456 kJ/kg, una portata volumetrica pari a 208 m³/min ed una densità pari a 178 kg/m³, la seconda un'entalpia specifica pari a 3743 kJ/kg ed una portata massica pari a 650 kg/s. La

corrente risultante 3) viene inviata ad una turbina adiabatica T erogante una potenza meccanica pari a 650 MW, in condizioni di regime permanente. Trascurando i termini cinetici e potenziali calcolare:

- 1) la portata massica risultante dal mescolamento delle due correnti nel miscelatore adiabatico M;
- 2) l'entalpia del fluido risultante all'uscita della turbina.

Problema 7

Un sistema chiuso evolve secondo una trasformazione ciclica finalizzata alla conversione di energia termica in energia meccanica (ciclo diretto) costituita da cinque trasformazioni elementari nelle quali gli scambi energetici fra sistema ed ambiente sono schematizzati nella tabella qui di seguito riportata. Nell'ipotesi in cui il sistema fornisca all'ambiente una quantità di energia meccanica pari a 250 kJ valutare:

1. L_{12} .
2. Q_{45} ;
3. il rendimento termodinamico del ciclo.

Trasformazione	Energia scambiata sotto forma di calore	Energia scambiata sotto forma di lavoro
1-2	100 kcal	?
2-3	220 kJ	-115 kcal
3-4	-0,200 kWh	110 J
4-5	?	234 kJ
5-1	12 cal	-12 kJ

Problema 8

Il listino di una nota ditta costruttrice di climatizzatori domestici, riporta i seguenti prodotti, con i relativi dati di targa schematizzati nella tabella qui di seguito riportata. Si calcoli:

- 1) il COP_f ;
- 2) il COP_p ;
- 3) il consumo annuo di energia in kWh e la relativa spesa energetica nell'ipotesi in cui il dispositivo funzioni in continuo per 6 ore al giorno ininterrottamente per 8 mesi all'anno in condizioni di carico massimo. Si assuma pari a 0,180 €/kWh il costo unitario dell'energia elettrica.

DATI TECNICI	unità	Modello 1	Modello 2
Tensione/Frequenza	V/Hz	230/50	230/50
Potenza Frigorifera	Btu/h - W	9050-2650	12630-3700
Consumo	W	860	1060
Classe		A	A

Problema 9

12,5 kg di fluido evolvono in un impianto termico secondo un ciclo diretto. Il fluido riceve per ogni ciclo una quantità di calore pari a 1423 kJ/kg e cede una quantità di calore pari a 745 kJ/kg. Si determini:

- 1) il rendimento termodinamico del ciclo;

2) l'energia meccanica ceduta all'ambiente in 20 cicli.

Problema 10

Un sistema adiabatico, inizialmente a pareti rigide e fisse, comprende un resistore elettrico da $15,0 \Omega$ che è alimentato in corrente continua a $60,0 \text{ V}$ per un intervallo di tempo pari a 4 h e 35 min . Successivamente il sistema compie una trasformazione adiabatica per effetto della quale la sua energia interna si riporta al valore iniziale cedendo energia meccanica all'ambiente sotto forma di lavoro di variazione di volume. Si calcoli il lavoro meccanico del sistema (N.B. la potenza dissipata per effetto Joule [W] è data dal rapporto $\Delta V^2/R$ in cui ΔV [Volt] rappresenta la differenza di potenziale e R [Ω] la resistenza elettrica).

Problema 11

In un ciclo diretto vengono scambiate le quantità di calore qui di seguito riportate:

TRASFORMAZIONE	Q_{ij}
1-2	133 J
2-3	-24,5 J
3-4	126,6 J
4-5	1,31 kcal
5-6	-0,844 kcal
6-1	0,1145 kJ

Determinare il lavoro complessivamente scambiato nel ciclo ed il rispettivo rendimento termodinamico

Problema 12

In un sistema pistone cilindro un campione di fluido di massa $m = 175 \text{ g}$ si trova inizialmente alla pressione $p_1 = 1,00 \text{ bar}$ con un volume spe-

cifico $v_1 = 420 \text{ l/kg}$. Successivamente il sistema viene sottoposto ad una compressione adiabatica fino a raggiungere un volume specifico finale 10 volte più piccolo di quello iniziale. Assumendo che la trasformazione sia assimilabile ad una politropica¹ con esponente $n = 1,40$, si determini:

- 1) la pressione finale del sistema;
- 2) il lavoro di variazione di volume;
- 3) la variazione di energia interna;

Si riporti schematicamente la trasformazione sul piano di Clapeyron.

Problema 13

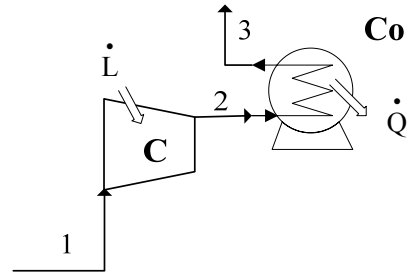
Il sistema aperto rappresentato in figura, è costituito da un compressore e da una apparecchiatura di scambio termico (condensatore) in cui il fluido evolvente cede energia termica all'ambiente in un processo a pressione costante.

Assumendo $h_1 = 393 \text{ kJ/kg}$, h_2

$= 425 \text{ kJ/kg}$, $h_3 = 256 \text{ kJ/kg}$, $v_1 = 0,900 \text{ m}^3/\text{kg}$, $w_1 = 30,0 \text{ m/s}$, $D_1 = 2,54 \text{ cm}$ e trascurando i termini cinetici e potenziali si determini:

- 1) la potenza meccanica richiesta dal compressore;
- 2) la potenza termica ceduta dal fluido all'ambiente nel condensatore;
- 3) il rapporto tra la potenza termica ceduta e la potenza meccanica richiesta.

N.B.: si consideri il compressore adiabatico ed il condensatore incapace di trasferire energia meccanica all'ambiente.



¹ In una trasformazione politropica risulta $p v^n = \text{costante}$.

Problema 14

Una massa di gas è contenuta all'interno di un sistema pistone-cilindro disposto verticalmente e nel quale è installato un resistore elettrico. Il peso del pistone è pari a 560 N, il suo diametro è pari a 87,4 mm e la pressione esercitata dall'aria atmosferica sulla superficie esterna del pistone è pari a 100 kPa. Per effetto della somministrazione di 3,06 kJ di energia termica da parte del resistore, l'energia interna del gas subisce un incremento pari a 1,02 kJ. Assumendo il pistone ed il cilindro perfettamente adiabatici e che non vi siano ulteriori effetti dissipativi, si valuti l'innalzamento del pistone per effetto della trasformazione.

Problema 15

Un impianto termico motore operante secondo un ciclo diretto riceve dall'ambiente 300 MW sotto forma di energia termica esibendo un rendimento termodinamico pari al 33,3 %.

- 1) Si determini la potenza meccanica sviluppata dall'impianto;
- 2) si calcoli per un funzionamento ininterrotto pari a 8000 ore annue, l'energia meccanica sviluppata espressa in kWh per anno.
- 3) Supponendo di vendere l'energia prodotta ad un prezzo pari a 0,11€ / kWh, si calcoli l'introito annuale netto in € per anno.

Problema 16

2,50 kg di fluido contenuti in un sistema pistone-cilindro sono sottoposti ad una trasformazione in cui l'energia interna specifica passa da un valore iniziale $u_1 = 2805,4$ kJ/kg, ad un valore finale $u_2 = 2704,3$ kJ/kg. Durante la trasformazione il fluido riceve 80,0 kJ di energia sotto forma di calore e 18,5 kJ sotto forma di lavoro d'elica. Trascurando la variazione di energia potenziale e cinetica della massa di fluido all'interno del cilindro, si valuti la quantità di energia meccanica scambiata tra sistema ed ambiente sotto forma di lavoro di variazione di volume.

Problema 17

Un campione di massa $m = 1,00$ kg di fluido è sottoposto ad un ciclo termodinamico costituito da tre trasformazioni elementari:

- trasformazione 1-2: a volume costante $V_1 = V_2 = 454$ l con $\Delta U = 133$ kJ;
- trasformazione 2-3: politropica di esponente $n = 1$ con $\Delta U = 0$;
- trasformazione 3-1: a pressione costante con $p_3 = p_1 = 0,895$ MPa caratterizzata da lavoro di variazione di volume $L_{31} = -212$ kJ.

- 1) Calcolare il lavoro netto scambiato fra sistema ed ambiente in ogni ciclo;
- 2) calcolare la quantità di calore scambiato tra sistema ed ambiente durante la trasformazione 2-3;
- 3) calcolare il calore scambiato tra sistema ed ambiente durante la trasformazione 3-1;
- 4) stabilire se il ciclo termodinamico in questione sia un ciclo diretto od un ciclo inverso;
- 5) rappresentare qualitativamente ciascuna trasformazione sul piano p-v.