Ultimo aggiornamento: November 1, 2026

🗺️ Percorso di quattro anni · Anno 2, Autunno · 🧱 Calcolatore integrato

Informazioni sul corso

Questo corso gratuito ha 10 unità e 6 laboratori. Sono i totali reali, non un programma più lungo accorciato.

Un controllo è un numero o un risultato di codice in una pagina del corso che uno script ricalcola prima della pubblicazione. Il numero stampato e quello ricalcolato devono coincidere.

> Questo è lo schema di un corso gratuito di autoapprendimento scritto da Saving Planets. Non è un corso universitario, non dà crediti accademici e nessuna scuola è coinvolta.
>
> Il programma segue un corso semestrale di termodinamica per ingegneria del terzo anno. Si ispira agli argomenti e alla profondità di MIT 16.050 Thermal Energy e delle parti di termodinamica di MIT Unified Engineering (entrambi gratuiti su MIT OpenCourseWare), e a corsi come Purdue ME 200 e Georgia Tech ME 3322, usando i capitoli gratuiti di OpenStax University Physics Volume 2 sul calore e sui principi della termodinamica e i dati gratuiti sulle proprietà dei fluidi del NIST, che citiamo dove sono utili. Nessuno di questi autori o istituti approva questa pagina.
>
> Cosa aggiungiamo: ogni unità è collegata a lavoro reale con una fonte pubblica citata (rendimento delle centrali, centrali nucleari e solari a concentrazione, pompe di calore, cogenerazione ed energia geotermica), ogni numero della pagina viene ricalcolato da uno script di verifica prima della pubblicazione, e ogni laboratorio ha una simulazione gratuita o una versione sicura da fare a casa.
>
> Seguilo in ordine. Ogni unità ha obiettivi, idee chiave, equazioni, esempi passo per passo, esercizi con soluzioni complete, errori comuni, flashcard e un quiz. I tuoi progressi sono salvati solo in questo browser.

Come questo corso aiuta a salvare il pianeta

Quasi tutta l’elettricità ricavata da combustibili, uranio, luce solare concentrata o calore della Terra proviene da un ciclo termodinamico, e quasi tutto il riscaldamento e il raffrescamento ne usano uno. Il primo principio dice che l’energia si conserva; il secondo dice quanta può diventare lavoro utile. Insieme decidono quanto combustibile brucia il mondo.

Cicli migliori, il recupero del calore di scarto e le pompe di calore sono tra i modi più rapidi per ridurre le emissioni. Ogni unità termina con una breve sezione con fonti. I valori che non provengono da una fonte sono indicati come valori di esempio.

Per gli insegnanti

Puoi insegnare questo corso, oppure lasciare che uno studente lo faccia da solo. È gratis. Saving Planets non dà un voto né crediti scolastici.

- Questa pagina è l'intero corso: 10 unità e 6 laboratori (ENGR 320).
- Prevedi 15 settimane, circa 6–9 ore a settimana, comprese le settimane di laboratorio.
- Segui il calendario di 15 settimane. Leggi l'unità, fai la pratica su carta, poi apri la risposta. Nella settimana di laboratorio, fai il laboratorio o la versione a casa.
- Un controllo è un numero o un risultato di codice nella pagina che uno script ricalcola prima della pubblicazione. Il numero che vedi e quello ricalcolato devono coincidere.
- Usa Stampa questa pagina, oppure scarica la guida di studio PDF. Il formulario è verso la fine.
- Chiedi: in che modo questa unità aiuta le persone e il pianeta? Ogni unità ha un riquadro verde con un fatto e la sua fonte.
- Copia il modello di guida per insegnanti e scrivi il nome della classe, il tempo che hai e le domande che farai. Apri il modello di guida per insegnanti

Prima di iniziare

Prerequisiti

- Analisi II e III: integrali, derivate parziali e logaritmi naturali.
- Fisica I e Chimica generale I: energia, lavoro, gas ideali e calore.
- Le equazioni differenziali sono utili ma non obbligatorie.
- Dimestichezza con i fogli di calcolo per tabelle e interpolazione.

Come studiare

- Inizia ogni problema disegnando il sistema o il volume di controllo e dicendo se è chiuso o aperto, stazionario o no.
- Elenca gli stati noti e cerca le proprietà prima di scrivere qualsiasi bilancio.
- Scrivi prima il bilancio di energia a parole (energia in ingresso − energia in uscita = variazione dell'energia accumulata), poi elimina i termini che puoi giustificare.
- Mantieni le unità coerenti: kJ, kPa, m^3, kg e kelvin; non usare mai °C in un rapporto di temperature.
- Disegna ogni trasformazione su un diagramma T–s o p–v; i cicli diventano molto più facili da seguire.
- Fai ogni esercizio su carta prima di aprire la risposta e ripeti i quiz qualche giorno dopo.

Che cosa ti serve

- Un computer o un tablet per le simulazioni gratuite PhET Gas Properties, Energy Forms and Changes e States of Matter.
- Un termometro da cucina (o una sonda digitale economica), un misurino e una bilancia da cucina.

- Un bollitore elettrico di potenza nota, cubetti di ghiaccio, una tazza termica o un bicchiere di polistirolo.
- Il cronometro di un telefono.
- Un foglio di calcolo per i laboratori sui cicli.

Programma suggerito di 15 settimane

Circa 6-9 ore a settimana: lettura, esercizi e, nelle settimane di laboratorio, il laboratorio.

Settimana	Unità	Argomenti	Lettura
1	Sistemi, proprietà, energia e rendimento	Sistemi, proprietà, temperatura, unità di energia, consumo specifico di calore	OpenStax UP2 1.1, 3.1; EIA
2	Sostanze pure, cambiamenti di fase e tabelle delle proprietà	Fasi, saturazione, titolo; Laboratorio A	UP2 1.5, 2.1; NIST WebBook
3	Sostanze pure, cambiamenti di fase e tabelle delle proprietà	Tabelle del vapore, interpolazione, gas ideale	NIST WebBook
4	Trasferimento di energia come lavoro e calore	Lavoro di contorno, d’albero ed elettrico; modi di trasmissione del calore; Laboratorio D	UP2 3.2, 1.6
5	Il primo principio per i sistemi chiusi	Primo principio per i sistemi chiusi, calori specifici, calore latente; Laboratori B e C	UP2 3.3, 3.5
6	Il primo principio per i volumi di controllo: dispositivi in regime stazionario	Massa ed energia per i volumi di controllo; ugelli, turbine, compressori	MIT 16.050
7	Il primo principio per i volumi di controllo: dispositivi in regime stazionario	Valvole di laminazione, miscelazione, scambiatori di calore; esercitazione per l’esame intermedio	MIT 16.050
8	Il secondo principio: macchine termiche, frigoriferi e limiti di Carnot	Secondo principio, macchine, pompe di calore, Carnot; Laboratorio E	UP2 4.2–4.5
9	Entropia e rendimento isoentropico	Entropia, disuguaglianza di Clausius, generazione di entropia	UP2 4.6–4.7
10	Entropia e rendimento isoentropico	Trasformazioni e rendimenti isoentropici	UP2 3.6; NASA Glenn

Settimana	Unità	Argomenti	Lettura
11	Exergia: quanta energia è utile	Exergia, irreversibilità, rendimento di secondo principio	MIT 16.050
12	Cicli di potenza a gas: Otto, Diesel e Brayton	Cicli Otto e Diesel	NASA Glenn
13	Cicli di potenza a gas: Otto, Diesel e Brayton	Ciclo Brayton, rigenerazione, cicli combinati	NASA Glenn; MIT Unified
14	Cicli di potenza a vapore e cicli frigoriferi	Ciclo Rankine e suoi miglioramenti	NIST WebBook
15	Cicli di potenza a vapore e cicli frigoriferi	Refrigerazione e pompe di calore; Laboratorio F; esercitazione per l'esame finale	UP2 4.3

I tuoi progressi

Spunta unità e laboratori man mano che li finisci, e fai i quiz. Progressi e punteggi sono salvati solo in questo browser e non ci vengono mai inviati.

Unità

Sistemi, proprietà, energia e rendimento

Sistemi chiusi, volumi di controllo e ambiente, proprietà e stati, trasformazioni di equilibrio e quasi statiche, scale di temperatura e principio zero, pressione, forme di energia, unità di energia, e il rendimento come effetto utile diviso per la spesa necessaria.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Scegliere un sistema o un volume di controllo e il suo contorno.
- Distinguere le proprietà intensive dalle estensive, e le funzioni di stato da quelle di percorso.
- Convertire tra kJ, kWh e Btu, e tra °C e K.
- Calcolare un rendimento e il rendimento di una centrale dal suo consumo specifico di calore.

Concetti chiave

- Un sistema è la regione che studiamo; un sistema chiuso scambia energia ma non massa con l’ambiente, mentre un volume di controllo (sistema aperto) lascia che la massa attraversi il suo contorno.
- Proprietà come la pressione p, la temperatura T e il volume specifico v = V/m descrivono lo stato. Le proprietà intensive (p, T, v) non dipendono dalle dimensioni; quelle estensive (V, m, E) sì. Due proprietà intensive indipendenti fissano lo stato di una sostanza semplice comprimibile.
- Il principio zero: due corpi ciascuno in equilibrio termico con un terzo sono in equilibrio tra loro; è il motivo per cui i termometri funzionano. La temperatura assoluta T(K) = T(°C) + 273.15 va usata in ogni rapporto e in ogni legge dei gas.
- L’energia è immagazzinata come energia interna U, energia cinetica ½mV² ed energia potenziale mgz, e attraversa un contorno solo come calore Q o lavoro W.
- Rendimento = effetto utile ÷ spesa necessaria. Per le centrali, l’EIA statunitense usa il consumo specifico di calore: Btu di combustibile per kWh di elettricità, con 1 kWh = 3412 Btu.

Equazioni chiave

$$v = \frac{V}{m}, \quad \rho = \frac{1}{v}$$

`v=V/m,\ \ ρ=1v`

Volume specifico e densità

$$T(\mathrm{K}) = T(^\circ\mathrm{C}) + 273.15$$

`T( K)=T(^ C)+273.15`

Temperatura assoluta

$$E = U + \tfrac{1}{2}mV^2 + mgz$$

`E=U+12mV^2+mgz`

Energia totale accumulata

$$\eta = \frac{3412\ \mathrm{Btu/kWh}}{\text{heat rate}}$$

`=3412\ Btu/kWhheat rate`

Rendimento di una centrale dal consumo specifico di calore (EIA)

Esempi svolti passo passo

Esempio 1.1 L'EIA fornisce come esempi consumi specifici di 10500 Btu/kWh e 7500 Btu/kWh. Trova ciascun rendimento.

1. η = 3412/10,500.
2. η = 3412/7500.

Risposta: 32.5% e 45.5% (l'EIA li arrotonda a 33% e 45%).

Esempio 1.2 Un serbatoio contiene 2 kg di gas in 0.5 m³. Trova v e ρ.

1. v = 0.5/2.
2. ρ = 1/v.

Risposta: v = 0.25 m³/kg, ρ = 4 kg/m³.

Esempio 1.3 Un'auto di 1000 kg a 30 m/s frena fino a fermarsi. Quanta energia cinetica diventa energia interna dei freni, in kJ e kWh?

1. KE = ½ × 1000 × 30² = 450,000 J.
2. 450 kJ ÷ 3600 kJ/kWh.

Risposta: 450 kJ = 0.125 kWh.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Converti 25 °C in kelvin.

   298.15 K.

2. La temperatura è intensiva o estensiva?

   Intensiva.

3. Una centrale ha un consumo specifico di calore di 9000 Btu/kWh. Trova il suo rendimento.

   3412/9000 = 37.9%.

4. Converti 1 MWh in GJ.

   3600 MJ = 3.6 GJ.

Errori concettuali comuni

Mito: Calore e temperatura sono la stessa cosa.
In realtà: La temperatura è una proprietà; il calore è energia in transito.

Mito: Un sistema «contiene calore».
In realtà: Contiene energia interna; il calore esiste solo mentre attraversa un contorno.

Mito: I rapporti possono usare i °C.
In realtà: Le leggi dei gas e i rendimenti richiedono i kelvin.

Flashcard

Sistema

Regione in studio.

Volume di controllo

La massa può attraversarlo.

Volume specifico

v = V/m.

Principio zero

Base dei termometri.

Consumo specifico di calore

Btu per kWh.

1 kWh

3600 kJ = 3412 Btu.

Quiz di autoverifica

1. Un volume di controllo permette...

alla massa di attraversare il suo contorno

nessun trasferimento di energia

solo calore

niente

alla massa di attraversare il suo contorno. Sistema aperto.

2. Quale è intensiva?

volume

massa

la pressione

energia

la pressione. Indipendente dalle dimensioni.

3. Un consumo specifico di 6824 Btu/kWh significa un rendimento di...

25%

50%

68%

100%

50%. 3412/6824.

4. L'energia attraversa il contorno di un sistema chiuso come...

massa

calore e lavoro

la temperatura

la pressione

calore e lavoro. Solo due modi.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La Energy Information Administration statunitense misura il rendimento delle centrali con il consumo specifico di calore: l'energia del combustibile che una centrale usa per fornire un chilowattora alla rete, contando l'elettricità che la centrale stessa usa per l'alimentazione del combustibile, le pompe della caldaia, il raffreddamento e il controllo degli inquinanti. Dividendo 3412 Btu (l'energia di un kWh) per il consumo specifico si ottiene il rendimento; gli esempi dell'EIA sono una centrale da 10500 Btu al 33% circa e una da 7500 Btu al 45% circa.

Quella differenza è il senso di tutto il corso. A parità di elettricità, la centrale da 7500 Btu brucia 7500/10500 = 71.4% del combustibile, cioè circa il 28.6% in meno di combustibile e di CO_2. I principi della termodinamica spiegano dove va il resto dell'energia e come gli ingegneri ne recuperano una parte.

Su Saving Planets: Soluzioni · Circuiti

Fonti: U.S. EIA: What is the efficiency of different types of power plants? (https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=107&t=3)

Risorse di apprendimento gratuite

- OpenStax UP2, 1.1 Temperature and thermal equilibrium (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/1-1-temperature-and-thermal-equilibrium): Sezione di un manuale gratuito.
- OpenStax UP2, 3.1 Thermodynamic systems (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-1-thermodynamic-systems): Sezione di un manuale gratuito.
- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): Appunti del MIT sull'energia termica.
- NASA Glenn: First law of thermodynamics (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/thermo1.html): Pagina gratuita della NASA.

Ho finito questa unità

Sostanze pure, cambiamenti di fase e tabelle delle proprietà

Fasi e cambiamenti di fase, temperatura e pressione di saturazione, liquido compresso, miscela satura e vapore surriscaldato, titolo, diagrammi T–v e p–v, tabelle del vapore e interpolazione, l'equazione dei gas ideali e quando vale, e il fattore di comprimibilità.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Identificare la fase da p e T con i dati di saturazione.
- Usare il titolo per trovare v, u e h di una miscela satura.
- Interpolare nelle tabelle delle proprietà.
- Usare la legge dei gas ideali e sapere quando non vale.

Concetti chiave

- Una sostanza pura ha una composizione chimica fissa. A una data pressione, l'acqua bolle a una sola temperatura di saturazione (99.61 °C a 100 kPa); durante l'ebollizione p e T restano fisse e il titolo della miscela x = m_vapor/m_total cresce da 0 a 1.
- Per una miscela satura qualsiasi proprietà specifica è y = y_f + x(y_g − y_f) = y_f + x·y_fg, con i valori di liquido saturo (f) e vapore saturo (g) presi dalle tabelle.
- Se T è inferiore alla temperatura di saturazione a quella pressione, l'acqua è liquido compresso (circa liquido saturo a T); se è superiore, è vapore surriscaldato, riportato in tabelle a parte.
- Interpolazione lineare: $y = y_1 + (x - x_1)(y_2 - y_1)/(x_2 - x_1)$. Il WebBook gratuito del NIST fornisce gli stessi dati per l'acqua e molti refrigeranti.
- A bassa pressione e alta temperatura rispetto al punto critico, i gas seguono pv = RT con R = R_u/M; per l'aria R = 0.287 kJ/(kg·K). Vicino alla saturazione (vapore in una caldaia) usa invece le tabelle.

Equazioni chiave

$$x = \frac{m_g}{m_f + m_g}$$

`x=(m_g)/(m_f+m_g)`

Titolo

$$y = y_f + x\, y_{fg}$$

`y=y_f+x y_fg`

Proprietà di una miscela satura

$$pv = RT, \;\; R = \frac{R_u}{M}$$

`pv=RT,\ \ R=(R_u)/(M)`

Legge dei gas ideali

$$y = y_1 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}(y_2 - y_1)$$

`y=y_1+(x-x_1)/(x_2-x_1)(y_2-y_1)`

Interpolazione lineare

Esempi svolti passo passo

Esempio 2.1 A 100 kPa, h_f = 417.51 e h_fg = 2257.5 kJ/kg, v_f = 0.001043 e v_g = 1.6941 m³/kg (tabelle del vapore). Trova h e v con titolo 0.6.

1. h = 417.51 + 0.6 × 2257.5.
2. v = 0.001043 + 0.6 × (1.6941 − 0.001043).

Risposta: h = 1772.0 kJ/kg; v = 1.0169 m³/kg.

Esempio 2.2 Trova la massa d’aria in un serbatoio da 0.5 m³ a 100 kPa e 300 K.

1. m = pV/(RT) = 100 × 0.5/(0.287 × 300).

Risposta: m = 0.581 kg.

Esempio 2.3 Trova la pressione di 2 kg d’aria in 0.5 m³ a 400 K.

1. p = mRT/V = 2 × 0.287 × 400/0.5.

Risposta: p = 459.2 kPa.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. L’acqua a 100 kPa e 80 °C è…

Liquido compresso (80 °C < 99.61 °C).

2. L’acqua a 100 kPa e 150 °C è...

   Vapore surriscaldato.

3. Interpola h a 25 °C se h = 83.9 a 20 °C e 125.7 a 30 °C (kJ/kg, liquido saturo).

   83.9 + 0.5 × 41.8 = 104.8 kJ/kg.

4. Trova R per l’elio (M = 4.003 kg/kmol).

   8.314/4.003 = 2.077 kJ/(kg·K).

Errori concettuali comuni

Mito: La temperatura sale mentre l’acqua bolle.
In realtà: A pressione costante resta a T_sat finché tutto il liquido non è evaporato.

Mito: Il vapore in una caldaia è un gas ideale.
In realtà: Vicino alla saturazione non lo è; usa le tabelle del vapore.

Mito: Il titolo si applica al vapore surriscaldato.
In realtà: Solo alle miscele sature, $0 \le x \le 1$.

Flashcard

Saturazione

Liquido e vapore coesistono a T_sat(p).

Titolo

x = m_g/m.

Proprietà della miscela

y_f + x y_fg.

Liquido compresso

T < T_sat.

Surriscaldato

T > T_sat.

Gas ideale

pv = RT.

Quiz di autoverifica

1. Il titolo è...

la massa di vapore sulla massa totale

la massa di liquido sulla totale

un rapporto di temperature

un rapporto di pressioni

la massa di vapore sulla massa totale. x = m_g/m.

2. L’acqua a 100 kPa e 120 °C è…

liquido compresso

miscela satura

vapore surriscaldato

solido

vapore surriscaldato. Sopra T_sat.

3. R per l’aria vale circa…

8.314

0.287

1.005

4.18

0.287. kJ/(kg·K).

4. Durante l’ebollizione a p costante, T…

sale

scende

resta costante

oscilla

resta costante. Saturazione.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Il Department of Energy statunitense spiega che i reattori nucleari usano il calore di fissione per produrre vapore che fa girare una turbina. Tutti i reattori commerciali statunitensi sono ad acqua leggera: oltre il 65% sono reattori ad acqua pressurizzata, che mantengono l'acqua del nocciolo ad alta pressione perché non bolla e producono vapore in uno scambiatore separato, e circa un terzo sono reattori ad acqua bollente, che producono vapore direttamente nel recipiente.

Entrambi i progetti sono esercizi di questa unità: aumentare la pressione alza la temperatura di saturazione, così l'acqua resta liquida, e il titolo e l'entalpia del vapore stabiliscono quanto lavoro ottiene la turbina. Il DOE conta oltre 400 reattori commerciali nel mondo, di cui 94 negli Stati Uniti, tutti progettati con le tabelle del vapore.

Su Saving Planets: Soluzioni · Chimica Generale I

Fonti: U.S. DOE: Nuclear 101: How does a nuclear reactor work? (May 2025) (https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-101-how-does-nuclear-reactor-work) · NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/)

Risorse di apprendimento gratuite

- NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/): Tabelle del vapore gratuite.
- OpenStax UP2, 1.5 Phase changes (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/1-5-phase-changes): Sezione di un manuale gratuito.
- OpenStax UP2, 2.1 Molecular model of an ideal gas (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/2-1-molecular-model-of-an-ideal-gas): Sezione di un manuale gratuito.
- PhET: States of Matter (https://phet.colorado.edu/en/simulations/states-of-matter): Il cambiamento di fase in modo interattivo.

☐ **Ho finito questa unità**

Trasferimento di energia come lavoro e calore

Convenzioni di segno, lavoro di contorno e la sua area su un diagramma p–V, trasformazioni isobare, isoterme e politropiche, lavoro d'albero ed elettrico, e i tre modi di trasmissione del calore: conduzione, convezione e irraggiamento.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare il lavoro di contorno per le trasformazioni comuni.
- Mostrare che lavoro e calore sono funzioni di percorso.
- Calcolare lavoro e potenza d'albero ed elettrici.
- Stimare i flussi termici per conduzione e convezione.

Concetti chiave

- Convenzione di segno: il calore entrante nel sistema e il lavoro compiuto dal sistema sono positivi (Q_in, W_out). Entrambi sono funzioni di percorso: dipendono dalla trasformazione, non solo dagli stati estremi.
- Il lavoro di contorno W_b = ∫p dV è l'area sotto la curva della trasformazione su un diagramma p–V. A pressione costante, W_b = p(V_2 − V_1).
- Per un gas ideale a temperatura costante, W_b = mRT ln(V_2/V_1). Per una trasformazione politropica pV^n = costante (n ≠ 1), W_b = (p_2V_2 − p_1V_1)/(1 − n).
- Lavoro d'albero: potenza = coppia × velocità angolare, $\dot{W} = 2\pi\dot{n}T$. Lavoro elettrico: W = VIΔt = PΔt.
- Il calore si trasmette per conduzione ($\dot{Q}$ = kAΔT/L attraverso una parete), convezione ($\dot{Q}$ = hAΔT verso un fluido in moto) e irraggiamento ($\dot{Q} = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_{surr}^4)$). L'isolamento riduce k; per questo l'involucro degli edifici è importante.

Equazioni chiave

$$W_b = \int_1^2 p\, dV$$

```
W_b=_1^2 p dV
```

Lavoro di contorno

$$W_b = mRT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

```
W_b=mRT(V_2)/(V_1)
```

Gas ideale isotermo

$$W_b = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{1 - n}$$

`W_b=(p_2V_2-p_1V_1)/(1-n)`

Trasformazione politropica

$$\dot{Q} = \frac{kA\,\Delta T}{L}, \;\; \dot{Q} = hA\,\Delta T$$

`Q=(kA Δ T)/(L),\ \ Q=hA Δ T`

Conduzione e convezione

Esempi svolti passo passo

Esempio 3.1 1 kg d'aria si espande in modo isotermo a 300 K fino al doppio del volume. Trova il lavoro.

1. W = 1 × 0.287 × 300 × ln 2.

Risposta: W = 59.7 kJ (compiuto dal gas).

Esempio 3.2 L'aria viene compressa in modo politropico (n = 1.3) da 100 kPa e 0.2 m³ a 0.1 m³. Trova p_2 e il lavoro.

1. p_2 = 100 × 2^1.3 = 246.2 kPa.
2. W = (246.2 × 0.1 − 100 × 0.2)/(1 − 1.3).

Risposta: p_2 = 246.2 kPa; W = −15.4 kJ (lavoro compiuto sul gas).

Esempio 3.3 Una parete di 10 m² di area, 0.1 m di spessore e k = 0.04 W/(m·K) (isolante di esempio) ha 20 K di differenza ai capi. Trova la perdita di calore.

1. $\dot{Q}$ = 0.04 × 10 × 20/0.1.

Risposta: $\dot{Q}$ = 80 W.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Un gas si espande a 200 kPa costanti da 0.5 a 0.8 m^3. Lavoro?

   200 × 0.3 = 60 kJ.

2. Un albero fornisce 50 N·m a 3000 giri/min. Potenza?

   2π × 50 × 50 = 15.7 kW.

3. Una stufa da 1500 W funziona per 10 minuti. Lavoro elettrico?

   1500 × 600 = 900 kJ.

4. Convezione: h = 10 $W/(m^2 \cdot K)$, A = 2 m^2, ΔT = 30 K. Flusso termico?

   600 W.

Errori concettuali comuni

Mito: Il lavoro è una proprietà dello stato.
In realtà: Dipende dal percorso.

Mito: Un serbatoio rigido può compiere lavoro di contorno.
In realtà: No; dV = 0.

Mito: Raddoppiare lo spessore dell'isolante dimezza la temperatura.
In realtà: Dimezza il flusso termico per conduzione a parità di ΔT.

Flashcard

Convenzione di segno

Q entrante e W uscente positivi.

Lavoro di contorno

$\int p\,dV$.

Isoterma

$mRT \ln(V_2/V_1)$.

Politropica

$(p_2V_2 - p_1V_1)/(1 - n)$.

Potenza all'albero

$2\pi \dot{n} T$.

Conduzione

$kA\Delta T/L$.

Quiz di autoverifica

1. Il lavoro di contorno è uguale a...

$\int V\,dp$

$\int p\,dV$

pV

mRT

$\int p\,dV$. L'area sotto la curva p–V.

2. Il lavoro isotermo di un gas ideale è...

$mRT \ln(V_2/V_1)$

$p\,\Delta V$

$mc_v\Delta T$

0

$mRT \ln(V_2/V_1)$. pV = cost.

3. Calore e lavoro sono...

proprietà

funzioni di percorso

sempre uguali

intensivi

funzioni di percorso. Dipendono dalla trasformazione.

4. Il flusso termico per conduzione è proporzionale a...

1/k

L

$\Delta T/L$

T^4

$\Delta T/L$. $kA\Delta T/L$.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Il Department of Energy statunitense spiega che il solare termodinamico a concentrazione usa specchi per concentrare la luce solare su un ricevitore, riscaldando un fluido ad alta temperatura. Quel calore fa girare una turbina o alimenta un motore per produrre elettricità, e può servire anche all'industria, dalla dissalazione alla lavorazione degli alimenti e alla produzione chimica.

Il DOE osserva che gli impianti su scala industriale usano torri solari o file di specchi lineari, mentre i singoli sistemi a disco/motore producono da 5 a 25 chilowatt ciascuno. Ognuno è un problema di trasmissione del calore e di lavoro: assorbire la radiazione concentrata, limitare le perdite per conduzione e convezione del ricevitore e trasformare il calore in lavoro d'albero.

Su Saving Planets: Soluzioni · Fisica II

Fonti: U.S. DOE: Concentrating solar-thermal power basics (https://www.energy.gov/eere/solar/concentrating-solar-thermal-power-basics)

Risorse di apprendimento gratuite

- OpenStax UP2, 3.2 Work, heat and internal energy (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-2-work-heat-and-internal-energy): Sezione di un manuale gratuito.
- OpenStax UP2, 1.6 Mechanisms of heat transfer (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/1-6-mechanisms-of-heat-transfer): Sezione di un manuale gratuito.
- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): Lezioni su lavoro e calore.
- PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes): Il trasferimento di energia in modo interattivo.

Guarda la lezione

Lecture 2: Work, heat, first law (https://ocw.mit.edu/courses/5-60-thermodynamics-kinetics-spring-2008/resources/lecture-2-work-heat-first-law/) (in inglese)

MIT 5.60 Thermodynamics & Kinetics (Spring 2008), MIT OpenCourseWare. Licenza: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condizioni d'uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Link fornito solo per lo studio gratuito; Saving Planets non è affiliato a questa università né approvato da essa.

- [ ] **Ho finito questa unità**

Il primo principio per i sistemi chiusi

Bilancio di energia per i sistemi chiusi, energia interna ed entalpia, calori specifici di gas ideali, liquidi e solidi, riscaldamento a volume costante e a pressione costante, calore latente e bilanci di energia per i cicli.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Scrivere e applicare Q − W = ΔU + ΔKE + ΔPE.
- Usare c_v e c_p per i gas ideali, e c per liquidi e solidi.
- Includere il calore latente nei problemi con cambiamento di fase.
- Mostrare che in un ciclo il calore netto è uguale al lavoro netto.

Concetti chiave

- Primo principio per un sistema chiuso: Q − W = ΔE = ΔU + ΔKE + ΔPE. Di solito ΔKE e ΔPE sono trascurabili, quindi Q − W = ΔU.
- Entalpia h = u + pv. A pressione costante il calore fornito è uguale alla variazione di entalpia: Q = m(h_2 − h_1), perché il lavoro di contorno è già incluso.
- Per i gas ideali u e h dipendono solo da T: Δu = c_vΔT, Δh = c_pΔT, con c_p − c_v = R e k = c_p/c_v (1.4 per l'aria).
- Per liquidi e solidi c_p ≈ c_v = c, quindi Q = mcΔT. Fondere o bollire a T costante richiede calore latente: Q = m h_if o m h_fg.
- In un ciclo completo il sistema torna allo stato iniziale, quindi ΔU = 0 e Q_net = W_net. È la base di ogni motore e di ogni frigorifero.

Equazioni chiave

$$Q - W = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$$

`Q-W=Δ U+Δ KE+Δ PE`

Primo principio, sistema chiuso

$$h = u + pv$$

`h=u+pv`

Entalpia

$$\Delta u = c_v \Delta T,\ \Delta h = c_p \Delta T,\ c_p - c_v = R$$

Δ u=c_vΔ T,\ Δ h=c_pΔ T,\ c_p-c_v=R

Calori specifici dei gas ideali

$$Q = mc\Delta T, \;\; Q = m\, h_{fg}$$

Q=mcΔ T,\ \ Q=m h_fg

Calore sensibile e latente

Esempi svolti passo passo

Esempio 4.1 2 kg d'aria in un serbatoio rigido vengono riscaldati da 300 K a 400 K. Trova Q.

1. W = 0 (rigido).
2. Q = m c_v ΔT = 2 × 0.718 × 100.

Risposta: Q = 143.6 kJ.

Esempio 4.2 La stessa aria viene riscaldata a pressione costante (100 kPa) da 300 a 400 K. Trova Q e il lavoro di contorno.

1. Q = m c_p ΔT = 2 × 1.005 × 100.
2. W = mRΔT = 2 × 0.287 × 100.

Risposta: Q = 201.0 kJ; W = 57.4 kJ; ΔU = 143.6 kJ in entrambi i casi.

Esempio 4.3 Trova il calore per scaldare 1 kg d'acqua da 20 °C a 100 °C e poi farne evaporare 0.1 kg.

1. Q_1 = 1 × 4.18 × 80.
2. Q_2 = 0.1 × 2257.

Risposta: Q_1 = 334.4 kJ; Q_2 = 225.7 kJ.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Fondere 0.2 kg di ghiaccio a 0 °C. Calore?

   0.2 × 334 = 66.8 kJ.

2. Trova $c_p - c_v$ per l'aria.

   $1.005 - 0.718 = 0.287$ kJ/(kg·K) $= R$.

3. Un ciclo riceve 500 kJ di calore e ne cede 300 kJ. Lavoro netto?

   200 kJ.

4. Trova k per l'aria.

   $1.005/0.718 = 1.40$.

Errori concettuali comuni

Mito: Fornire calore aumenta sempre la temperatura.
In realtà: Non durante un cambiamento di fase.

Mito: $Q = mc_p\Delta T$ vale per un serbatoio rigido.
In realtà: Usa c_v quando il volume è costante.

Mito: L'entalpia è una forma di calore.
In realtà: È una proprietà, $u + pv$.

Flashcard

Primo principio

$Q - W = \Delta U$.

Entalpia

$h = u + pv$.

Δu di un gas ideale

$c_v\Delta T$.

Δh di un gas ideale

$c_p\Delta T$.

Calore latente

$Q = m\, h_{fg}$.

Ciclo

$Q_{net} = W_{net}$.

Quiz di autoverifica

1. Per un serbatoio chiuso rigido, Q è uguale a...

ΔH

ΔU

W

0

ΔU. Nessun lavoro di contorno.

2. $c_p - c_v$ per un gas ideale vale...

k

R

1

c_v

R. Relazione di Mayer.

3. In un ciclo, ΔU vale...

positivo

negativo

zero

Q

zero. Stesso stato iniziale e finale.

4. A pressione costante, Q è uguale a...

ΔU

ΔH

W

pV

ΔH. h = u + pv.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Il DOE riferisce che le pompe di calore crescono rapidamente: nel 2020 oltre 17 milioni di abitazioni statunitensi ne avevano una, e oggi rappresentano più della metà delle vendite di impianti di riscaldamento residenziale negli Stati Uniti. Funzionano come un frigorifero, usando l'elettricità per spostare calore da un ambiente freddo a uno caldo invece di produrre calore.

Il primo principio spiega perché è importante: una stufa elettrica a resistenza trasforma ogni kWh di elettricità in esattamente un kWh di calore, mentre una pompa di calore fornisce l'elettricità più il calore che preleva dall'esterno. Secondo il DOE, le moderne pompe di calore ad aria possono ridurre il consumo di elettricità del 50% rispetto a caldaie e termoconvettori, e il passaggio potrebbe evitare fino a 7.6 tonnellate di emissioni di carbonio l'anno a seconda dell'impianto sostituito.

Su Saving Planets: Soluzioni · Analisi II

Fonti: U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps)

Risorse di apprendimento gratuite

- OpenStax UP2, 3.3 First law of thermodynamics (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-3-first-law-of-thermodynamics): Sezione di un manuale gratuito.
- OpenStax UP2, 3.5 Heat capacities of an ideal gas (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-5-heat-capacities-of-an-ideal-gas): Sezione di un manuale gratuito.
- NASA Glenn: First law of thermodynamics (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/thermo1.html): Pagina gratuita della NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): Appunti sul primo principio.

Guarda la lezione

Lecture 1: State of a system, 0th law, equation of state (https://ocw.mit.edu/courses/5-60-thermodynamics-kinetics-spring-2008/resources/lecture-1-state-of-a-system-0th-law-equation-of-state/) (in inglese)

MIT 5.60 Thermodynamics & Kinetics (Spring 2008), MIT OpenCourseWare. Licenza: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condizioni d'uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Link fornito solo per lo studio gratuito; Saving Planets non è affiliato a questa università né approvato da essa.

☐ **Ho finito questa unità**

Il primo principio per i volumi di controllo: dispositivi in regime stazionario

Bilanci di massa ed energia per i volumi di controllo, lavoro di pulsione ed entalpia, dispositivi in regime stazionario (ugelli e diffusori, turbine e compressori, pompe, valvole di laminazione, camere di miscelazione e scambiatori di calore) e un'introduzione al riempimento in regime non stazionario.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Scrivere i bilanci di massa ed energia in regime stazionario.
- Spiegare perché l'entalpia compare per le correnti fluide.
- Analizzare ugelli, turbine, compressori, valvole di laminazione e scambiatori di calore.
- Scegliere quali termini trascurare per ciascun dispositivo.

Concetti chiave

- Bilancio di massa: in regime stazionario Σṁ_in = Σṁ_out, con ṁ = ρAV.
- Spingere un fluido attraverso un contorno richiede un lavoro di pulsione pv per unità di massa; sommato a u dà l'entalpia h, ed è per questo che i bilanci dei sistemi aperti usano h.
- Equazione dell'energia in regime stazionario, un ingresso e un'uscita: $\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}[(h_2 - h_1) + (V_2^2 - V_1^2)/2 + g(z_2 - z_1)]$.
- Scorciatoie per dispositivo: gli ugelli scambiano entalpia con velocità ($\dot{Q} = \dot{W} = 0$); turbine e compressori sono quasi adiabatici con $\dot{W} = \dot{m}(h_1 - h_2)$; le valvole di laminazione mantengono $h_1 = h_2$; gli scambiatori hanno $\dot{W} = 0$ e il calore perso da una corrente è uguale a quello guadagnato dall'altra.
- Attenzione alle unità: l'energia cinetica in J/kg va divisa per 1000 per sommarla a un'entalpia in kJ/kg.

Equazioni chiave

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out}$$

```
m_in= m_out
```

Bilancio di massa stazionario

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}\left[\Delta h + \frac{\Delta V^2}{2} + g\Delta z\right]$$

```
Q- W= m[Δ h+(Δ V^2)/(2)+gΔ z]
```

Equazione dell’energia in regime stazionario

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

`W_turb= m(h_1-h_2)`

Turbina adiabatica

$$h_1 = h_2$$

`h_1=h_2`

Valvola di laminazione

Esempi svolti passo passo

Esempio 5.1 L’aria entra lentamente in un ugello adiabatico a 400 K ed esce a 350 K. Trova la velocità di uscita.

1. $\Delta h = c_p \Delta T = 1.005 \times 50 = 50.25$ kJ/kg = 50,250 J/kg.
2. $V_2 = \sqrt{(2 \times 50{,}250)}$.

Risposta: $V_2 = 317.0$ m/s.

Esempio 5.2 Il vapore attraversa una turbina adiabatica a 5 kg/s da $h_1 = 3116.1$ a $h_2 = 2403.0$ kJ/kg. Trova la potenza.

1. $\dot{W} = 5 \times (3116.1 - 2403.0)$.

Risposta: $\dot{W} = 3565.5$ kW ≈ 3.57 MW.

Esempio 5.3 Un compressore adiabatico porta 1.2 kg/s d’aria da 300 K a 450 K. Trova la potenza assorbita.

1. $\dot{W}_{in} = \dot{m} c_p \Delta T = 1.2 \times 1.005 \times 150$.

Risposta: 180.9 kW.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Acqua a 0.5 kg/s viene riscaldata da 15 a 45 °C in uno scambiatore. Flusso termico?

   0.5 × 4.18 × 30 = 62.7 kW.

2. Il vapore viene laminato da h = 2800 kJ/kg. h in uscita?

   2800 kJ/kg.

3. Converti una variazione di velocità da 0 a 100 m/s in kJ/kg.

   $100^2/2$ = 5000 J/kg = 5 kJ/kg.

4. Un tubo ha $\dot{m}$ = 2 kg/s in ingresso. In uscita, in regime stazionario?

   2 kg/s.

Errori concettuali comuni

Mito: La potenza di una turbina usa u.
In realtà: Le correnti fluide usano h, che include il lavoro di pulsione.

Mito: Una valvola di laminazione abbassa l'entalpia.
In realtà: h resta costante; p e di solito T diminuiscono.

Mito: L'energia cinetica è sempre trascurabile.
In realtà: Non negli ugelli e nei diffusori.

Flashcard

Massa stazionaria

$\dot{m}$ entrante = $\dot{m}$ uscente.

Lavoro di pulsione

pv per kg.

SFEE

$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}\Delta(h + V^2/2 + gz)$.

Turbina

$\dot{m}(h_1 - h_2)$.

Valvola di laminazione

$h_1 = h_2$.

Scambiatore di calore

Calore perso = calore guadagnato.

Quiz di autoverifica

1. Per una valvola di laminazione...

$h_1 = h_2$

$T_1 = T_2$

$p_1 = p_2$

$W > 0$

$h_1 = h_2$. Niente lavoro, niente calore, ΔKE piccola.

2. L'entalpia compare nei sistemi aperti a causa del...

lavoro di pulsione

l'attrito

la gravità

irraggiamento

lavoro di pulsione. $h = u + pv$.

3. Un ugello converte...

velocità in entalpia

entalpia in velocità

lavoro in calore

massa in energia

entalpia in velocità. Accelera il flusso.

4. La potenza di una turbina adiabatica è...

$\dot{m}(h_1 - h_2)$

$\dot{m}(h_2 - h_1)$

$\dot{Q}$

0

$\dot{m}(h_1 - h_2)$. Il salto di entalpia.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Il DOE descrive il cuore di una centrale nucleare come una catena di dispositivi in regime stazionario: la fissione scalda l'acqua, uno scambiatore di calore (nei reattori ad acqua pressurizzata) produce vapore in un circuito separato, il vapore fa girare una turbina collegata a un generatore, e il vapore residuo viene condensato in acqua e ripompato per essere riscaldato.

Ogni blocco è un'equazione dell'energia in regime stazionario. Le centrali geotermiche, che secondo il DOE estraggono fluido caldo attraverso pozzi e ne convertono il calore in vapore che aziona le turbine, usano gli stessi dispositivi con il calore della Terra come sorgente. Ricavare qualche kJ in più per kg da ogni stadio di turbina è il modo in cui cresce il rendimento di una centrale.

Su Saving Planets: Soluzioni · Aerodinamica I

Fonti: U.S. DOE: Nuclear 101: How does a nuclear reactor work? (May 2025) (https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-101-how-does-nuclear-reactor-work) · U.S. DOE: Geothermal basics (https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics)

Risorse di apprendimento gratuite

- OpenStax UP2, 3.4 Thermodynamic processes (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-4-thermodynamic-processes): Sezione di un manuale gratuito.
- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): Lezioni sui volumi di controllo.
- NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/): Dati sul vapore.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): Appunti sul regime stazionario.

Guarda la lezione

Lecture 2: Work, heat, first law (https://ocw.mit.edu/courses/5-60-thermodynamics-kinetics-spring-2008/resources/lecture-2-work-heat-first-law/) (in inglese)

MIT 5.60 Thermodynamics & Kinetics (Spring 2008), MIT OpenCourseWare. Licenza: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condizioni d'uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Link fornito solo per lo studio gratuito; Saving Planets non è affiliato a questa università né approvato da essa.

- [ ] **Ho finito questa unità**

Il secondo principio: macchine termiche, frigoriferi e limiti di Carnot

Serbatoi termici, macchine termiche e rendimento termico, frigoriferi, pompe di calore e COP, gli enunciati di Kelvin–Planck e di Clausius, trasformazioni reversibili e irreversibili, il ciclo di Carnot e i limiti di Carnot per rendimento e COP.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare il rendimento termico e il COP.
- Enunciare gli enunciati di Kelvin–Planck e di Clausius.
- Individuare le fonti di irreversibilità.
- Usare i limiti di Carnot per giudicare se un dispositivo dichiarato è possibile.

Concetti chiave

- Una macchina termica preleva Q_H da un serbatoio caldo, cede Q_L a uno freddo e produce W = Q_H − Q_L. Rendimento termico η = W/Q_H = 1 − Q_L/Q_H.
- Kelvin–Planck: nessun ciclo può trasformare in lavoro tutto il calore di un solo serbatoio, quindi η < 100%. Clausius: il calore non passa spontaneamente dal freddo al caldo; un frigorifero o una pompa di calore richiede lavoro.
- COP_R = Q_L/W per un frigorifero; COP_HP = Q_H/W = COP_R + 1 per una pompa di calore. Il COP può essere ben superiore a 1, ed è per questo che le pompe di calore battono le stufe a resistenza.
- Le irreversibilità (attrito, scambio termico con ΔT finita, espansione libera, miscelazione) riducono le prestazioni. Un ciclo reversibile tra due serbatoi, il ciclo di Carnot, è il migliore possibile.
- I limiti di Carnot usano temperature assolute: η_Carnot = 1 − T_L/T_H, COP_R,Carnot = T_L/(T_H − T_L), COP_HP,Carnot = T_H/(T_H − T_L).

Equazioni chiave

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

=(W)/(Q_H)=1-(Q_L)/(Q_H)

Rendimento termico

$$COP_R = \frac{Q_L}{W},\ COP_{HP} = \frac{Q_H}{W}$$

COP_R=(Q_L)/(W),\ COP_HP=(Q_H)/(W)

Coefficienti di prestazione

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

`_Carnot=1-(T_L)/(T_H)`

Rendimento di Carnot

$$COP_{HP,Carnot} = \frac{T_H}{T_H - T_L}$$

`COP_HP,Carnot=(T_H)/(T_H-T_L)`

Pompa di calore di Carnot

Esempi svolti passo passo

Esempio 6.1 Una macchina riceve 1000 kJ di calore e produce 350 kJ di lavoro. Trova η e Q_L.

1. η = 350/1000.
2. Q_L = 1000 − 350.

Risposta: η = 35%; Q_L = 650 kJ.

Esempio 6.2 Trova il rendimento di Carnot tra 800 K e 300 K, e tra 1073 K e 293 K.

1. 1 − 300/800.
2. 1 − 293/1073.

Risposta: 62.5% e 72.7%.

Esempio 6.3 Una pompa di calore mantiene una casa a 294 K quando fuori ci sono 273 K. Trova il COP di Carnot e il calore fornito da un'unità reale con COP = 3 (valore di esempio) che usa 3 kWh.

1. COP = 294/(294 − 273).
2. Q_H = 3 × 3.

Risposta: COP_Carnot = 14.0; l'unità reale fornisce 9 kWh di calore.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Un frigorifero ha COP_R = 2.5 e sottrae 500 kJ. Lavoro?

   200 kJ.

2. Trova COP_HP se COP_R = 2.5.

   3.5.

3. Un frigorifero lavora tra 275 K e 298 K. COP_R di Carnot?

   275/23 = 11.96.

4. Un inventore dichiara un rendimento del 70% tra 600 K e 300 K. È possibile?

   No: il limite di Carnot è 50%.

Errori concettuali comuni

Mito: Un COP superiore a 1 viola la conservazione dell'energia.
In realtà: La pompa di calore sposta calore; non lo crea.

Mito: Il rendimento di Carnot può usare i °C.
In realtà: Deve usare i kelvin.

Mito: Un'ingegneria migliore può raggiungere il 100% di rendimento.
In realtà: Kelvin–Planck lo vieta.

Flashcard

Rendimento

W/Q_H.

COP_R

Q_L/W.

COP_HP

Q_H/W.

Kelvin–Planck

Nessun motore al 100%.

Clausius

Niente passaggio dal freddo al caldo senza lavoro.

Carnot

1 − T_L/T_H.

Quiz di autoverifica

1. Il rendimento di Carnot tra 600 K e 300 K è...

25%

50%

75%

100%

50%. 1 − 0.5.

2. COP_HP − COP_R è uguale a...

0

1

η

T_H

1. Q_H = Q_L + W.

3. Quale enunciato vieta un motore con rendimento del 100%?

Clausius

Kelvin–Planck

Principio zero

Primo principio

Kelvin–Planck. L'enunciato con un solo serbatoio.

4. Quale è un'irreversibilità?

l'attrito

compressione quasi statica

espansione isoentropica

nessuna

l’attrito. Dissipazione.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Il DOE descrive le pompe di calore come dispositivi che spostano calore invece di generarlo, il che le rende molto più efficienti del riscaldamento tradizionale. Le moderne pompe di calore ad aria possono ridurre il consumo di elettricità del 50% rispetto a caldaie e termoconvettori, e le pompe di calore geotermiche, che sfruttano la temperatura stabile del sottosuolo poco profondo, possono ridurre il consumo di energia dal 30% al 60%.

Il COP di Carnot spiega entrambe le affermazioni: più piccolo è il salto di temperatura $T_H - T_L$, più alto è il COP. Il terreno resta più mite dell’aria invernale, quindi una pompa di calore geotermica solleva il calore su un divario minore. L’ufficio geotermico del DOE vede un potenziale fino a 28 milioni di pompe di calore geotermiche entro il 2050.

Su Saving Planets: Soluzioni · Oceani

Fonti: U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps) · U.S. DOE: Geothermal basics (https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics)

Risorse di apprendimento gratuite

- OpenStax UP2, 4.2 Heat engines (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-2-heat-engines): Sezione di un manuale gratuito.
- OpenStax UP2, 4.3 Refrigerators and heat pumps (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-3-refrigerators-and-heat-pumps): Sezione di un manuale gratuito.
- OpenStax UP2, 4.5 The Carnot cycle (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-5-the-carnot-cycle): Sezione di un manuale gratuito.
- NASA Glenn: Carnot cycle (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/carnot.html): Pagina gratuita della NASA.

Guarda la lezione

The Second Law of Thermodynamics and Carnot's Engine (https://oyc.yale.edu/physics/phys-200/lecture-23) (in inglese)

Ramamurti Shankar, PHYS 200 Fundamentals of Physics I, Open Yale Courses. Licenza: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Condizioni d’uso (https://oyc.yale.edu/terms). Link fornito solo per lo studio gratuito; Saving Planets non è affiliato a questa università né approvato da essa.

- [ ] **Ho finito questa unità**

Entropia e rendimento isoentropico

La disuguaglianza di Clausius, l’entropia come proprietà, il principio di aumento dell’entropia e la generazione di entropia, le relazioni T ds, la variazione di entropia di liquidi, solidi e gas ideali, le trasformazioni isoentropiche, i diagrammi T–s e i rendimenti isoentropici di turbine, compressori e ugelli.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare le variazioni di entropia di liquidi, solidi e gas ideali.
- Trovare la generazione di entropia e decidere se una trasformazione è possibile.
- Usare le relazioni isoentropiche dei gas ideali.
- Applicare i rendimenti isoentropici ai dispositivi reali.

Concetti chiave

- L’entropia S è una proprietà definita da dS = δQ_rev/T. Per qualsiasi trasformazione $S_2 - S_1 \geq \int \delta Q/T$; la differenza è l’entropia generata, S_gen ≥ 0 (nulla solo se reversibile).
- Principio di aumento dell’entropia: l’entropia di un sistema isolato (sistema più ambiente) non diminuisce mai. Una trasformazione con S_gen < 0 è impossibile.
- Relazioni T ds: T ds = du + p dv = dh − v dp. Per liquidi e solidi $\Delta s = c \ln(T_2/T_1)$; per i gas ideali $\Delta s = c_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(p_2/p_1)$.
- Una trasformazione isoentropica (adiabatica reversibile) di un gas ideale con calori specifici costanti ha $T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{((k-1)/k)}$. Su un diagramma T–s è una retta verticale, e l’area sotto una trasformazione reversibile è il calore scambiato.
- I dispositivi reali si confrontano con quelli isoentropici: $\eta_T = (h_1 - h_2a)/(h_1 - h_2s)$ per le turbine e $\eta_C = (h_2s - h_1)/(h_2a - h_1)$ per i compressori.

Equazioni chiave

$$dS = \frac{\delta Q_{rev}}{T}, \;\; S_{gen} \geq 0$$

dS= Q_revT,\ \ S_gen0

L’entropia e il secondo principio

$$\Delta s = c \ln \frac{T_2}{T_1}$$

Δ s=c(T_2)/(T_1)

Liquidi e solidi

$$\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

`Δ s=c_p(T_2)/(T_1)-R(p_2)/(p_1)`

Gas ideale

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(k-1)/k}$$

`(T_2)/(T_1)=((p_2)/(p_1))^(k-1)/k`

Gas ideale isoentropico

Esempi svolti passo passo

Esempio 7.1 Trova la variazione di entropia di 2 kg d'acqua riscaldati da 293 K a 353 K.

1. ΔS = 2 × 4.18 × ln(353/293).

Risposta: ΔS = 1.557 kJ/K.

Esempio 7.2 L'aria passa da 300 K e 100 kPa a 500 K e 400 kPa. Trova Δs.

1. Δs = 1.005 ln(500/300) − 0.287 ln(400/100).

Risposta: Δs = 0.1155 kJ/(kg·K).

Esempio 7.3 Aria a 300 K viene compressa con un rapporto di compressione di 8. Trova la temperatura di uscita isoentropica e quella reale se η_C = 0.85.

1. T_2s = 300 × 8^(0.4/1.4) = 543.4 K.
2. T_2a = 300 + (543.4 − 300)/0.85.

Risposta: T_2s = 543.4 K; T_2a = 586.4 K.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. 1000 kJ di calore passano da un serbatoio a 800 K a uno a 300 K. S_gen?

1000/300 − 1000/800 = 2.083 kJ/K.

2. T_2 isoentropica per un rapporto di compressione di 10 partendo da 300 K?

   579.2 K.

3. S_gen può essere negativa?

   No; quella trasformazione è impossibile.

4. Che cosa rappresenta l'area sotto una curva T–s reversibile?

   Il calore scambiato.

Errori concettuali comuni

Mito: L'entropia non può mai diminuire.
In realtà: L'entropia di un sistema può scendere se cede calore; quella totale di un sistema isolato no.

Mito: Adiabatico significa isoentropico.
In realtà: Solo se è anche reversibile.

Mito: Il rendimento isoentropico può superare 1.
In realtà: Non per turbine o compressori.

Flashcard

Entropia

$dS = \delta Q_{rev}/T$.

S_gen

≥ 0.

Δs di un liquido

$c \ln(T_2/T_1)$.

Δs di un gas ideale

$c_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(p_2/p_1)$.

T isoentropica

$T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{((k-1)/k)}$.

η_T

$(h_1 - h_{2a})/(h_1 - h_{2s})$.

Quiz di autoverifica

1. S_gen per una trasformazione reversibile è...

positivo

zero

negativo

infinita

zero. Nessuna irreversibilità.

2. Una trasformazione isoentropica su un diagramma T–s è...

orizzontale

verticale

diagonale

circolare

verticale. s costante.

3. Δs di un liquido riscaldato è...

$c \ln(T_2/T_1)$

$c\Delta T$

$R \ln(p_2/p_1)$

0

$c \ln(T_2/T_1)$. Incomprimibile.

4. Il rendimento isoentropico di un compressore è...

$(h_2s - h_1)/(h_2a - h_1)$

$(h_2a - h_1)/(h_2s - h_1)$

h_2/h_1

1

($h_2s - h_1$)/($h_2a - h_1$). Lavoro ideale su lavoro reale.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

La pagina di NASA Glenn sul ciclo Brayton illustra una turbina a gas su un diagramma T–s: idealmente il compressore aumenta pressione e temperatura in modo isoentropico, lungo una retta verticale, ma in realtà la linea di compressione si inclina a destra perché l'entropia aumenta nel flusso. La combustione avviene a pressione costante e la turbina, sullo stesso albero, aziona il compressore.

La NASA osserva che l'area racchiusa sul diagramma T–s è proporzionale al lavoro utile. Ogni briciolo di entropia generata in un compressore o in una turbina riduce quell'area, quindi rendimenti isoentropici più alti significano più elettricità o spinta con lo stesso combustibile, e meno CO_2.

Su Saving Planets: Aerodinamica I · Analisi III

Fonti: NASA Glenn: Turbine engine thermodynamic cycle (Brayton cycle) (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/brayton.html)

Risorse di apprendimento gratuite

- OpenStax UP2, 4.6 Entropy (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-6-entropy): Sezione di un manuale gratuito.
- OpenStax UP2, 4.7 Entropy on a microscopic scale (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-7-entropy-on-a-microscopic-scale): Sezione di un manuale gratuito.
- NASA Glenn: Entropy (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/entropy.html): Pagina gratuita della NASA.
- OpenStax UP2, 3.6 Adiabatic processes for an ideal gas (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-6-adiabatic-processes-for-an-ideal-gas): Sezione di un manuale gratuito.

☐ **Ho finito questa unità**

Exergia: quanta energia è utile

Stato morto e ambiente, exergia (disponibilità) del calore e delle correnti fluide, lavoro reversibile e irreversibilità, distruzione di exergia I = T_0S_gen, rendimento di secondo principio e perché conta adeguare la qualità dell'energia all'uso.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Calcolare l'exergia del calore fornito da un serbatoio.
- Collegare l'exergia distrutta all'entropia generata.
- Calcolare il rendimento di secondo principio.
- Spiegare perché la cogenerazione e le pompe di calore usano bene l'exergia.

Concetti chiave

- L'exergia è il massimo lavoro utile ottenibile mentre un sistema raggiunge l'equilibrio con l'ambiente (lo stato morto, T_0 e p_0). L'energia si conserva; l'exergia viene distrutta dalle irreversibilità.
- Il calore Q fornito da un serbatoio a T ha exergia X = Q(1 − T_0/T): il calore ad alta temperatura è prezioso, quello vicino alla temperatura ambiente non vale quasi nulla per produrre lavoro.
- Exergia di una corrente fluida per unità di massa: ψ = (h − h_0) − T_0(s − s_0) + V^2/2 + gz.
- Exergia distrutta (irreversibilità) I = T_0S_gen (Gouy–Stodola). Ogni irreversibilità costa lavoro utile.
- Rendimento di secondo principio η_II = η_th/η_rev per i motori, o COP/COP_rev per le pompe di calore. Bruciare combustibile a 2000 K solo per scaldare acqua a 60 °C spreca gran parte dell'exergia; usare per questo il calore di scarto di una centrale no.

Equazioni chiave

$$X_Q = Q\left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$$

`X_Q=Q(1-(T_0)/(T))`

Exergia del calore

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz$$

`=(h-h_0)-T_0(s-s_0)+(V^2)/(2)+gz`

Exergia di flusso

$$I = T_0 S_{gen}$$

`I=T_0S_gen`

Exergia distrutta

$$\eta_{II} = \frac{\eta_{th}}{\eta_{rev}}$$

`_II=_th_rev`

Rendimento di secondo principio

Esempi svolti passo passo

Esempio 8.1 Trova l'exergia di 100 kJ di calore da una sorgente a 600 K con T_0 = 300 K.

1. X = 100 × (1 − 300/600).

Risposta: 50 kJ.

Esempio 8.2 1000 kJ passano da 800 K a 300 K (T_0 = 300 K). Trova l'exergia distrutta.

1. S_gen = 1000/300 − 1000/800 = 2.083 kJ/K.
2. I = 300 × 2.083.

Risposta: I = 625 kJ, tutta l'exergia che il calore aveva a 800 K.

Esempio 8.3 Un motore con η = 35% lavora tra 800 K e 300 K. Trova η_II.

1. η_rev = 62.5%.
2. η_II = 0.35/0.625.

Risposta: η_II = 56%.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Exergia di 100 kJ a 330 K con T_0 = 300 K?

   100 × (1 − 300/330) = 9.09 kJ.

2. Una pompa di calore ha COP 3; COP_rev = 14. η_II?

3/14 = 21.4%.

3. Perché il calore a temperatura ambiente non vale quasi nulla per produrre lavoro?

   Il suo fattore exergetico $1 - T_0/T$ è vicino a zero.

4. Che cosa distrugge l'exergia?

   Ogni irreversibilità: attrito, miscelazione, scambio termico con ΔT finita.

Errori concettuali comuni

Mito: Energia ed exergia sono la stessa cosa.
In realtà: L'energia si conserva; l'exergia viene distrutta.

Mito: Un alto rendimento di primo principio significa un buon processo.
In realtà: Una caldaia a gas con rendimento del 95% può avere un basso rendimento di secondo principio.

Mito: L'exergia dipende solo dal sistema.
In realtà: Dipende anche dall'ambiente (T_0, p_0).

Flashcard

Exergia

Massimo lavoro utile.

Exergia del calore

$Q(1 - T_0/T)$.

Stato morto

T_0, p_0.

Irreversibilità

$I = T_0 S_gen$.

η_II

η/η_rev.

Qualità dell'energia

Una T alta è preziosa.

Quiz di autoverifica

1. L'exergia distrutta è uguale a...

$T_0 S_gen$

Q

W

ΔU

$T_0 S_{gen}$. Gouy–Stodola.

2. L'exergia del calore a $T = T_0$ è...

Q

zero

infinita

Q/2

zero. $1 - T_0/T = 0$.

3. η_{II} confronta la prestazione reale con...

il limite reversibile

zero

100%

il primo principio

il limite reversibile. Rendimento di secondo principio.

4. Lo stato morto è...

l'equilibrio con l'ambiente

lo zero assoluto

il punto critico

il vuoto

l'equilibrio con l'ambiente. T_0, p_0.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

Il DOE spiega che la cogenerazione produce elettricità e riscaldamento o raffrescamento utili da un unico combustibile nel luogo d'uso o nelle vicinanze, recuperando calore che altrimenti andrebbe perso nella produzione elettrica. Secondo il DOE, la cogenerazione può ragionevolmente operare con un rendimento dal 65% al 75%, contro una media nazionale di circa il 50% quando elettricità e calore sono prodotti separatamente.

L'exergia spiega il vantaggio: la parte ad alta temperatura dell'exergia del combustibile produce elettricità, e il calore di bassa qualità che una centrale butterebbe via copre fabbisogni di riscaldamento che hanno sempre richiesto solo energia a bassa exergia. Passare dal 50% al 75% significa gli stessi servizi con due terzi del combustibile.

Su Saving Planets: Soluzioni · Meteo spaziale

Fonti: U.S. DOE: Combined heat and power basics (https://www.energy.gov/eere/amo/combined-heat-and-power-basics)

Risorse di apprendimento gratuite

- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): Lezioni sulla disponibilità.
- OpenStax UP2, 4.1 Reversible and irreversible processes (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-1-reversible-and-irreversible-processes): Sezione di un manuale gratuito.
- OpenStax UP2, 4.4 Statements of the second law (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-4-statements-of-the-second-law-of-thermodynamics): Sezione di un manuale gratuito.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): Appunti sul secondo principio.

☐ **Ho finito questa unità**

Cicli di potenza a gas: Otto, Diesel e Brayton

Ipotesi dell’aria standard, pressione media effettiva, il ciclo Otto (accensione comandata), il ciclo Diesel (accensione per compressione), il ciclo Brayton per turbine a gas e motori a getto, rapporto dei lavori, rigenerazione, interrefrigerazione e ricombustione, e cicli combinati.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Analizzare i cicli Otto e Diesel ideali.
- Analizzare il ciclo Brayton ideale, compreso il rapporto dei lavori.
- Spiegare come il rapporto di compressione e il rapporto delle pressioni aumentano il rendimento.
- Descrivere la rigenerazione e i cicli combinati.

Concetti chiave

- Ipotesi dell’aria standard: il fluido di lavoro è aria, gas ideale, in un ciclo chiuso; la combustione è sostituita da un’adduzione di calore e lo scarico da una cessione di calore. L’aria standard fredda aggiunge calori specifici costanti a temperatura ambiente.
- Ciclo Otto: compressione isoentropica, adduzione di calore a volume costante, espansione isoentropica, cessione di calore a volume costante. η_Otto = 1 − 1/r^(k−1), con rapporto di compressione r = V_max/V_min.
- Ciclo Diesel: il calore viene fornito a pressione costante; con rapporto di combustione r_c, η_Diesel = 1 − (1/r^(k−1))·(r_c^k − 1)/(k(r_c − 1)). I diesel lavorano con r più alto, quindi in pratica sono più efficienti.
- Ciclo Brayton (turbine a gas): compressione isoentropica, adduzione di calore a pressione costante, espansione isoentropica, cessione di calore a pressione costante. η_Brayton = 1 − 1/r_p^((k−1)/k). Una parte consistente del lavoro della turbina aziona il compressore (il rapporto dei lavori).
- La rigenerazione usa lo scarico caldo per preriscaldare l’aria compressa; interrefrigerazione e ricombustione avvicinano il ciclo a quello di Carnot. Un ciclo combinato invia lo scarico della turbina a gas a un ciclo a vapore (Rankine).

Equazioni chiave

$$\eta_{Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

```
_Otto=1-1r^k-1
```

Ciclo Otto

$$\eta_{Diesel} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)}$$

_Diesel=1-1r^k-1(r_c^k-1)/(k(r_c-1))

Ciclo Diesel

$$\eta_{Brayton} = 1 - \frac{1}{r_p^{(k-1)/k}}$$

_Brayton=1-1r_p^(k-1)/k

Ciclo Brayton

$$r_{bw} = \frac{w_{comp}}{w_{turb}}$$

r_bw=_compw_turb

Rapporto dei lavori

Esempi svolti passo passo

Esempio 9.1 Trova il rendimento ad aria standard fredda dei cicli Otto con r = 8 e r = 10.

1. 1 − 8^(−0.4).
2. 1 − 10^(−0.4).

Risposta: 56.5% e 60.2%.

Esempio 9.2 Un ciclo Diesel ha r = 18 e r_c = 2. Trova η.

1. 1/r^0.4 = 0.3147.
2. (2^1.4 − 1)/(1.4 × 1) = 1.1703.
3. η = 1 − 0.3147 × 1.1703.

Risposta: η = 63.2%.

Esempio 9.3 Un ciclo Brayton ideale ha r_p = 8, ingresso a 300 K e ingresso turbina a 1300 K. Trova T_2, T_4, il lavoro del compressore e della turbina, il rapporto dei lavori, il lavoro netto e η.

1. T_2 = 300 × 8^0.2857 = 543.4 K; T_4 = 1300/1.8114 = 717.7 K.
2. w_c = 1.005 × 243.4 = 244.7 kJ/kg; w_t = 1.005 × 582.3 = 585.3 kJ/kg.
3. r_bw = 244.7/585.3; w_net = 340.6 kJ/kg; η = 1 − 8^(−0.2857).

Risposta: r_bw = 0.418, w_net = 340.6 kJ/kg, η = 44.8%.

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Rendimento Brayton con r_p = 12?

   1 − 12^(−0.2857) = 50.8%.

2. Perché in pratica i motori Diesel sono più efficienti di quelli a benzina?

   Lavorano con rapporti di compressione molto più alti.

3. Portare r da 8 a 10 in un ciclo Otto aggiunge quanti punti?

   60.2 − 56.5 = 3.7 punti.

4. Che cosa fa la rigenerazione?

   Usa il calore di scarico per preriscaldare l'aria del compressore, riducendo il combustibile necessario.

Errori concettuali comuni

Mito: Una compressione più alta significa sempre motori reali più efficienti.
In realtà: La detonazione limita i motori ad accensione comandata.

Mito: Il lavoro del compressore è trascurabile nelle turbine a gas.
In realtà: Spesso il 40–80% del lavoro della turbina.

Mito: Il rendimento ad aria standard è il rendimento reale.
In realtà: I motori reali rendono molto meno per attrito, perdite di calore e gas reali.

Flashcard

Aria standard

Aria, gas ideale, ciclo chiuso.

Otto

1 − 1/r^(k−1).

Diesel

Adduzione di calore a p costante.

Brayton

1 − 1/r_p^((k−1)/k).

Lavoro del compressore

w_c/w_t.

Rigenerazione

Lo scarico preriscalda l’aria.

Quiz di autoverifica

1. Il rendimento Otto dipende da…

rapporto di compressione

solo il tipo di combustibile

il modulo della velocità

rapporto di combustione

rapporto di compressione. 1 − 1/r^(k−1).

2. Nel ciclo Brayton il calore è fornito a … costante

volume

la pressione

la temperatura

entropia

la pressione. Combustore.

3. Il rapporto dei lavori è…

w_c/w_t

w_t/w_c

η

r_p

w_c/w_t. Compressore su turbina.

4. Un ciclo combinato abbina il Brayton a...

Otto

Rankine

Diesel

Carnot

Rankine. Ciclo a vapore sottoposto.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

NASA Glenn spiega che il ciclo Brayton è usato in tutti i motori a turbina a gas, turbogetti, turboventole o turboeliche, e che tutti hanno un compressore, una sezione di combustione e una turbina che aziona il compressore. Il programma EngineSim della NASA usa l'analisi del ciclo Brayton per prevedere la spinta e la portata di combustibile di un motore.

Le turbine a gas a terra seguono lo stesso ciclo. Gli esempi di consumo specifico dell'EIA mostrano perché il progetto del ciclo conta: 7500 Btu/kWh corrisponde a circa il 45% di rendimento, contro circa il 33% a 10500 Btu/kWh. Aumentare il rapporto delle pressioni e la temperatura di ingresso in turbina, e recuperare il calore di scarico, è il modo in cui le centrali si avvicinano al valore migliore.

Su Saving Planets: Aerodinamica I · Introduzione all'ingegneria aerospaziale

Fonti: NASA Glenn: Turbine engine thermodynamic cycle (Brayton cycle) (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/brayton.html) · U.S. EIA: What is the efficiency of different types of power plants? (https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=107&t=3)

Risorse di apprendimento gratuite

- NASA Glenn: Brayton cycle (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/brayton.html): Pagina gratuita della NASA.
- NASA Glenn: Otto cycle (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/otto.html): Pagina gratuita della NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): Lezioni sui cicli.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): Appunti sui cicli di propulsione.

☐ **Ho finito questa unità**

Cicli di potenza a vapore e cicli frigoriferi

Il ciclo Rankine ideale e i suoi quattro dispositivi, il lavoro della pompa, come aumentare il rendimento (pressione e temperatura di caldaia più alte, pressione di condensazione più bassa, risurriscaldamento, rigenerazione), il ciclo frigorifero a compressione di vapore e le pompe di calore, i refrigeranti e la cogenerazione.

Obiettivi di apprendimento

Alla fine di questa unità saprai:

- Analizzare un ciclo Rankine ideale con le tabelle del vapore.
- Spiegare come pressione, surriscaldamento e risurriscaldamento cambiano il rendimento.
- Analizzare un ciclo frigorifero ideale a compressione di vapore.
- Collegare il COP del ciclo alle prestazioni di una pompa di calore.

Concetti chiave

- Ciclo Rankine ideale: pompa (compressione isoentropica del liquido), caldaia (riscaldamento a pressione costante fino a vapore surriscaldato), turbina (espansione isoentropica), condensatore (condensazione a pressione costante).
- Il lavoro della pompa è piccolo perché il liquido ha un v piccolo: w_p ≈ v(p_2 − p_1). Lavoro netto = w_turb − w_pump; η = w_net/q_in.
- Il rendimento aumenta con una temperatura media di adduzione del calore più alta (pressione di caldaia più alta, più surriscaldamento, risurriscaldamento) e una pressione di condensazione più bassa. La rigenerazione con preriscaldatori dell’acqua di alimento preriscalda l’acqua con vapore spillato dalla turbina.
- Refrigerazione a compressione di vapore: compressore (fino a vapore surriscaldato), condensatore (cede Q_H), valvola di espansione (laminazione, h_3 = h_4), evaporatore (assorbe Q_L). COP_R = (h_1 − h_4)/(h_2 − h_1).
- Una pompa di calore è lo stesso ciclo usato per riscaldare, con COP_HP = (h_2 − h_3)/(h_2 − h_1). I refrigeranti si scelgono per le proprietà di saturazione, la sicurezza e il basso potenziale di riscaldamento globale.

Equazioni chiave

$$w_p = v(p_2 - p_1)$$

`w_p=v(p_2-p_1)`

Lavoro della pompa

$$\eta = \frac{w_t - w_p}{q_{in}}$$

=_t-w_pq_in

Rendimento Rankine

$$COP_R = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

COP_R=(h_1-h_4)/(h_2-h_1)

COP di un frigorifero

$$h_3 = h_4$$

h_3=h_4

Valvola di espansione

Esempi svolti passo passo

Esempio 10.1 Un ciclo Rankine ideale lavora tra 3 MPa/350 °C e 75 kPa. Tabelle del vapore: h_1 = 384.44, v_1 = 0.001037 m³/kg, h_3 = 3116.1, h_4 = 2403.0 kJ/kg. Trova w_p, q_in, w_net e η.

1. w_p = 0.001037 × (3000 − 75) = 3.03 kJ/kg; h_2 = 387.47.
2. q_in = 3116.1 − 387.47 = 2728.6 kJ/kg.
3. w_net = (3116.1 − 2403.0) − 3.03 = 710.1 kJ/kg; η = 710.1/2728.6.

Risposta: w_p = 3.03 kJ/kg, q_in = 2728.6 kJ/kg, w_net = 710.1 kJ/kg, η = 26.0%.

Esempio 10.2 Un ciclo a compressione di vapore ha h_1 = 244.5, h_2 = 275.4 e h_3 = h_4 = 95.5 kJ/kg (valori di esempio). Trova q_L, w_in e COP_R.

1. q_L = 244.5 − 95.5 = 149.0 kJ/kg.
2. w = 275.4 − 244.5 = 30.9 kJ/kg.
3. COP = 149.0/30.9.

Risposta: q_L = 149.0 kJ/kg, w = 30.9 kJ/kg, COP_R = 4.82.

Esempio 10.3 Per quel ciclo usato come pompa di calore, trova COP_HP.

1. q_H = 275.4 − 95.5 = 179.9 kJ/kg.
2. COP_HP = 179.9/30.9.

Risposta: COP_HP = 5.82 (= COP_R + 1).

Esercizi

Svolgi ciascuno prima su carta, poi controlla.

1. Nell’esempio Rankine, qual è il calore ceduto?

   2403.0 − 384.44 = 2018.6 kJ/kg.

2. Quale frazione del lavoro della turbina usa la pompa?

   3.03/713.1 = 0.425%.

3. Trova la portata di vapore per 100 MW netti nell’esempio.

   100,000/710.1 = 140.8 kg/s.

4. Perché abbassare la pressione del condensatore aiuta?

   Abbassa la temperatura di cessione del calore.

Errori concettuali comuni

Mito: Il lavoro della pompa in un ciclo Rankine è grande.
In realtà: È minimo perché il liquido è quasi incomprimibile.

Mito: La valvola di espansione compie lavoro.
In realtà: È una laminazione: h costante, nessun lavoro.

Mito: Più surriscaldamento aiuta sempre, senza limiti.
In realtà: I materiali della turbina limitano la temperatura.

Flashcard

Rankine

Pompa, caldaia, turbina, condensatore.

Lavoro della pompa

$v(p_2 - p_1)$.

Risurriscaldamento

Alza la T media di adduzione del calore, scarico più secco.

Compressione di vapore

Compressore, condensatore, valvola, evaporatore.

COP_R

$(h_1 - h_4)/(h_2 - h_1)$.

Valvola di laminazione

$h_3 = h_4$.

Quiz di autoverifica

1. In un ciclo Rankine il calore è fornito nel/nella...

pompa

caldaia

turbina

condensatore

caldaia. Pressione costante.

2. Il lavoro della pompa è circa...

v Δp

c_pΔT

h_fg

esattamente zero

v Δp. Liquido incomprimibile.

3. In refrigerazione, Q_L è assorbito nel/nella...

condensatore

evaporatore

compressore

valvola

evaporatore. Lato freddo.

4. COP_HP meno COP_R è...

0

1

η

2

1. q_H = q_L + w.

Rifai questo quiz

Come questo aiuta a salvare il pianeta

L'ufficio geotermico del DOE spiega che le centrali geotermiche portano in superficie fluido caldo attraverso pozzi e ne convertono il calore in vapore che aziona le turbine, un ciclo della famiglia Rankine con la Terra come caldaia. Le centrali geotermiche possono funzionare praticamente 24 ore al giorno indipendentemente dal meteo, e l'analisi del DOE vede un potenziale di 90 gigawatt di elettricità geotermica negli Stati Uniti entro il 2050 se i costi della geotermia avanzata scendono.

Le centrali nucleari usano lo stesso ciclo Rankine, e l'articolo del DOE sulle pompe di calore descrive il ciclo a compressione di vapore al contrario: portare calore nelle case d'inverno e toglierlo d'estate. Da cicli Rankine e frigoriferi migliori verrà gran parte dell'elettricità pulita e del riscaldamento efficiente del mondo.

Su Saving Planets: Soluzioni · Osservazione della Terra

Fonti: U.S. DOE: Geothermal basics (https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics) · U.S. DOE: Nuclear 101: How does a nuclear reactor work? (May 2025) (https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-101-how-does-nuclear-reactor-work) · U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps)

Risorse di apprendimento gratuite

- NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/): Tabelle del vapore e dei refrigeranti.
- OpenStax UP2, 4.3 Refrigerators and heat pumps (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-3-refrigerators-and-heat-pumps): Sezione di un manuale gratuito.
- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): Lezioni sui cicli a vapore.

- NASA Glenn: Second law of thermodynamics (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/thermo2.html): Pagina gratuita della NASA.

☐ **Ho finito questa unità**

Esercizi

Questi esercizi stanno dentro ogni unità. Falli su carta, poi apri la risposta.

1. Sistemi, proprietà, energia e rendimento
   4 esercizi
2. Sostanze pure, cambiamenti di fase e tabelle delle proprietà
   4 esercizi
3. Trasferimento di energia come lavoro e calore
   4 esercizi
4. Il primo principio per i sistemi chiusi
   4 esercizi
5. Il primo principio per i volumi di controllo: dispositivi in regime stazionario
   4 esercizi
6. Il secondo principio: macchine termiche, frigoriferi e limiti di Carnot
   4 esercizi
7. Entropia e rendimento isoentropico
   4 esercizi
8. Exergia: quanta energia è utile
   4 esercizi
9. Cicli di potenza a gas: Otto, Diesel e Brayton
   4 esercizi
10. Cicli di potenza a vapore e cicli frigoriferi
    4 esercizi

Il laboratorio (Thermodynamics lab)

Il laboratorio è la parte pratica del corso. Qui è gratuito e solo per esercitarsi, senza crediti.

Ogni laboratorio si può svolgere in una simulazione gratuita o con oggetti da cucina. Acqua calda e vapore ustionano: usa guanti da forno, tieni il bollitore su un piano stabile, versa lontano da te e tieni lontani bambini e animali. Non riscaldare mai un contenitore chiuso.

Riferimento per la sicurezza: NFPA: Burn awareness information (https://www.nfpa.org/education-and-research/home-fire-safety/burns)

Laboratorio A: la legge dei gas ideali in PhET Gas Properties

SETTIMANA 2

Obiettivo: Mostrare che la pressione è proporzionale alla temperatura assoluta a volume e quantità fissati, e che pV/T resta costante.

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \ (V,\ m \text{ fixed})$$

```
(p_1)/(T_1)=(p_2)/(T_2)\ \ (V,\ m\ fixed)
```

Legge dei gas ideali a volume costante

Procedimento

1. Apri PhET Gas Properties, scheda Ideal; immetti gas e mantieni il volume costante.
2. Riscalda il gas a passi e registra T e p.
3. Traccia p in funzione di T in kelvin; prolunga la retta fino a p = 0.
4. Ripeti a pressione costante e registra il volume.

Tabella dei dati

T (K)	p (kPa), partendo da 100 kPa a 300 K
300	100
400	133.3
600	200

Valori da gas ideale; i numeri del simulatore oscillano un po' perché conta gli urti delle particelle.

Calcolo di esempio

1. p_2 = 100 × 400/300 = 133.3 kPa.
2. La retta che passa per i dati incontra p = 0 a T = 0 K.

> **Sicurezza**
>
> - Solo computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Gas Properties funziona in un browser.

PhET: Gas Properties (https://phet.colorado.edu/en/simulations/gas-properties) · PhET: States of Matter (https://phet.colorado.edu/en/simulations/states-of-matter)

Legame con il pianeta: Il DOE spiega che i progettisti di reattori pressurizzano l'acqua perché non bolla; le stesse relazioni di stato determinano il progetto di ogni caldaia e di ogni serbatoio. U.S. DOE: Nuclear 101: How does a nuclear reactor work? (May 2025) (https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-101-how-does-nuclear-reactor-work)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio B: bilancio di energia e rendimento di un bollitore

SETTIMANA 5

Obiettivo: Applicare il primo principio al riscaldamento dell’acqua e trovare quanta dell’energia elettrica di un bollitore arriva all’acqua.

$$\eta = \frac{mc\Delta T}{P\,t}$$

`=(mcΔ T)/(P t)`

Rendimento del bollitore

Procedimento

1. Pesa 1.00 kg (1 L) di acqua del rubinetto e misurane la temperatura.
2. Leggi la potenza del bollitore sull’etichetta.
3. Cronometra quanto impiega a bollire (il bollitore si spegne).
4. Calcola il calore assorbito e l’energia elettrica usata.

Tabella dei dati

Grandezza	Valore
Calore dell’acqua, 1 kg 20→100 °C (kJ)	334.4
Energia elettrica, 1500 W × 250 s (kJ)	375.0
Rendimento	89.2%

Valori di esempio; il tempo del tuo bollitore dipende dalla potenza, dalla temperatura iniziale dell’acqua e dall’altitudine.

Calcolo di esempio

1. Q = 1 × 4.18 × 80 = 334.4 kJ.
2. η = 334.4/375 = 89.2%.

> **Sicurezza**
>
> - Vapore e acqua bollente ustionano: tieni il coperchio chiuso, versa lontano da te e tieni lontani bambini e animali.
> - Non toccare il corpo del bollitore finché è caldo.

Alternativa a casa o virtuale

- È un laboratorio a casa.

PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes)

Legame con il pianeta: Il DOE osserva che il riscaldamento a resistenza trasforma 1 kWh in 1 kWh di calore, mentre le pompe di calore riducono il consumo di elettricità di circa il 50%. U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio C: fusione del ghiaccio e calore latente

SETTIMANA 5

Obiettivo: Usare un bilancio termico per prevedere la temperatura finale quando il ghiaccio fonde in acqua tiepida, e confrontarla con la misura.

$$m_w c(T_w - T_f) = m_i h_{if} + m_i c T_f$$

`m_wc(T_w-T_f)=m_i h_if+m_ic T_f`

Calore perso dall'acqua = calore guadagnato dal ghiaccio

Procedimento

1. Metti 300 g di acqua a 40 °C in una tazza termica.
2. Aggiungi 50 g di ghiaccio a 0 °C (asciugalo).
3. Mescola delicatamente finché tutto il ghiaccio non è fuso e registra la temperatura più bassa.
4. Confronta con la temperatura finale prevista.

Tabella dei dati

Grandezza	**Valore**
Acqua	0.300 kg a 40 °C
Ice	0.050 kg a 0 °C
T finale prevista	22.9 °C

Valori di esempio; il calore ricevuto dalla tazza e dall'aria rende il valore misurato un po' più alto.

Calcolo di esempio

1. 0.3 × 4.18 × (40 − T) = 0.05 × 334 + 0.05 × 4.18 × T.
2. T = 33.46/1.463 = 22.9 °C.

> **Sicurezza**
>
> - Usa acqua calda del rubinetto, non bollente.

Alternativa a casa o virtuale

- È un laboratorio a casa.

PhET: States of Matter (https://phet.colorado.edu/en/simulations/states-of-matter) · PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes)

Legame con il pianeta: Il calore latente è il principio dell'accumulo termico; il DOE osserva che la geotermia può anche supportare l'accumulo di energia termica. U.S. DOE: Geothermal basics (https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio D: isolamento e velocità di raffreddamento

SETTIMANA 4

Obiettivo: Confrontare la velocità con cui l'acqua calda si raffredda in una tazza normale e in una termica, e trovare la costante di raffreddamento di ciascuna.

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = e^{-kt}$$

`(T-T_∞)/(T_0-T_∞)=e^-kt`

Legge di raffreddamento di Newton

Procedimento

1. Riempi due tazze, una normale e una termica (o avvolta in un asciugamano), con acqua a circa 80 °C.
2. Registra la temperatura ogni 2 minuti per 20 minuti; annota la temperatura ambiente.
3. Calcola k = ln[(T_0 − T∞)/(T − T∞)]/t per ciascuna.
4. Confronta i flussi di perdita di calore.

Tabella dei dati

Mug	T dopo 20 min (°C)	k (1/min)
Normale	60	0.0203
Termica	70	0.00912

Valori di esempio con ambiente a 20 °C.

Calcolo di esempio

1. Normale: k = ln(60/40)/20 = 0.0203 al minuto.
2. Termica: k = ln(60/50)/20 = 0.00912 al minuto, meno della metà.

> **Sicurezza**
>
> - L'acqua calda ustiona: usa guanti da forno e tieni le tazze su una superficie stabile, lontano dai bordi.

Alternativa a casa o virtuale

- È un laboratorio a casa.

PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes)

Legame con il pianeta: Il DOE consiglia di isolare la casa prima di installare una pompa di calore, perché l'isolamento riduce il calore che un'abitazione deve reintegrare. U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio E: limiti di Carnot per una pompa di calore

SETTIMANA 8

Obiettivo: Costruire un foglio di calcolo del COP di Carnot di una pompa di calore in funzione della temperatura esterna e confrontarlo con il COP nominale di un'unità reale.

$$COP_{HP,Carnot} = \frac{T_H}{T_H - T_L}$$

```
COP_HP,Carnot=(T_H)/(T_H-T_L)
```

Pompa di calore di Carnot

Procedimento

1. Fissa la temperatura interna T_H = 294 K.
2. Elenca le temperature esterne da 253 K a 288 K.
3. Calcola il COP di Carnot per ciascuna.
4. Cerca il rendimento nominale di una pompa di calore sull'etichetta o nella scheda ENERGY STAR e confronta.

Tabella dei dati

T_L (K)	COP_Carnot
263	9.48
273	14.0
283	26.7

Limiti ideali; le pompe di calore reali ne raggiungono una frazione.

Calcolo di esempio

1. COP = 294/(294 − 263) = 9.48.
2. Aria esterna più fredda significa un limite più basso.

> **Sicurezza**
>
> - Solo computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

OpenStax UP2, 4.3 Refrigerators and heat pumps (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-3-refrigerators-and-heat-pumps)

Legame con il pianeta: Il DOE afferma che le pompe di calore geotermiche, sfruttando la temperatura stabile del terreno, possono ridurre il consumo di energia dal 30% al 60%. U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Laboratorio F: foglio di calcolo del ciclo Rankine

SETTIMANA 15

Obiettivo: Calcolare un ciclo Rankine ideale dai valori delle tabelle del vapore e vedere come i termini di turbina, pompa e caldaia determinano il rendimento.

$$\eta = \frac{(h_3 - h_4) - v_1(p_2 - p_1)}{h_3 - h_2}$$

```
=((h_3-h_4)-v_1(p_2-p_1))/(h_3-h_2)
```

Rendimento Rankine ideale

Procedimento

1. Cerca i quattro stati nel WebBook del NIST (o usa i valori forniti).
2. Calcola il lavoro della pompa, il calore fornito, il lavoro della turbina, il lavoro netto e η.
3. Cambia la pressione del condensatore o la temperatura della caldaia con nuovi valori di tabella e ricalcola.
4. Trova la portata di vapore per una centrale da 100 MW.

Tabella dei dati

Grandezza	Valore
w_pump (kJ/kg)	3.03
q_in (kJ/kg)	2728.6
w_net (kJ/kg)	710.1
η	26.0%

Valori delle tabelle del vapore per 3 MPa/350 °C e 75 kPa.

Calcolo di esempio

1. η = 710.1/2728.6 = 26.0%.
2. Portata di vapore per 100 MW = 100000/710.1 = 140.8 kg/s.

> **Sicurezza**
>
> - Solo computer.

Alternativa a casa o virtuale

- Va bene qualsiasi foglio di calcolo.

NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/)

Legame con il pianeta: Il DOE afferma che le centrali nucleari e geotermiche trasformano entrambe il calore in vapore che fa girare le turbine, il ciclo di questo laboratorio. U.S. DOE: Nuclear 101: How does a nuclear reactor work? (May 2025) (https://www.energy.gov/ne/articles/nuclear-101-how-does-nuclear-reactor-work) · U.S. DOE: Geothermal basics (https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics)

- [ ] **Ho completato questo laboratorio (reale o virtuale)**

Serie di esercizi per gli esami

Cronometrati: circa 10 minuti per problema. Poi confronta con le soluzioni complete.

Esercizi di preparazione all'esame intermedio (unità 1–5)

1. Una centrale ha un consumo specifico di calore di 8530 Btu/kWh. Trova il suo rendimento.
    1. 3412/8530.

    Risposta: 40.0%.

2. Trova la massa d'aria in un serbatoio da 2 m^3 a 200 kPa e 350 K.
    1. m = 200 × 2/(0.287 × 350).

    Risposta: 3.98 kg.

3. Trova h a 100 kPa con titolo 0.9 (h_f = 417.51, h_fg = 2257.5 kJ/kg).
    1. 417.51 + 0.9 × 2257.5.

    Risposta: 2449.3 kJ/kg.

4. 3 kg d'acqua vengono riscaldati da 15 °C a 65 °C. Trova Q.
    1. 3 × 4.18 × 50.

    Risposta: 627 kJ.

5. Vapore a 10 kg/s perde 800 kJ/kg in una turbina adiabatica. Trova la potenza.
    1. 10 × 800.

    Risposta: 8000 kW.

Serie di esercizi finale (tutte le unità)

1. Trova il rendimento di Carnot tra 900 K e 300 K.

    1. 1 − 300/900.

    Risposta: 66.7%.

2. Una pompa di calore fornisce 12 kW con COP 4. Trova la potenza elettrica e il calore prelevato dall’esterno.

    1. W = 12/4; Q_L = 12 − 3.

    Risposta: 3 kW e 9 kW.

3. Trova Δs di 1 kg d’aria da 300 K, 100 kPa a 600 K, 100 kPa.

    1. 1.005 ln 2.

    Risposta: 0.697 kJ/(kg·K).

4. Trova l’exergia di 500 kJ di calore a 1000 K con T_0 = 300 K.

    1. 500 × 0.7.

    Risposta: 350 kJ.

5. Trova il rendimento Otto con r = 9.

    1. 1 − 9^(−0.4).

    Risposta: 58.5%.

6. Un ciclo frigorifero ha q_L = 150 kJ/kg e w = 37.5 kJ/kg. Trova COP_R e COP_HP.

    1. 150/37.5.

    Risposta: 4.0 e 5.0.

Formulario

$$\eta = 3412/\text{heat rate},\ v = V/m$$

$$pv = RT,\ y = y_f + x\,y_{fg}$$

$$W_b = \int p\,dV,\ W = mRT\ln(V_2/V_1)$$

$$Q - W = \Delta U,\ h = u + pv$$

$$\Delta u = c_v \Delta T,\ \Delta h = c_p \Delta T,\ Q = mc\Delta T$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}(\Delta h + \Delta V^2/2 + g\Delta z)$$

$$\eta = W/Q_H,\ COP_R = Q_L/W,\ COP_{HP} = Q_H/W$$

$$\eta_{Carnot} = 1 - T_L/T_H$$

$$\Delta s = c_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(p_2/p_1) \qquad T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{(k-1)/k}$$

$$X_Q = Q(1 - T_0/T),\ I = T_0 S_{gen} \qquad \eta_{Otto} = 1 - r^{1-k},\ \eta_{Brayton} = 1 - r_p^{(1-k)/k}$$

$$w_p = v\Delta p,\ COP_R = (h_1 - h_4)/(h_2 - h_1)$$

Costanti

Costante	Valore
Costante universale dei gas	R_u = 8.314 kJ/(kmol·K)
Aria (gas ideale, temperatura ambiente, valori da manuale)	R = 0.287 kJ/(kg·K), c_p = 1.005, c_v = 0.718 kJ/(kg·K), k = 1.4
Acqua liquida (valore da manuale)	c = 4.18 kJ/(kg·K)
Calori latenti (valori da manuale)	fusione del ghiaccio 334 kJ/kg; vaporizzazione a 100 °C 2257 kJ/kg
Unità di energia	1 kWh = 3600 kJ; 1 Btu = 1.055 kJ; 1 kWh = 3412 Btu
Temperatura assoluta	T(K) = T(°C) + 273.15

Fonte: NIST: CODATA value of the molar gas constant (https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?r)

Testi, dati e simulazioni gratuiti

Usa queste lezioni, dati sulle proprietà e simulazioni gratuiti insieme al corso.

- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): Appunti ed esercizi gratuiti del MIT.
- MIT OpenCourseWare 16.01–16.04 Unified Engineering (2005–2006) (https://ocw.mit.edu/courses/16-01-unified-engineering-i-ii-iii-iv-fall-2005-spring-2006/): Appunti gratuiti di termodinamica del MIT.
- OpenStax University Physics Volume 2, Chapter 3: The first law of thermodynamics (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-introduction): Capitolo di libro gratuito.
- OpenStax University Physics Volume 2, Chapter 4: The second law of thermodynamics (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-introduction): Capitolo di libro gratuito.
- NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/): Tabelle gratuite delle proprietà del vapore e dei refrigeranti.
- PhET: Gas Properties (https://phet.colorado.edu/en/simulations/gas-properties): Pressione, volume e temperatura in modo interattivo.

Glossario

Adiabatico
Nessuno scambio di calore.

Rapporto dei lavori
Lavoro del compressore su lavoro della turbina.

COP
Coefficiente di prestazione di un frigorifero o di una pompa di calore.

Ciclo di Carnot
Ciclo reversibile tra due serbatoi; il migliore possibile.

Volume di controllo
Regione dello spazio che la massa può attraversare.

Stato morto
Equilibrio con l'ambiente.

Entalpia
$h = u + pv$.

Entropia
Proprietà con $dS = \delta Q_{rev}/T$; misura l'irreversibilità.

Exergia
Massimo lavoro utile ottenibile.

Macchina termica
Dispositivo che trasforma calore in lavoro in un ciclo.

Pompa di calore
Dispositivo che sposta calore dal freddo al caldo usando lavoro.

Consumo specifico di calore
Btu di combustibile per kWh prodotto.

Isoentropico
Entropia costante; reversibile e adiabatico.

Calore latente
Energia per il cambiamento di fase a temperatura costante.

Titolo
Frazione in massa di vapore di una miscela satura.

Ciclo Rankine
Ciclo di potenza a vapore: pompa, caldaia, turbina, condensatore.

Trasformazione reversibile
Trasformazione idealizzata senza generazione di entropia.

Saturazione
Stato in cui liquido e vapore coesistono.

Calore specifico
Energia per innalzare 1 kg di 1 K.

Laminazione
Caduta di pressione a entalpia costante.

Griglia di autovalutazione

Non si assegnano voti né crediti. Usala per valutare onestamente a che punto sei in ogni unità.

Livello	Come si presenta
4 · Padronanza	Disegna sistemi e diagrammi, trova correttamente gli stati, scrive bilanci completi di massa, energia ed entropia, verifica rispetto ai limiti di Carnot e svolge i laboratori in sicurezza.
3 · Competente	Risolve gli esercizi con qualche errore occasionale di tabelle o unità.
2 · In sviluppo	Segue gli esempi svolti ma confonde sistemi aperti e chiusi, o usa i °C nei rapporti.
1 · Principiante	Inserisce numeri nelle formule senza schema del sistema; deve ripassare l'unità.

Pesi suggeriti se vuoi un punteggio

Parte	Peso
Esercizi	20%
Laboratori	25%
Serie di esercizi di metà corso	25%
Serie di esercizi finale	30%

Punta al livello 3 o superiore in ogni unità prima di passare al corso successivo.

Corsi correlati

- Aerodinamica I AERO 310
- Meccanica dei fluidi ENGR 330
- Prestazioni dei velivoli AERO 320
- Tutti i corsi