Última actualización: November 1, 2026

🗺️ Ruta de cuatro años · Año 2, Otoño · 🧮 Calculadora integrada

Sobre este curso

Este curso gratuito tiene 10 unidades y 6 laboratorios. Son los totales reales, no un programa más largo recortado.

Una comprobación es un número o un resultado de código en una página de curso que un script vuelve a calcular antes de publicar. El número impreso y el recalculado tienen que coincidir.

> Este es el esquema de un curso gratuito de autoestudio escrito por Saving Planets. No es un curso universitario, no otorga créditos académicos y ninguna institución participa.
>
> Su alcance sigue un curso semestral de termodinámica para ingeniería de tercer año. Se basa en los temas y la profundidad de MIT 16.050 Thermal Energy y de las partes de termodinámica de MIT Unified Engineering (ambos gratuitos en MIT OpenCourseWare), y en cursos como Purdue ME 200 y Georgia Tech ME 3322, usando los capítulos gratuitos de OpenStax University Physics Volume 2 sobre el calor y las leyes de la termodinámica y los datos gratuitos de propiedades de fluidos del NIST, que enlazamos donde ayudan. Ninguno de esos autores o centros respalda esta página.
>
> Lo que añadimos: cada unidad se vincula a trabajo real con una fuente pública citada (eficiencia de centrales eléctricas, centrales nucleares y solares de concentración, bombas de calor, cogeneración y energía geotérmica), cada número de la página se recalcula con un script de verificación antes de publicarse, y cada práctica tiene una simulación gratuita o una versión segura para hacer en casa.
>
> Síguelo en orden. Cada unidad tiene objetivos, ideas clave, ecuaciones, ejemplos paso a paso, práctica con respuestas completas, errores comunes, tarjetas de estudio y un cuestionario. Tu progreso se guarda solo en este navegador.

Cómo ayuda este curso a salvar el planeta

Casi toda la electricidad obtenida de combustibles, uranio, luz solar concentrada o el calor de la Tierra proviene de un ciclo termodinámico, y casi toda la calefacción y la refrigeración también funcionan con uno. La primera ley dice que la energía se conserva; la segunda dice cuánta puede convertirse en trabajo útil. Entre las dos deciden cuánto combustible quema el mundo.

Mejores ciclos, el aprovechamiento del calor residual y las bombas de calor están entre las formas más rápidas de reducir las emisiones. Cada unidad termina con una breve sección con fuentes. Los valores que no proceden de una fuente se indican como valores de ejemplo.

Para docentes

Puedes enseñar este curso o dejar que un estudiante lo haga solo. Es gratis. Saving Planets no pone nota ni da crédito escolar.

- Esta página es el curso completo: 10 unidades y 6 laboratorios (ENGR 320).
- Calcula 15 semanas, unas 6 a 9 horas por semana, incluidas las semanas de laboratorio.
- Sigue el calendario de 15 semanas. Lee la unidad, haz la práctica en papel y luego abre la respuesta. En una semana de laboratorio, haz el laboratorio o la versión en casa.
- Una comprobación es un número o un resultado de código en la página que un script vuelve a calcular antes de publicar. El número que ves y el recalculado tienen que coincidir.
- Usa Imprimir esta página, o descarga la guía de estudio en PDF. La hoja de fórmulas está cerca del final.
- Pregunta: ¿cómo ayuda esta unidad a las personas y al planeta? Cada unidad tiene un recuadro verde con un dato y su fuente.
- Copia la plantilla de guía docente y escribe el nombre de tu clase, el tiempo que tienes y las preguntas que harás. Abrir la plantilla de guía docente

Antes de empezar

Requisitos previos

- Cálculo II y III: integrales, derivadas parciales y logaritmos naturales.
- Física I y Química general I: energía, trabajo, gases ideales y calor.
- Ecuaciones diferenciales ayuda, pero no es obligatorio.
- Soltura con hojas de cálculo para tablas e interpolación.

Cómo estudiar

- Empieza cada problema dibujando el sistema o el volumen de control e indicando si es cerrado o abierto, estacionario o no.
- Enumera los estados conocidos y busca las propiedades antes de escribir cualquier balance.
- Escribe primero el balance de energía con palabras (energía que entra − energía que sale = cambio de la energía almacenada) y luego elimina los términos que puedas justificar.
- Mantén las unidades coherentes: kJ, kPa, m^3, kg y kelvin; nunca uses °C dentro de un cociente de temperaturas.
- Dibuja cada proceso en un diagrama T–s o p–v; los ciclos se vuelven mucho más fáciles de seguir.
- Haz cada ejercicio en papel antes de abrir la respuesta, y repite los cuestionarios unos días después.

Qué necesitas

- Una computadora o tableta para las simulaciones gratuitas de PhET Gas Properties, Energy Forms and Changes y States of Matter.
- Un termómetro de cocina (o una sonda digital barata), una taza medidora y una báscula de cocina.
- Un hervidor eléctrico de potencia conocida, cubitos de hielo, una taza aislante o un vaso de espuma.
- El cronómetro de un teléfono.
- Una hoja de cálculo para las prácticas de ciclos.

Calendario sugerido de 15 semanas

Unas 6 a 9 horas por semana: lectura, problemas de práctica y, en las semanas de laboratorio, el laboratorio.

Semana	Unidad	Temas	Lectura
1	Sistemas, propiedades, energía y eficiencia	Sistemas, propiedades, temperatura, unidades de energía, consumo térmico unitario	OpenStax UP2 1.1, 3.1; EIA
2	Sustancias puras, cambio de fase y tablas de propiedades	Fases, saturación, calidad; Práctica A	UP2 1.5, 2.1; NIST WebBook
3	Sustancias puras, cambio de fase y tablas de propiedades	Tablas de vapor, interpolación, gas ideal	NIST WebBook
4	Transferencia de energía por trabajo y calor	Trabajo de frontera, de eje y eléctrico; modos de transferencia de calor; Práctica D	UP2 3.2, 1.6
5	La primera ley para sistemas cerrados	Primera ley para sistemas cerrados, calores específicos, calor latente; Prácticas B y C	UP2 3.3, 3.5
6	La primera ley para volúmenes de control: dispositivos de flujo estacionario	Masa y energía para volúmenes de control; toberas, turbinas, compresores	MIT 16.050
7	La primera ley para volúmenes de control: dispositivos de flujo estacionario	Válvulas de estrangulamiento, mezcla, intercambiadores de calor; repaso para el parcial	MIT 16.050
8	La segunda ley: máquinas térmicas, refrigeradores y límites de Carnot	Segunda ley, máquinas, bombas de calor, Carnot; Práctica E	UP2 4.2–4.5

Semana	Unidad	Temas	Lectura
9	Entropía y eficiencia isentrópica	Entropía, desigualdad de Clausius, generación de entropía	UP2 4.6–4.7
10	Entropía y eficiencia isentrópica	Procesos y eficiencias isentrópicos	UP2 3.6; NASA Glenn
11	Exergía: cuánta energía es útil	Exergía, irreversibilidad, eficiencia según la segunda ley	MIT 16.050
12	Ciclos de potencia de gas: Otto, Diesel y Brayton	Ciclos Otto y Diesel	NASA Glenn
13	Ciclos de potencia de gas: Otto, Diesel y Brayton	Ciclo Brayton, regeneración, ciclos combinados	NASA Glenn; MIT Unified
14	Ciclos de potencia de vapor y de refrigeración	Ciclo Rankine y sus mejoras	NIST WebBook
15	Ciclos de potencia de vapor y de refrigeración	Refrigeración y bombas de calor; Práctica F; repaso para el final	UP2 4.3

Tu progreso

Marca las unidades y los laboratorios al terminarlos y haz los cuestionarios. El progreso y las puntuaciones se guardan solo en este navegador y nunca se nos envían.

Unidades

Sistemas, propiedades, energía y eficiencia

Sistemas cerrados, volúmenes de control y alrededores, propiedades y estados, procesos de equilibrio y cuasiequilibrio, escalas de temperatura y la ley cero, presión, formas de energía, unidades de energía, y la eficiencia como salida útil entre entrada requerida.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Elegir un sistema o un volumen de control y su frontera.
- Distinguir propiedades intensivas de extensivas, y funciones de estado de funciones de trayectoria.
- Convertir entre kJ, kWh y Btu, y entre °C y K.
- Calcular una eficiencia y la eficiencia de una central a partir de su consumo térmico unitario.

Conceptos clave

- Un sistema es la región que estudiamos; un sistema cerrado intercambia energía pero no masa con sus alrededores, mientras que un volumen de control (sistema abierto) deja que la masa cruce su frontera.
- Propiedades como la presión p, la temperatura T y el volumen específico v = V/m describen el estado. Las propiedades intensivas (p, T, v) no dependen del tamaño; las extensivas (V, m, E) sí. Dos propiedades intensivas independientes fijan el estado de una sustancia simple compresible.
- La ley cero: dos cuerpos que están cada uno en equilibrio térmico con un tercero están en equilibrio entre sí; por eso funcionan los termómetros. La temperatura absoluta T(K) = T(°C) + 273.15 debe usarse en todo cociente y en toda ley de los gases.
- La energía se almacena como energía interna U, energía cinética ½mV² y energía potencial mgz, y solo cruza una frontera como calor Q o trabajo W.
- Eficiencia = salida útil ÷ entrada requerida. Para las centrales, la EIA de EE. UU. usa el consumo térmico unitario: Btu de combustible por kWh de electricidad, con 1 kWh = 3412 Btu.

Ecuaciones clave

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

`v=V/m,\ \ ρ=1v`

Volumen específico y densidad

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

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

Temperatura absoluta

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

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

Energía almacenada total

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

`=3412\ Btu/kWhheat rate`

Eficiencia de una central a partir del consumo térmico unitario (EIA)

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 1.1 La EIA da como ejemplos consumos térmicos unitarios de 10500 Btu/kWh y 7500 Btu/kWh. Halla cada eficiencia.

1. η = 3412/10,500.
2. η = 3412/7500.

Respuesta: 32.5 % y 45.5 % (la EIA los redondea a 33 % y 45 %).

Ejemplo 1.2 Un tanque contiene 2 kg de gas en 0.5 m³. Halla v y ρ.

1. v = 0.5/2.
2. ρ = 1/v.

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

Ejemplo 1.3 Un auto de 1000 kg a 30 m/s frena hasta detenerse. ¿Cuánta energía cinética se convierte en energía interna de los frenos, en kJ y kWh?

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

Respuesta: 450 kJ = 0.125 kWh.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Convierte 25 °C a kelvin.

   298.15 K.

2. ¿La temperatura es intensiva o extensiva?

   Intensiva.

3. Una central tiene un consumo térmico unitario de 9000 Btu/kWh. Halla su eficiencia.

   3412/9000 = 37.9%.

4. Convierte 1 MWh a GJ.

   3600 MJ = 3.6 GJ.

Ideas erróneas comunes

Mito: El calor y la temperatura son lo mismo.
En realidad: La temperatura es una propiedad; el calor es energía en tránsito.

Mito: Un sistema «contiene calor».
En realidad: Contiene energía interna; el calor solo existe al cruzar una frontera.

Mito: Los cocientes pueden usar °C.
En realidad: Las leyes de los gases y las eficiencias necesitan kelvin.

Tarjetas de estudio

Sistema

Región en estudio.

Volumen de control

La masa puede cruzarlo.

Volumen específico

v = V/m.

Ley cero

Base de los termómetros.

Consumo térmico unitario

Btu por kWh.

1 kWh

3600 kJ = 3412 Btu.

Cuestionario de autoevaluación

1. Un volumen de control permite...

que la masa cruce su frontera

ninguna transferencia de energía

solo calor

nada

que la masa cruce su frontera. Sistema abierto.

2. ¿Cuál es intensiva?

el volumen

la masa

la presión

la energía

la presión. Independiente del tamaño.

3. Un consumo térmico unitario de 6824 Btu/kWh significa una eficiencia de...

25%

50%

68%

100%

50%. 3412/6824.

4. La energía cruza la frontera de un sistema cerrado como...

la masa

calor y trabajo

la temperatura

la presión

calor y trabajo. Solo dos formas.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La Energy Information Administration de EE. UU. mide la eficiencia de las centrales con el consumo térmico unitario: la energía de combustible que usa una central para entregar un kilovatio-hora a la red, contando la electricidad que la propia central consume en la alimentación de combustible, las bombas de la caldera, la refrigeración y el control de la contaminación. Dividir 3412 Btu (la energía de un kWh) entre el consumo térmico unitario da la eficiencia; los ejemplos de la EIA son una central de 10500 Btu con cerca del 33 % y una de 7500 Btu con cerca del 45 %.

Esa diferencia es el sentido de todo este curso. Para la misma electricidad, la central de 7500 Btu quema 7500/10500 = 71.4 % del combustible, es decir, cerca de un 28.6 % menos de combustible y de CO_2. Las leyes de la termodinámica explican adónde va el resto de la energía y cómo los ingenieros recuperan parte de ella.

En Saving Planets: Soluciones · Circuitos

Fuentes: 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)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- OpenStax UP2, 1.1 Temperature and thermal equilibrium (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/1-1-temperature-and-thermal-equilibrium): Sección de libro de texto gratuita.
- OpenStax UP2, 3.1 Thermodynamic systems (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-1-thermodynamic-systems): Sección de libro de texto gratuita.
- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): Apuntes del MIT sobre energía térmica.
- NASA Glenn: First law of thermodynamics (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/thermo1.html): Página gratuita de la NASA.

☐ **Terminé esta unidad**

Sustancias puras, cambio de fase y tablas de propiedades

Fases y cambio de fase, temperatura y presión de saturación, líquido comprimido, mezcla saturada y vapor sobrecalentado, calidad, diagramas T–v y p–v, tablas de vapor e interpolación, la ecuación del gas ideal y cuándo se aplica, y el factor de compresibilidad.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Identificar la fase a partir de p y T con datos de saturación.
- Usar la calidad para hallar v, u y h de una mezcla saturada.
- Interpolar en tablas de propiedades.
- Usar la ley del gas ideal y saber cuándo falla.

Conceptos clave

- Una sustancia pura tiene una composición química fija. A una presión dada, el agua hierve a una sola temperatura de saturación (99.61 °C a 100 kPa); mientras hierve, p y T se mantienen fijas y la calidad de la mezcla x = m_vapor/m_total crece de 0 a 1.
- Para una mezcla saturada, cualquier propiedad específica es y = y_f + x(y_g − y_f) = y_f + x·y_fg, con los valores de líquido saturado (f) y vapor saturado (g) de las tablas.
- Si T es menor que la temperatura de saturación a esa presión, el agua es líquido comprimido (aproximadamente líquido saturado a T); si es mayor, es vapor sobrecalentado, que se encuentra en tablas aparte.
- Interpolación lineal: $y = y_1 + (x - x_1)(y_2 - y_1)/(x_2 - x_1)$. El WebBook gratuito del NIST da los mismos datos para el agua y muchos refrigerantes.
- A baja presión y alta temperatura respecto al punto crítico, los gases cumplen pv = RT con R = R_u/M; para el aire R = 0.287 kJ/(kg·K). Cerca de la saturación (vapor en una caldera) usa las tablas.

Ecuaciones clave

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

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

Calidad

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

`y=y_f+x y_fg`

Propiedad de una mezcla saturada

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

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

Ley de los gases ideales

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

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

Interpolación lineal

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 2.1 A 100 kPa, h_f = 417.51 y h_fg = 2257.5 kJ/kg, v_f = 0.001043 y v_g = 1.6941 m³/kg (tablas de vapor). Halla h y v con calidad 0.6.

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

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

Ejemplo 2.2 Halla la masa de aire en un tanque de 0.5 m³ a 100 kPa y 300 K.

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

Respuesta: m = 0.581 kg.

Ejemplo 2.3 Halla la presión de 2 kg de aire en 0.5 m³ a 400 K.

1. p = mRT/V = 2 × 0.287 × 400/0.5.

Respuesta: p = 459.2 kPa.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. El agua a 100 kPa y 80 °C es…

Líquido comprimido (80 °C < 99.61 °C).

2. El agua a 100 kPa y 150 °C es...

   Vapor sobrecalentado.

3. Interpola h a 25 °C si h = 83.9 a 20 °C y 125.7 a 30 °C (kJ/kg, líquido saturado).

   83.9 + 0.5 × 41.8 = 104.8 kJ/kg.

4. Halla R para el helio (M = 4.003 kg/kmol).

   8.314/4.003 = 2.077 kJ/(kg·K).

Ideas erróneas comunes

Mito: La temperatura sube mientras el agua hierve.
En realidad: A presión constante se mantiene en T_sat hasta que todo el líquido desaparece.

Mito: El vapor de una caldera es un gas ideal.
En realidad: Cerca de la saturación no lo es; usa las tablas de vapor.

Mito: La calidad se aplica al vapor sobrecalentado.
En realidad: Solo a mezclas saturadas, 0 ≤ x ≤ 1.

Tarjetas de estudio

Saturación

Líquido y vapor coexisten a T_sat(p).

Calidad

x = m_g/m.

Propiedad de la mezcla

y_f + x y_fg.

Líquido comprimido

T < T_sat.

Sobrecalentado

T > T_sat.

Gas ideal

pv = RT.

Cuestionario de autoevaluación

1. La calidad es...

la masa de vapor entre la masa total

la masa de líquido entre la total

un cociente de temperaturas

un cociente de presiones

la masa de vapor entre la masa total. x = m_g/m.

2. El agua a 100 kPa y 120 °C es…

líquido comprimido

mezcla saturada

vapor sobrecalentado

sólido

vapor sobrecalentado. Por encima de T_sat.

3. R para el aire es aproximadamente…

8.314

0.287

1.005

4.18

0.287. kJ/(kg·K).

4. Durante la ebullición a p constante, T…

sube

baja

se mantiene constante

oscila

se mantiene constante. Saturación.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

El Departamento de Energía de EE. UU. explica que los reactores nucleares usan el calor de fisión para producir vapor que hace girar una turbina. Todos los reactores comerciales de EE. UU. son de agua ligera: más del 65 % son reactores de agua a presión, que mantienen el agua del núcleo a alta presión para que no hierva y producen vapor en un intercambiador aparte, y cerca de un tercio son reactores de agua en ebullición, que producen vapor directamente en la vasija.

Ambos diseños son ejercicios de esta unidad: subir la presión eleva la temperatura de saturación, así que el agua sigue líquida, y la calidad y la entalpía del vapor fijan cuánto trabajo obtiene la turbina. El DOE cuenta más de 400 reactores comerciales en el mundo, 94 de ellos en Estados Unidos, todos diseñados con tablas de vapor.

En Saving Planets: Soluciones · Química General I

Fuentes: 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/)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/): Tablas de vapor gratuitas.
- OpenStax UP2, 1.5 Phase changes (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/1-5-phase-changes): Sección de libro de texto gratuita.
- 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): Sección de libro de texto gratuita.
- PhET: States of Matter (https://phet.colorado.edu/en/simulations/states-of-matter): El cambio de fase de forma interactiva.

☐ **Terminé esta unidad**

Transferencia de energía por trabajo y calor

Convenios de signos, trabajo de frontera y su área en un diagrama p–V, procesos a presión constante, isotérmicos y politrópicos, trabajo de eje y eléctrico, y los tres modos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Calcular el trabajo de frontera en procesos comunes.
- Mostrar que el trabajo y el calor son funciones de trayectoria.
- Calcular el trabajo y la potencia de eje y eléctricos.
- Estimar flujos de calor por conducción y convección.

Conceptos clave

- Convenio de signos: el calor que entra al sistema y el trabajo realizado por el sistema son positivos (Q_in, W_out). Ambos son funciones de trayectoria: dependen del proceso, no solo de los estados extremos.
- El trabajo de frontera W_b = ∫p dV es el área bajo la curva del proceso en un diagrama p–V. A presión constante, W_b = p(V_2 − V_1).
- Para un gas ideal a temperatura constante, W_b = mRT ln(V_2/V_1). Para un proceso politrópico pV^n = constante (n ≠ 1), W_b = (p_2V_2 − p_1V_1)/(1 − n).
- Trabajo de eje: potencia = par × velocidad angular, $\dot{W} = 2\pi\dot{n}T$. Trabajo eléctrico: W = VIΔt = PΔt.
- El calor se transmite por conducción ($\dot{Q}$ = kAΔT/L a través de una pared), convección ($\dot{Q}$ = hAΔT hacia un fluido en movimiento) y radiación ($\dot{Q} = \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_{surr}^4)$). El aislamiento reduce k; por eso importa la envolvente de los edificios.

Ecuaciones clave

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

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

Trabajo de frontera

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

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

Gas ideal isotérmico

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

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

Proceso politrópico

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

`Q=(kA Δ T)/(L),\ \ Q=hA Δ T`

Conducción y convección

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 3.1 1 kg de aire se expande isotérmicamente a 300 K hasta el doble de su volumen. Halla el trabajo.

1. W = 1 × 0.287 × 300 × ln 2.

Respuesta: W = 59.7 kJ (realizado por el gas).

Ejemplo 3.2 Se comprime aire politrópicamente (n = 1.3) desde 100 kPa y 0.2 m³ hasta 0.1 m³. Halla p_2 y el trabajo.

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

Respuesta: p_2 = 246.2 kPa; W = −15.4 kJ (trabajo realizado sobre el gas).

Ejemplo 3.3 Una pared de 10 m² de área, 0.1 m de espesor y k = 0.04 W/(m·K) (aislante de ejemplo) tiene 20 K de diferencia. Halla la pérdida de calor.

1. $\dot{Q}$ = 0.04 × 10 × 20/0.1.

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

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Un gas se expande a 200 kPa constantes de 0.5 a 0.8 m^3. ¿Trabajo?

   200 × 0.3 = 60 kJ.

2. Un eje entrega 50 N·m a 3000 rpm. ¿Potencia?

   2π × 50 × 50 = 15.7 kW.

3. Un calefactor de 1500 W funciona 10 minutos. ¿Trabajo eléctrico?

   1500 × 600 = 900 kJ.

4. Convección: h = 10 W/(m^2·K), A = 2 m^2, ΔT = 30 K. ¿Flujo de calor?

   600 W.

Ideas erróneas comunes

Mito: El trabajo es una propiedad del estado.
En realidad: Depende de la trayectoria.

Mito: Un tanque rígido puede realizar trabajo de frontera.
En realidad: No; dV = 0.

Mito: Duplicar el espesor del aislante reduce la temperatura a la mitad.
En realidad: Reduce a la mitad el flujo de calor por conducción con el mismo ΔT.

Tarjetas de estudio

Convenio de signos

Q que entra y W que sale, positivos.

Trabajo de frontera

$\int p\,dV$.

Isotérmico

$mRT\ \ln(V_2/V_1)$.

Politrópico

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

Potencia en el eje

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

Conducción

$kA\Delta T/L$.

Cuestionario de autoevaluación

1. El trabajo de frontera es igual a...

$\int V\,dp$

$\int p\,dV$

pV

mRT

$\int p\,dV$. El área bajo la curva p–V.

2. El trabajo isotérmico de un gas ideal es...

$mRT\ln(V_2/V_1)$

$p\,\Delta V$

$mc_v\Delta T$

0

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

3. El calor y el trabajo son...

propiedades

funciones de trayectoria

siempre iguales

intensivos

funciones de trayectoria. Dependen del proceso.

4. El flujo de calor por conducción es proporcional a...

1/k

L

$\Delta T/L$

T^4

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

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

El Departamento de Energía de EE. UU. explica que la energía solar térmica de concentración usa espejos para concentrar la luz solar en un receptor y calentar un fluido a alta temperatura. Ese calor hace girar una turbina o impulsa un motor para generar electricidad, y también puede servir a la industria, desde la desalinización hasta el procesamiento de alimentos y la producción química.

El DOE señala que las plantas a gran escala usan torres solares o filas de espejos lineales, mientras que los sistemas individuales de disco/motor producen de 5 a 25 kilovatios cada uno. Cada uno es un problema de transferencia de calor y trabajo: absorber la radiación concentrada, limitar las pérdidas por conducción y convección del receptor y convertir el calor en trabajo de eje.

En Saving Planets: Soluciones · Física II

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

Recursos de aprendizaje gratuitos

- 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): Sección de libro de texto gratuita.
- OpenStax UP2, 1.6 Mechanisms of heat transfer (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/1-6-mechanisms-of-heat-transfer): Sección de libro de texto gratuita.
- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): Clases sobre trabajo y calor.
- PhET: Energy Forms and Changes (https://phet.colorado.edu/en/simulations/energy-forms-and-changes): La transferencia de energía de forma interactiva.

Ver la clase

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

MIT 5.60 Thermodynamics & Kinetics (Spring 2008), MIT OpenCourseWare. Licencia: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condiciones de uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Enlace solo para estudio gratuito; Saving Planets no está afiliado a esta universidad ni cuenta con su respaldo.

- [ ] **Terminé esta unidad**

UNIDAD 4 · SEMANA 5

La primera ley para sistemas cerrados

Balance de energía para sistemas cerrados, energía interna y entalpía, calores específicos de gases ideales, líquidos y sólidos, calentamiento a volumen constante y a presión constante, calor latente y balances de energía para ciclos.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Escribir y aplicar Q − W = ΔU + ΔKE + ΔPE.
- Usar c_v y c_p para gases ideales, y c para líquidos y sólidos.
- Incluir el calor latente en problemas de cambio de fase.
- Mostrar que en un ciclo el calor neto es igual al trabajo neto.

Conceptos clave

- Primera ley para un sistema cerrado: Q − W = ΔE = ΔU + ΔKE + ΔPE. Normalmente ΔKE y ΔPE son despreciables, así que Q − W = ΔU.
- Entalpía h = u + pv. A presión constante, el calor añadido es igual al cambio de entalpía: Q = m(h_2 − h_1), porque el trabajo de frontera ya está incluido.
- Para gases ideales, u y h dependen solo de T: Δu = c_vΔT, Δh = c_pΔT, con c_p − c_v = R y k = c_p/c_v (1.4 para el aire).
- Para líquidos y sólidos c_p ≈ c_v = c, así que Q = mcΔT. Fundir o hervir a T constante requiere calor latente: Q = m h_if o m h_fg.
- En un ciclo completo el sistema vuelve a su estado inicial, así que ΔU = 0 y Q_net = W_net. Es la base de toda máquina térmica y todo refrigerador.

Ecuaciones clave

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

`Q-W=Δ U+Δ KE+Δ PE`

Primera ley, sistema cerrado

$$h = u + pv$$

`h=u+pv`

Entalpía

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

Δ u=c_vΔ T,\ Δ h=c_pΔ T,\ c_p-c_v=R

Calores específicos de gases ideales

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

Q=mcΔ T,\ \ Q=m h_fg

Calor sensible y latente

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 4.1 Se calientan 2 kg de aire en un tanque rígido de 300 K a 400 K. Halla Q.

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

Respuesta: Q = 143.6 kJ.

Ejemplo 4.2 El mismo aire se calienta a presión constante (100 kPa) de 300 a 400 K. Halla Q y el trabajo de frontera.

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

Respuesta: Q = 201.0 kJ; W = 57.4 kJ; ΔU = 143.6 kJ en ambos casos.

Ejemplo 4.3 Halla el calor para calentar 1 kg de agua de 20 °C a 100 °C y luego evaporar 0.1 kg de ella.

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

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

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Fundir 0.2 kg de hielo a 0 °C. ¿Calor?

   0.2 × 334 = 66.8 kJ.

2. Halla $c_p - c_v$ para el aire.

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

3. Un ciclo recibe 500 kJ de calor y rechaza 300 kJ. ¿Trabajo neto?

   200 kJ.

4. Halla k para el aire.

   1.005/0.718 = 1.40.

Ideas erróneas comunes

Mito: Añadir calor siempre eleva la temperatura.
En realidad: Durante un cambio de fase no.

Mito: $Q = mc_p\Delta T$ sirve para un tanque rígido.
En realidad: Usa c_v cuando el volumen es constante.

Mito: La entalpía es una forma de calor.
En realidad: Es una propiedad, u + pv.

Tarjetas de estudio

Primera ley

Q − W = ΔU.

Entalpía

h = u + pv.

Δu de un gas ideal

$c_v\Delta T$.

Δh de un gas ideal

$c_p\Delta T$.

Calor latente

Q = m h_{fg}.

Ciclo

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

Cuestionario de autoevaluación

1. Para un tanque cerrado rígido, Q es igual a...

ΔH

ΔU

W

0

ΔU. No hay trabajo de frontera.

2. c_p − c_v para un gas ideal es...

k

R

1

c_v

R. Relación de Mayer.

3. En un ciclo, ΔU es...

positivo

negativo

cero

Q

cero. Mismo estado inicial y final.

4. A presión constante, Q es igual a...

ΔU

ΔH

W

pV

ΔH. h = u + pv.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

El DOE informa que las bombas de calor crecen rápido: en 2020 más de 17 millones de viviendas de EE. UU. las tenían, y hoy representan más de la mitad de las ventas de equipos de calefacción residencial en Estados Unidos. Funcionan como un refrigerador: usan electricidad para mover calor de un espacio frío a uno cálido en lugar de producir calor.

La primera ley explica por qué importa: un calefactor eléctrico de resistencia convierte cada kWh de electricidad en exactamente un kWh de calor, pero una bomba de calor entrega la electricidad más el calor que extrae del exterior. Según el DOE, las bombas de calor aire modernas pueden reducir el consumo eléctrico un 50 % frente a hornos y calefactores de zócalo, y el cambio podría ahorrar hasta 7.6 toneladas de emisiones de carbono al año según el equipo sustituido.

En Saving Planets: Soluciones · Cálculo II

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

Recursos de aprendizaje gratuitos

- OpenStax UP2, 3.3 First law of thermodynamics (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-3-first-law-of-thermodynamics): Sección de libro de texto gratuita.
- 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): Sección de libro de texto gratuita.
- NASA Glenn: First law of thermodynamics (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/thermo1.html): Página gratuita de la 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/): Apuntes sobre la primera ley.

Ver la clase

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/) (en inglés)

MIT 5.60 Thermodynamics & Kinetics (Spring 2008), MIT OpenCourseWare. Licencia: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condiciones de uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Enlace solo para estudio gratuito; Saving Planets no está afiliado a esta universidad ni cuenta con su respaldo.

☐ **Terminé esta unidad**

UNIDAD 5 · SEMANAS 6–7

La primera ley para volúmenes de control: dispositivos de flujo estacionario

Balances de masa y energía para volúmenes de control, trabajo de flujo y entalpía, dispositivos de flujo estacionario (toberas y difusores, turbinas y compresores, bombas, válvulas de estrangulamiento, cámaras de mezcla e intercambiadores de calor) y una introducción al llenado no estacionario.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Escribir balances de masa y energía en flujo estacionario.
- Explicar por qué aparece la entalpía en corrientes que fluyen.
- Analizar toberas, turbinas, compresores, válvulas de estrangulamiento e intercambiadores de calor.
- Elegir qué términos pueden despreciarse en cada dispositivo.

Conceptos clave

- Balance de masa: en flujo estacionario, Σṁ_in = Σṁ_out, con ṁ = ρAV.
- Empujar fluido a través de una frontera requiere un trabajo de flujo pv por unidad de masa; sumarlo a u da la entalpía h, por eso los balances de sistemas abiertos usan h.
- Ecuación de energía en flujo estacionario, una entrada y una salida: $\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}[(h_2 - h_1) + (V_2^2 - V_1^2)/2 + g(z_2 - z_1)]$.
- Atajos por dispositivo: las toberas cambian entalpía por velocidad ($\dot{Q} = \dot{W} = 0$); las turbinas y compresores son casi adiabáticos con $\dot{W} = \dot{m}(h_1 - h_2)$; las válvulas de estrangulamiento mantienen $h_1 = h_2$; los intercambiadores tienen $\dot{W} = 0$ y el calor que pierde una corriente es igual al que gana la otra.
- Recuerda las unidades: la energía cinética en J/kg debe dividirse entre 1000 para sumarla a una entalpía en kJ/kg.

Ecuaciones clave

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

```
m_in= m_out
```

Balance de masa estacionario

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

```
Q- W= m[Δ h+(Δ V^2)/(2)+gΔ z]
```

Ecuación de energía en flujo estacionario

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

```
W_turb= m(h_1-h_2)
```

Turbina adiabática

$$h_1 = h_2$$

```
h_1=h_2
```

Válvula de estrangulamiento

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 5.1 Entra aire lentamente a una tobera adiabática a 400 K y sale a 350 K. Halla la velocidad de salida.

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

Respuesta: $V_2 = 317.0$ m/s.

Ejemplo 5.2 Fluye vapor a 5 kg/s por una turbina adiabática de $h_1 = 3116.1$ a $h_2 = 2403.0$ kJ/kg. Halla la potencia.

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

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

Ejemplo 5.3 Un compresor adiabático lleva 1.2 kg/s de aire de 300 K a 450 K. Halla la potencia de entrada.

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

Respuesta: 180.9 kW.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Se calienta agua a 0.5 kg/s de 15 a 45 °C en un intercambiador. ¿Flujo de calor?

   0.5 × 4.18 × 30 = 62.7 kW.

2. Se estrangula vapor desde h = 2800 kJ/kg. ¿h a la salida?

   2800 kJ/kg.

3. Convierte un cambio de velocidad de 0 a 100 m/s a kJ/kg.

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

4. Una tubería tiene $\dot{m}$ = 2 kg/s en la entrada. ¿Y en la salida, en flujo estacionario?

   2 kg/s.

Ideas erróneas comunes

Mito: La potencia de una turbina usa u.
En realidad: Las corrientes que fluyen usan h, que incluye el trabajo de flujo.

Mito: Una válvula de estrangulamiento reduce la entalpía.
En realidad: h se mantiene constante; p y normalmente T bajan.

Mito: La energía cinética siempre es despreciable.
En realidad: No en toberas y difusores.

Tarjetas de estudio

Masa estacionaria

$\dot{m}$ que entra = $\dot{m}$ que sale.

Trabajo de flujo

pv por kg.

SFEE

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

Turbina

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

Válvula de estrangulamiento

$h_1 = h_2$.

Intercambiador de calor

Calor perdido = calor ganado.

Cuestionario de autoevaluación

1. En una válvula de estrangulamiento...

$h_1 = h_2$

$T_1 = T_2$

$p_1 = p_2$

$W > 0$

$h_1 = h_2$. Sin trabajo, sin calor, ΔKE pequeño.

2. La entalpía aparece en sistemas abiertos debido al...

trabajo de flujo

la fricción

la gravedad

radiación

trabajo de flujo. $h = u + pv$.

3. Una tobera convierte...

velocidad en entalpía

entalpía en velocidad

trabajo en calor

masa en energía

entalpía en velocidad. Acelera el flujo.

4. La potencia de una turbina adiabática es...

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

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

$\dot{Q}$

0

$\dot{m}(h_1 - h_2)$. La caída de entalpía.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

El DOE describe el núcleo de una central nuclear como una cadena de dispositivos de flujo estacionario: la fisión calienta el agua, un intercambiador de calor (en los reactores de agua a presión) produce vapor en un circuito aparte, el vapor hace girar una turbina conectada a un generador, y el vapor restante se condensa de nuevo en agua y se bombea para volver a calentarse.

Cada bloque es una ecuación de energía en flujo estacionario. Las centrales geotérmicas, que según el DOE extraen fluido caliente a través de pozos y convierten su calor en vapor que mueve turbinas, usan los mismos dispositivos con el calor de la Tierra como fuente. Sacar unos kJ más por kg de cada etapa de turbina es la forma en que sube la eficiencia de una central.

En Saving Planets: Soluciones · Aerodinámica I

Fuentes: 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)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- OpenStax UP2, 3.4 Thermodynamic processes (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/3-4-thermodynamic-processes): Sección de libro de texto gratuita.
- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): Clases sobre volúmenes de control.
- NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/): Datos de vapor.
- 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/): Apuntes sobre flujo estacionario.

Ver la clase

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

MIT 5.60 Thermodynamics & Kinetics (Spring 2008), MIT OpenCourseWare. Licencia: CC BY-NC-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) · Condiciones de uso (https://ocw.mit.edu/pages/privacy-and-terms-of-use/). Enlace solo para estudio gratuito; Saving Planets no está afiliado a esta universidad ni cuenta con su respaldo.

- [ ] **Terminé esta unidad**

UNIDAD 6 · SEMANA 8

La segunda ley: máquinas térmicas, refrigeradores y límites de Carnot

Depósitos térmicos, máquinas térmicas y eficiencia térmica, refrigeradores, bombas de calor y COP, los enunciados de Kelvin–Planck y de Clausius, procesos reversibles e irreversibles, el ciclo de Carnot y los límites de Carnot para la eficiencia y el COP.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Calcular la eficiencia térmica y el COP.
- Enunciar los enunciados de Kelvin–Planck y de Clausius.
- Identificar fuentes de irreversibilidad.
- Usar los límites de Carnot para juzgar si un dispositivo anunciado es posible.

Conceptos clave

- Una máquina térmica toma Q_H de un depósito caliente, cede Q_L a uno frío y produce W = Q_H − Q_L. Eficiencia térmica η = W/Q_H = 1 − Q_L/Q_H.
- Kelvin–Planck: ningún ciclo puede convertir en trabajo todo el calor de un solo depósito, así que η < 100 %. Clausius: el calor no fluye por sí solo de lo frío a lo caliente; un refrigerador o una bomba de calor necesita aporte de trabajo.
- COP_R = Q_L/W para un refrigerador; COP_HP = Q_H/W = COP_R + 1 para una bomba de calor. El COP puede ser muy superior a 1, por eso las bombas de calor superan a los calefactores de resistencia.
- Las irreversibilidades (fricción, transferencia de calor con un ΔT finito, expansión libre, mezcla) reducen el rendimiento. Un ciclo reversible entre dos depósitos, el ciclo de Carnot, es el mejor posible.
- Los límites de Carnot usan temperaturas absolutas: 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).

Ecuaciones clave

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

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

Eficiencia térmica

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

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

Coeficientes de desempeño

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

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

Eficiencia de Carnot

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

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

Bomba de calor de Carnot

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 6.1 Una máquina recibe 1000 kJ de calor y produce 350 kJ de trabajo. Halla η y Q_L.

1. η = 350/1000.
2. Q_L = 1000 − 350.

Respuesta: η = 35%; Q_L = 650 kJ.

Ejemplo 6.2 Halla la eficiencia de Carnot entre 800 K y 300 K, y entre 1073 K y 293 K.

1. 1 − 300/800.
2. 1 − 293/1073.

Respuesta: 62.5 % y 72.7 %.

Ejemplo 6.3 Una bomba de calor mantiene una casa a 294 K cuando afuera hay 273 K. Halla el COP de Carnot y el calor que entrega una unidad real con COP = 3 (valor de ejemplo) usando 3 kWh.

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

Respuesta: COP_Carnot = 14.0; la unidad real entrega 9 kWh de calor.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Un refrigerador tiene COP_R = 2.5 y extrae 500 kJ. ¿Trabajo?

   200 kJ.

2. Halla COP_HP si COP_R = 2.5.

   3.5.

3. Un refrigerador funciona entre 275 K y 298 K. ¿COP_R de Carnot?

   275/23 = 11.96.

4. Un inventor afirma una eficiencia del 70 % entre 600 K y 300 K. ¿Es posible?

   No: el límite de Carnot es 50 %.

Ideas erróneas comunes

Mito: Un COP mayor que 1 viola la conservación de la energía.
En realidad: La bomba de calor mueve calor; no lo crea.

Mito: La eficiencia de Carnot puede usar °C.
En realidad: Debe usar kelvin.

Mito: Una mejor ingeniería puede alcanzar el 100 % de eficiencia.
En realidad: Kelvin–Planck lo prohíbe.

Tarjetas de estudio

Eficiencia

W/Q_H.

COP_R

Q_L/W.

COP_HP

Q_H/W.

Kelvin–Planck

No hay máquina al 100 %.

Clausius

Carnot

No hay paso de frío a caliente sin trabajo. 1 − T_L/T_H.

Cuestionario de autoevaluación

1. La eficiencia de Carnot entre 600 K y 300 K es...

25%

50%

75%

100%

50%. 1 − 0.5.

2. COP_HP − COP_R es igual a...

0

1

η

T_H

1. Q_H = Q_L + W.

3. ¿Qué enunciado prohíbe una máquina con eficiencia del 100 %?

Clausius

Kelvin–Planck

Ley cero

Primera ley

Kelvin–Planck. El enunciado de un solo depósito.

4. ¿Cuál es una irreversibilidad?

la fricción

compresión cuasiestática

expansión isentrópica

ninguna

la fricción. Disipación.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

El DOE describe las bombas de calor como dispositivos que mueven calor en lugar de generarlo, lo que las hace mucho más eficientes que la calefacción tradicional. Las bombas de calor aire modernas pueden reducir el consumo eléctrico un 50 % frente a hornos y calefactores de zócalo, y las bombas de calor geotérmicas, que aprovechan la temperatura estable del subsuelo poco profundo, pueden reducir el consumo de energía entre un 30 % y un 60 %.

El COP de Carnot explica ambas afirmaciones: cuanto menor es el salto de temperatura T_H − T_L, mayor es el COP. El suelo se mantiene más templado que el aire invernal, así que una bomba de calor geotérmica eleva el calor a través de una diferencia menor. La oficina geotérmica del DOE ve potencial para hasta 28 millones de bombas de calor geotérmicas para 2050.

En Saving Planets: Soluciones · Océanos

Fuentes: 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)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- OpenStax UP2, 4.2 Heat engines (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-2-heat-engines): Sección de libro de texto gratuita.
- OpenStax UP2, 4.3 Refrigerators and heat pumps (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-3-refrigerators-and-heat-pumps): Sección de libro de texto gratuita.
- OpenStax UP2, 4.5 The Carnot cycle (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-5-the-carnot-cycle): Sección de libro de texto gratuita.
- NASA Glenn: Carnot cycle (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/carnot.html): Página gratuita de la NASA.

Ver la clase

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

Ramamurti Shankar, PHYS 200 Fundamentals of Physics I, Open Yale Courses. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Condiciones de uso (https://oyc.yale.edu/terms). Enlace solo para estudio gratuito; Saving Planets no está afiliado a esta universidad ni cuenta con su respaldo.

- [ ] **Terminé esta unidad**

Entropía y eficiencia isentrópica

La desigualdad de Clausius, la entropía como propiedad, el principio de aumento de entropía y la generación de entropía, las relaciones T ds, el cambio de entropía de líquidos, sólidos y gases ideales, procesos isentrópicos, diagramas T–s y eficiencias isentrópicas de turbinas, compresores y toberas.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Calcular cambios de entropía de líquidos, sólidos y gases ideales.
- Hallar la generación de entropía y decidir si un proceso es posible.
- Usar las relaciones isentrópicas de gases ideales.
- Aplicar eficiencias isentrópicas a dispositivos reales.

Conceptos clave

- La entropía S es una propiedad definida por dS = δQ_rev/T. Para cualquier proceso, $S_2 - S_1 \geq \int \delta Q/T$; la diferencia es la entropía generada, S_gen ≥ 0 (cero solo si es reversible).
- Principio de aumento de entropía: la entropía de un sistema aislado (sistema más alrededores) nunca disminuye. Un proceso con S_gen < 0 es imposible.
- Relaciones T ds: T ds = du + p dv = dh − v dp. Para líquidos y sólidos $\Delta s = c \ln(T_2/T_1)$; para gases ideales $\Delta s = c_p \ln(T_2/T_1) - R \ln(p_2/p_1)$.
- Un proceso isentrópico (adiabático reversible) de gas ideal con calores específicos constantes cumple $T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{((k-1)/k)}$. En un diagrama T–s es una línea vertical, y el área bajo un proceso reversible es el calor transferido.
- Los dispositivos reales se comparan con los isentrópicos: $\eta_T = (h_1 - h_2a)/(h_1 - h_2s)$ para turbinas y $\eta_C = (h_2s - h_1)/(h_2a - h_1)$ para compresores.

Ecuaciones clave

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

`dS= Q_revT,\ \ S_gen0`

La entropía y la segunda ley

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

`Δ s=c(T_2)/(T_1)`

Líquidos y sólidos

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

`Δ s=c_p(T_2)/(T_1)-R(p_2)/(p_1)`

Gas ideal

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

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

Gas ideal isentrópico

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 7.1 Halla el cambio de entropía de 2 kg de agua calentados de 293 K a 353 K.

1. ΔS = 2 × 4.18 × ln(353/293).

Respuesta: ΔS = 1.557 kJ/K.

Ejemplo 7.2 El aire pasa de 300 K y 100 kPa a 500 K y 400 kPa. Halla Δs.

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

Respuesta: Δs = 0.1155 kJ/(kg·K).

Ejemplo 7.3 Se comprime aire a 300 K con una relación de presiones de 8. Halla la temperatura de salida isentrópica y la real si 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.

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

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. 1000 kJ de calor fluyen de un depósito a 800 K a uno a 300 K. ¿S_gen?

1000/300 − 1000/800 = 2.083 kJ/K.

2. ¿T_2 isentrópica para una relación de presiones de 10 desde 300 K?

   579.2 K.

3. ¿Puede S_gen ser negativa?

   No; ese proceso es imposible.

4. ¿Qué representa el área bajo una curva T–s reversible?

   El calor transferido.

Ideas erróneas comunes

Mito: La entropía nunca puede disminuir.
En realidad: La entropía de un sistema puede bajar si cede calor; la total de un sistema aislado no.

Mito: Adiabático significa isentrópico.
En realidad: Solo si además es reversible.

Mito: La eficiencia isentrópica puede superar 1.
En realidad: No en turbinas ni compresores.

Tarjetas de estudio

Entropía

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

S_gen

≥ 0.

Δs de un líquido

$c \ln(T_2/T_1)$.

Δs de un gas ideal

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

T isentrópica

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

η_T

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

Cuestionario de autoevaluación

1. S_gen para un proceso reversible es...

positivo

cero

negativo

infinita

cero. Sin irreversibilidad.

2. Un proceso isentrópico en un diagrama T–s es...

horizontal

vertical

diagonal

circular

vertical. s constante.

3. Δs de un líquido calentado es...

$c \ln(T_2/T_1)$

$c\Delta T$

$R \ln(p_2/p_1)$

0

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

4. La eficiencia isentrópica de un compresor es...

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

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

h_2/h_1

1

$(h_2s - h_1)/(h_2a - h_1)$. Trabajo ideal entre trabajo real.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La página de NASA Glenn sobre el ciclo Brayton recorre una turbina de gas en un diagrama T–s: idealmente el compresor eleva la presión y la temperatura de forma isentrópica, una línea vertical, pero en la realidad la línea de compresión se inclina a la derecha porque la entropía aumenta en el flujo. La combustión ocurre a presión constante, y la turbina, en el mismo eje, mueve el compresor.

La NASA señala que el área encerrada en el diagrama T–s es proporcional al trabajo útil. Cada poco de entropía generada en un compresor o una turbina reduce esa área, así que mayores eficiencias isentrópicas significan más electricidad o empuje con el mismo combustible, y menos CO_2.

En Saving Planets: Aerodinámica I · Cálculo III

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

Recursos de aprendizaje gratuitos

- OpenStax UP2, 4.6 Entropy (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-6-entropy): Sección de libro de texto gratuita.
- 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): Sección de libro de texto gratuita.
- NASA Glenn: Entropy (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/entropy.html): Página gratuita de la 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): Sección de libro de texto gratuita.

☐ **Terminé esta unidad**

UNIDAD 8 · SEMANA 11

Exergía: cuánta energía es útil

Estado muerto y alrededores, exergía (disponibilidad) del calor y de corrientes que fluyen, trabajo reversible e irreversibilidad, destrucción de exergía I = T_0S_gen, eficiencia según la segunda ley y por qué importa ajustar la calidad de la energía a su uso.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Calcular la exergía del calor de un depósito.
- Relacionar la exergía destruida con la entropía generada.
- Calcular la eficiencia según la segunda ley.
- Explicar por qué la cogeneración y las bombas de calor aprovechan bien la exergía.

Conceptos clave

- La exergía es el trabajo útil máximo que puede obtenerse mientras un sistema llega al equilibrio con sus alrededores (el estado muerto, T_0 y p_0). La energía se conserva; la exergía se destruye por irreversibilidad.
- El calor Q de un depósito a T tiene una exergía X = Q(1 − T_0/T): el calor a alta temperatura es valioso, y el calor cercano a la temperatura ambiente casi no sirve para producir trabajo.
- Exergía de una corriente por unidad de masa: ψ = (h − h_0) − T_0(s − s_0) + V^2/2 + gz.
- Exergía destruida (irreversibilidad) I = T_0S_gen (Gouy–Stodola). Cada irreversibilidad cuesta trabajo útil.
- Eficiencia según la segunda ley η_II = η_th/η_rev para máquinas, o COP/COP_rev para bombas de calor. Quemar combustible a 2000 K solo para calentar agua a 60 °C desperdicia casi toda la exergía; usar para eso el calor residual de una central no.

Ecuaciones clave

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

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

Exergía del calor

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

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

Exergía de flujo

$$I = T_0 S_{gen}$$

I=T_0S_gen

Exergía destruida

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

_II=_th_rev

Eficiencia según la segunda ley

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 8.1 Halla la exergía de 100 kJ de calor de una fuente a 600 K con T_0 = 300 K.

1. X = 100 × (1 − 300/600).

Respuesta: 50 kJ.

Ejemplo 8.2 1000 kJ fluyen de 800 K a 300 K (T_0 = 300 K). Halla la exergía destruida.

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

Respuesta: I = 625 kJ, toda la exergía que tenía el calor a 800 K.

Ejemplo 8.3 Una máquina con η = 35 % funciona entre 800 K y 300 K. Halla η_II.

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

Respuesta: η_II = 56%.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿Exergía de 100 kJ a 330 K con T_0 = 300 K?

   100 × (1 − 300/330) = 9.09 kJ.

2. Una bomba de calor tiene COP 3; COP_rev = 14. ¿η_II?

   3/14 = 21.4%.

3. ¿Por qué el calor a temperatura ambiente casi no sirve para producir trabajo?

   Su factor de exergía $1 - T_0/T$ es casi cero.

4. ¿Qué destruye la exergía?

   Toda irreversibilidad: fricción, mezcla, transferencia de calor con ΔT finito.

Ideas erróneas comunes

Mito: La energía y la exergía son lo mismo.

En realidad: La energía se conserva; la exergía se destruye.

Mito: Una alta eficiencia según la primera ley significa un buen proceso.

En realidad: Una caldera de gas con 95 % de eficiencia puede tener una eficiencia baja según la segunda ley.

Mito: La exergía depende solo del sistema.

En realidad: También depende de los alrededores (T_0, p_0).

Tarjetas de estudio

Exergía

Trabajo útil máximo.

Exergía del calor

$Q(1 - T_0/T)$.

Estado muerto

T_0, p_0.

Irreversibilidad

$I = T_0 S_{gen}$.

η_II

η/η_{rev}.

Calidad de la energía

Una T alta es valiosa.

Cuestionario de autoevaluación

1. La exergía destruida es igual a...

$T_0 S_{gen}$

Q

W

ΔU

T_0S_gen. Gouy–Stodola.

2. La exergía del calor a T = T_0 es...

Q

cero

infinita

Q/2

cero. 1 − T_0/T = 0.

3. η_II compara el desempeño real con...

el límite reversible

cero

100%

la primera ley

el límite reversible. Eficiencia según la segunda ley.

4. El estado muerto es...

el equilibrio con los alrededores

el cero absoluto

el punto crítico

el vacío

el equilibrio con los alrededores. T_0, p_0.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

El DOE explica que la cogeneración produce electricidad y calefacción o refrigeración útiles a partir de un solo combustible en el lugar de uso o cerca de él, recuperando calor que de otro modo se perdería en la generación eléctrica. Según el DOE, la cogeneración puede operar razonablemente con una eficiencia del 65 % al 75 %, frente a un promedio nacional de cerca del 50 % cuando la electricidad y el calor se producen por separado.

La exergía explica la ventaja: la parte de alta temperatura de la exergía del combustible produce electricidad, y el calor de baja calidad que una central desecharía cubre necesidades de calefacción que siempre requirieron solo energía de baja exergía. Pasar del 50 % al 75 % significa los mismos servicios con dos tercios del combustible.

En Saving Planets: Soluciones · Clima espacial

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

Recursos de aprendizaje gratuitos

- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): Clases sobre disponibilidad.
- OpenStax UP2, 4.1 Reversible and irreversible processes (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-1-reversible-and-irreversible-processes): Sección de libro de texto gratuita.
- 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): Sección de libro de texto gratuita.
- 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/): Apuntes sobre la segunda ley.

☐ **Terminé esta unidad**

Ciclos de potencia de gas: Otto, Diesel y Brayton

Hipótesis de aire estándar, presión media efectiva, el ciclo Otto (encendido por chispa), el ciclo Diesel (encendido por compresión), el ciclo Brayton para turbinas de gas y motores a reacción, relación de trabajo de retroceso, regeneración, interenfriamiento y recalentamiento, y ciclos combinados.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Analizar los ciclos Otto y Diesel ideales.
- Analizar el ciclo Brayton ideal, incluida la relación de trabajo de retroceso.
- Explicar cómo la relación de compresión y la relación de presiones elevan la eficiencia.
- Describir la regeneración y los ciclos combinados.

Conceptos clave

- Hipótesis de aire estándar: el fluido de trabajo es aire, un gas ideal, en un ciclo cerrado; la combustión se sustituye por adición de calor y el escape por rechazo de calor. El aire estándar frío añade calores específicos constantes a temperatura ambiente.
- Ciclo Otto: compresión isentrópica, adición de calor a volumen constante, expansión isentrópica, rechazo de calor a volumen constante. η_Otto = 1 − 1/r^(k−1), con relación de compresión r = V_max/V_min.
- Ciclo Diesel: el calor se añade a presión constante; con relación de corte r_c, η_Diesel = 1 − (1/r^(k−1))·(r_c^k − 1)/(k(r_c − 1)). Los diésel funcionan con r más alta, por eso son más eficientes en la práctica.
- Ciclo Brayton (turbinas de gas): compresión isentrópica, adición de calor a presión constante, expansión isentrópica, rechazo de calor a presión constante. η_Brayton = 1 − 1/r_p^((k−1)/k). Gran parte del trabajo de la turbina mueve el compresor (la relación de trabajo de retroceso).
- La regeneración usa el escape caliente para precalentar el aire comprimido; el interenfriamiento y el recalentamiento acercan el ciclo al de Carnot. Un ciclo combinado lleva el escape de la turbina de gas a un ciclo de vapor (Rankine).

Ecuaciones clave

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

_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`

Relación de trabajo de retroceso

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 9.1 Halla la eficiencia con aire estándar frío de ciclos Otto con r = 8 y r = 10.

1. 1 − 8^(−0.4).
2. 1 − 10^(−0.4).

Respuesta: 56.5 % y 60.2 %.

Ejemplo 9.2 Un ciclo Diesel tiene r = 18 y r_c = 2. Halla 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.

Respuesta: η = 63.2%.

Ejemplo 9.3 Un ciclo Brayton ideal tiene r_p = 8, entrada a 300 K y entrada de turbina a 1300 K. Halla T_2, T_4, el trabajo del compresor y de la turbina, la relación de trabajo de retroceso, el trabajo neto y 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).

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

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿Eficiencia Brayton con r_p = 12?

   1 − 12^(−0.2857) = 50.8%.

2. ¿Por qué los motores diésel son más eficientes que los de gasolina en la práctica?

   Funcionan con relaciones de compresión mucho más altas.

3. Subir r de 8 a 10 en un ciclo Otto, ¿cuántos puntos añade?

   60.2 − 56.5 = 3.7 puntos.

4. ¿Qué hace la regeneración?

   Usa el calor del escape para precalentar el aire del compresor y reduce el combustible necesario.

Ideas erróneas comunes

Mito: Mayor compresión siempre significa motores reales más eficientes.
En realidad: La detonación limita los motores de encendido por chispa.

Mito: El trabajo de retroceso es despreciable en turbinas de gas.
En realidad: A menudo es el 40–80 % del trabajo de la turbina.

Mito: La eficiencia con aire estándar es la eficiencia real.
En realidad: Los motores reales rinden mucho menos por la fricción, las pérdidas de calor y los gases reales.

Tarjetas de estudio

Aire estándar	**Otto**
Aire, gas ideal, ciclo cerrado.	1 − 1/r^(k−1).
Diesel	**Brayton**

Adición de calor a p constante.

1 − 1/r_p^((k−1)/k).

Trabajo de retroceso

w_c/w_t.

Regeneración

El escape precalienta el aire.

Cuestionario de autoevaluación

1. La eficiencia Otto depende de...

la relación de compresión

solo el tipo de combustible

la rapidez

la relación de corte

la relación de compresión. 1 − 1/r^(k−1).

2. En el ciclo Brayton el calor se añade a ... constante

el volumen

la presión

la temperatura

entropía

la presión. Cámara de combustión.

3. La relación de trabajo de retroceso es...

w_c/w_t

w_t/w_c

η

r_p

w_c/w_t. Compresor entre turbina.

4. Un ciclo combinado une el Brayton con...

Otto

Rankine

Diesel

Carnot

Rankine. Ciclo de vapor de cola.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

NASA Glenn explica que el ciclo Brayton se usa en todos los motores de turbina de gas, ya sean turborreactores, turbofanes o turbohélices, y que todos comparten un compresor, una sección de combustión y una turbina que mueve el compresor. El programa EngineSim de la NASA usa el análisis del ciclo Brayton para predecir el empuje y el flujo de combustible de un motor.

Las turbinas de gas en tierra funcionan con el mismo ciclo. Los ejemplos de consumo térmico unitario de la EIA muestran por qué importa el diseño del ciclo: 7500 Btu/kWh equivale a cerca del 45 % de eficiencia, frente a cerca del 33 % con 10500 Btu/kWh. Subir la relación de presiones y la temperatura de entrada a la turbina, y recuperar el calor del escape, es como las centrales se acercan a la mejor cifra.

En Saving Planets: Aerodinámica I · Introducción a la ingeniería aeroespacial

Fuentes: 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)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA Glenn: Brayton cycle (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/brayton.html): Página gratuita de la NASA.
- NASA Glenn: Otto cycle (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/otto.html): Página gratuita de la NASA.
- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): Clases sobre ciclos.

- 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/): Apuntes sobre ciclos de propulsión.

☐ **Terminé esta unidad**

Ciclos de potencia de vapor y de refrigeración

El ciclo Rankine ideal y sus cuatro dispositivos, el trabajo de la bomba, cómo aumentar la eficiencia (mayor presión y temperatura en la caldera, menor presión en el condensador, recalentamiento, regeneración), el ciclo de refrigeración por compresión de vapor y las bombas de calor, los refrigerantes y la cogeneración.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Analizar un ciclo Rankine ideal con tablas de vapor.
- Explicar cómo la presión, el sobrecalentamiento y el recalentamiento cambian la eficiencia.
- Analizar un ciclo ideal de refrigeración por compresión de vapor.
- Relacionar el COP del ciclo con el desempeño de una bomba de calor.

Conceptos clave

- Ciclo Rankine ideal: bomba (compresión isentrópica del líquido), caldera (calentamiento a presión constante hasta vapor sobrecalentado), turbina (expansión isentrópica), condensador (condensación a presión constante).
- El trabajo de la bomba es pequeño porque el líquido tiene un v pequeño: w_p ≈ v(p_2 − p_1). Trabajo neto = w_turb − w_pump; η = w_net/q_in.
- La eficiencia aumenta con una temperatura media de adición de calor más alta (mayor presión en la caldera, más sobrecalentamiento, recalentamiento) y una menor presión en el condensador. La regeneración con calentadores de agua de alimentación precalienta el agua con vapor extraído de la turbina.
- Refrigeración por compresión de vapor: compresor (hasta vapor sobrecalentado), condensador (cede Q_H), válvula de expansión (estrangulamiento, h_3 = h_4), evaporador (absorbe Q_L). COP_R = (h_1 − h_4)/(h_2 − h_1).
- Una bomba de calor es el mismo ciclo usado para calentar, con COP_HP = (h_2 − h_3)/(h_2 − h_1). Los refrigerantes se eligen por sus propiedades de saturación, su seguridad y su bajo potencial de calentamiento global.

Ecuaciones clave

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

`w_p=v(p_2-p_1)`

Trabajo de la bomba

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

=_t-w_pq_in

Eficiencia de Rankine

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

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

COP de un refrigerador

$$h_3 = h_4$$

h_3=h_4

Válvula de expansión

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 10.1 Un ciclo Rankine ideal funciona entre 3 MPa/350 °C y 75 kPa. Tablas de vapor: h_1 = 384.44, v_1 = 0.001037 m³/kg, h_3 = 3116.1, h_4 = 2403.0 kJ/kg. Halla w_p, q_in, w_net y 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.

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

Ejemplo 10.2 Un ciclo de compresión de vapor tiene h_1 = 244.5, h_2 = 275.4 y h_3 = h_4 = 95.5 kJ/kg (valores de ejemplo). Halla q_L, w_in y 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.

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

Ejemplo 10.3 Para ese ciclo usado como bomba de calor, halla COP_HP.

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

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

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. En el ejemplo de Rankine, ¿cuál es el calor rechazado?

   2403.0 − 384.44 = 2018.6 kJ/kg.

2. ¿Qué fracción del trabajo de la turbina usa la bomba?

   3.03/713.1 = 0.425%.

3. Halla el flujo de vapor para 100 MW netos en el ejemplo.

   100,000/710.1 = 140.8 kg/s.

4. ¿Por qué ayuda bajar la presión del condensador?

   Baja la temperatura de rechazo de calor.

Ideas erróneas comunes

Mito: El trabajo de la bomba en un ciclo Rankine es grande.
En realidad: Es mínimo porque el líquido es casi incompresible.

Mito: La válvula de expansión realiza trabajo.
En realidad: Es un estrangulamiento: h constante, sin trabajo.

Mito: Más sobrecalentamiento siempre ayuda, sin límite.
En realidad: Los materiales de la turbina limitan la temperatura.

Tarjetas de estudio

Rankine

Bomba, caldera, turbina, condensador.

Trabajo de la bomba

$v(p_2 - p_1)$.

Recalentamiento

Eleva la T media de adición de calor y da un escape más seco.

Compresión de vapor

Compresor, condensador, válvula, evaporador.

COP_R

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

Válvula de estrangulamiento

$h_3 = h_4$.

Cuestionario de autoevaluación

1. En un ciclo Rankine, el calor se añade en…

la bomba

la caldera

la turbina

el condensador

la caldera. Presión constante.

2. El trabajo de la bomba es aproximadamente…

v Δp

c_pΔT

h_fg

exactamente cero

v Δp. Líquido incompresible.

3. En refrigeración, Q_L se absorbe en…

el condensador

el evaporador

el compresor

la válvula

el evaporador. Lado frío.

4. COP_HP menos COP_R es...

0

1

η

2

1. q_H = q_L + w.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La oficina geotérmica del DOE explica que las centrales geotérmicas extraen fluido caliente a través de pozos y convierten su calor en vapor que mueve turbinas, un ciclo de la familia Rankine con la Tierra como caldera. Las centrales geotérmicas pueden funcionar prácticamente las 24 horas del día sin importar el clima, y el análisis del DOE ve potencial para 90 gigavatios de electricidad geotérmica en EE. UU. para 2050 si bajan los costos de la geotermia mejorada.

Las centrales nucleares usan el mismo ciclo Rankine, y el artículo del DOE sobre bombas de calor describe el ciclo de compresión de vapor a la inversa: llevar calor a las viviendas en invierno y sacarlo en verano. De mejores ciclos Rankine y de refrigeración saldrá gran parte de la electricidad limpia y la calefacción eficiente del mundo.

En Saving Planets: Soluciones · Observación de la Tierra

Fuentes: 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)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/): Tablas de vapor y de refrigerantes.
- OpenStax UP2, 4.3 Refrigerators and heat pumps (https://openstax.org/books/university-physics-volume-2/pages/4-3-refrigerators-and-heat-pumps): Sección de libro de texto gratuita.
- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): Clases sobre ciclos de vapor.

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

☐ **Terminé esta unidad**

Problemas

Estos problemas están dentro de cada unidad. Hazlos en papel y luego abre la respuesta.

1. Sistemas, propiedades, energía y eficiencia
   4 problemas
2. Sustancias puras, cambio de fase y tablas de propiedades
   4 problemas
3. Transferencia de energía por trabajo y calor
   4 problemas
4. La primera ley para sistemas cerrados
   4 problemas
5. La primera ley para volúmenes de control: dispositivos de flujo estacionario
   4 problemas
6. La segunda ley: máquinas térmicas, refrigeradores y límites de Carnot
   4 problemas
7. Entropía y eficiencia isentrópica
   4 problemas
8. Exergía: cuánta energía es útil
   4 problemas
9. Ciclos de potencia de gas: Otto, Diesel y Brayton
   4 problemas
10. Ciclos de potencia de vapor y de refrigeración
    4 problemas

El laboratorio (Thermodynamics lab)

El laboratorio es la parte práctica del curso. Aquí es gratuito y solo para practicar, sin créditos.

Cada práctica puede hacerse en una simulación gratuita o con objetos de cocina. El agua caliente y el vapor queman: usa manoplas de cocina, deja el hervidor sobre una superficie estable, vierte lejos de ti y mantén alejados a niños y mascotas. Nunca calientes un recipiente cerrado.

Referencia de seguridad: NFPA: Burn awareness information (https://www.nfpa.org/education-and-research/home-fire-safety/burns)

Práctica A: la ley del gas ideal en PhET Gas Properties

SEMANA 2

Objetivo: Mostrar que la presión es proporcional a la temperatura absoluta con volumen y cantidad fijos, y que pV/T se mantiene constante.

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

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

Ley del gas ideal a volumen constante

Procedimiento

1. Abre PhET Gas Properties, pestaña Ideal; bombea gas y mantén el volumen constante.
2. Calienta el gas por pasos y anota T y p.
3. Grafica p frente a T en kelvin; prolonga la recta hasta p = 0.
4. Repite a presión constante y anota el volumen.

Tabla de datos

T (K)	p (kPa), partiendo de 100 kPa a 300 K
300	100
400	133.3
600	200

Valores de gas ideal; los números del simulador fluctúan un poco porque cuenta colisiones de partículas.

Cálculo de ejemplo

1. p_2 = 100 × 400/300 = 133.3 kPa.
2. La recta que pasa por los datos corta p = 0 en T = 0 K.

> **Seguridad**
>
> - Solo ordenador.

Alternativa en casa o virtual

- Gas Properties funciona en un navegador.

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

Vínculo con el planeta: El DOE dice que los diseñadores de reactores presurizan el agua para que no hierva; las mismas relaciones de estado determinan el diseño de cada caldera y cada tanque. 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)

- [ ] **Completé este laboratorio (real o virtual)**

Práctica B: balance de energía y eficiencia de un hervidor

SEMANA 5

Objetivo: Aplicar la primera ley al calentamiento de agua y averiguar cuánta de la energía eléctrica de un hervidor llega al agua.

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

=(mcΔ T)/(P t)

Eficiencia del hervidor

Procedimiento

1. Pesa 1.00 kg (1 L) de agua del grifo y mide su temperatura.
2. Lee la potencia del hervidor en su etiqueta.
3. Cronometra cuánto tarda en hervir (el hervidor se apaga).
4. Calcula el calor absorbido y la energía eléctrica usada.

Tabla de datos

Magnitud	Valor
Calor del agua, 1 kg 20→100 °C (kJ)	334.4
Energía eléctrica, 1500 W × 250 s (kJ)	375.0
Eficiencia	89.2%

Valores de ejemplo; el tiempo de tu hervidor depende de su potencia, de la temperatura inicial del agua y de tu altitud.

Cálculo de ejemplo

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

> **Seguridad**
>
> - El vapor y el agua hirviendo queman: mantén la tapa cerrada, vierte lejos de ti y mantén alejados a niños y mascotas.
> - No toques el cuerpo del hervidor mientras esté caliente.

Alternativa en casa o virtual

- Es una práctica casera.

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

Vínculo con el planeta: El DOE señala que la calefacción por resistencia convierte 1 kWh en 1 kWh de calor, mientras que las bombas de calor reducen el consumo eléctrico cerca de un 50 %. U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps)

- [ ] **Completé este laboratorio (real o virtual)**

Práctica C: fusión del hielo y calor latente

SEMANA 5

Objetivo: Usar un balance de calor para predecir la temperatura final cuando el hielo se funde en agua tibia, y compararla con la medida.

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

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

Calor perdido por el agua = calor ganado por el hielo

Procedimiento

1. Pon 300 g de agua a 40 °C en una taza aislante.
2. Añade 50 g de hielo a 0 °C (sécalo con un paño).
3. Remueve suavemente hasta que se funda todo el hielo y anota la temperatura más baja.
4. Compárala con la temperatura final predicha.

Tabla de datos

Magnitud	Valor
Agua	0.300 kg a 40 °C
Ice	0.050 kg a 0 °C
T final predicha	22.9 °C

Valores de ejemplo; el calor que aportan la taza y el aire hace que el valor medido sea un poco mayor.

Cálculo de ejemplo

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

> **Seguridad**
>
> - Usa agua caliente del grifo, no hirviendo.

Alternativa en casa o virtual

- Es una práctica casera.

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)

Vínculo con el planeta: El calor latente es la base del almacenamiento térmico; el DOE señala que la energía geotérmica también puede apoyar el almacenamiento de energía térmica. U.S. DOE: Geothermal basics (https://www.energy.gov/eere/geothermal/geothermal-basics)

- [ ] **Completé este laboratorio (real o virtual)**

Práctica D: aislamiento y velocidad de enfriamiento

SEMANA 4

Objetivo: Comparar la rapidez con que se enfría el agua caliente en una taza normal y en una aislante, y hallar la constante de enfriamiento de cada una.

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

`(T-T_∞)/(T_0-T_∞)=e^-kt`

Ley de enfriamiento de Newton

Procedimiento

1. Llena dos tazas, una normal y otra aislante (o envuelta en una toalla), con agua a unos 80 °C.
2. Anota la temperatura cada 2 minutos durante 20 minutos; anota la temperatura ambiente.
3. Calcula k = ln[(T_0 − T∞)/(T − T∞)]/t para cada una.
4. Compara los flujos de pérdida de calor.

Tabla de datos

Mug	T tras 20 min (°C)	k (1/min)
Normal	60	0.0203
Aislante	70	0.00912

Valores de ejemplo con el ambiente a 20 °C.

Cálculo de ejemplo

1. Normal: k = ln(60/40)/20 = 0.0203 por minuto.
2. Aislante: k = ln(60/50)/20 = 0.00912 por minuto, menos de la mitad.

> **Seguridad**
>
> - El agua caliente quema: usa manoplas y deja las tazas sobre una superficie estable, lejos de los bordes.

Alternativa en casa o virtual

- Es una práctica casera.

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

Vínculo con el planeta: El DOE aconseja aislar la vivienda antes de instalar una bomba de calor, porque el aislamiento reduce el calor que una casa debe reponer. U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps)

- [ ] **Completé este laboratorio (real o virtual)**

Práctica E: límites de Carnot de una bomba de calor

SEMANA 8

Objetivo: Crear una hoja de cálculo del COP de Carnot de una bomba de calor frente a la temperatura exterior y compararlo con el COP nominal de una unidad real.

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

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

Bomba de calor de Carnot

Procedimiento

1. Fija la temperatura interior T_H = 294 K.
2. Enumera temperaturas exteriores de 253 K a 288 K.
3. Calcula el COP de Carnot para cada una.
4. Busca la eficiencia nominal de cualquier bomba de calor en su etiqueta o en su ficha ENERGY STAR y compara.

Tabla de datos

T_L (K)	COP_Carnot
263	9.48
273	14.0
283	26.7

Límites ideales; las bombas de calor reales alcanzan una fracción de ellos.

Cálculo de ejemplo

1. COP = 294/(294 − 263) = 9.48.
2. Un aire exterior más frío implica un límite más bajo.

> **Seguridad**
>
> - Solo ordenador.

Alternativa en casa o virtual

- Sirve cualquier hoja de cálculo.

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

Vínculo con el planeta: El DOE dice que las bombas de calor geotérmicas, que aprovechan la temperatura estable del suelo, pueden reducir el consumo de energía entre un 30 % y un 60 %. U.S. DOE: Pump up your savings with heat pumps (May 30, 2023) (https://www.energy.gov/articles/pump-your-savings-heat-pumps)

- [ ] **Completé este laboratorio (real o virtual)**

Práctica F: hoja de cálculo del ciclo Rankine

SEMANA 15

Objetivo: Calcular un ciclo Rankine ideal con valores de tablas de vapor y ver cómo los términos de turbina, bomba y caldera fijan la eficiencia.

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

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

Eficiencia de Rankine ideal

Procedimiento

1. Busca los cuatro estados en el WebBook del NIST (o usa los valores dados).
2. Calcula el trabajo de la bomba, el calor de entrada, el trabajo de la turbina, el trabajo neto y η.
3. Cambia la presión del condensador o la temperatura de la caldera con nuevos valores de tabla y vuelve a calcular.
4. Halla el flujo de vapor para una central de 100 MW.

Tabla de datos

Magnitud	Valor
w_pump (kJ/kg)	3.03
q_in (kJ/kg)	2728.6
w_net (kJ/kg)	710.1
η	26.0%

Valores de tablas de vapor para 3 MPa/350 °C y 75 kPa.

Cálculo de ejemplo

1. η = 710.1/2728.6 = 26.0%.
2. Flujo de vapor para 100 MW = 100000/710.1 = 140.8 kg/s.

> **Seguridad**
>
> - Solo ordenador.

Alternativa en casa o virtual

- Sirve cualquier hoja de cálculo.

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

Vínculo con el planeta: El DOE dice que las centrales nucleares y geotérmicas convierten el calor en vapor que hace girar turbinas, el ciclo de esta práctica. 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)

- [ ] **Completé este laboratorio (real o virtual)**

Series de práctica para exámenes

Cronométrate: unos 10 minutos por problema. Luego compara con las soluciones completas.

Ejercicios de práctica para el parcial (unidades 1–5)

1. Una central tiene un consumo térmico unitario de 8530 Btu/kWh. Halla su eficiencia.
    1. 3412/8530.

    Respuesta: 40.0%.

2. Halla la masa de aire en un tanque de 2 m^3 a 200 kPa y 350 K.
    1. m = 200 × 2/(0.287 × 350).

    Respuesta: 3.98 kg.

3. Halla h a 100 kPa y calidad 0.9 (h_f = 417.51, h_fg = 2257.5 kJ/kg).
    1. 417.51 + 0.9 × 2257.5.

    Respuesta: 2449.3 kJ/kg.

4. Se calientan 3 kg de agua de 15 °C a 65 °C. Halla Q.
    1. 3 × 4.18 × 50.

    Respuesta: 627 kJ.

5. Vapor a 10 kg/s pierde 800 kJ/kg en una turbina adiabática. Halla la potencia.
    1. 10 × 800.

    Respuesta: 8000 kW.

Serie de práctica final (todas las unidades)

1. Halla la eficiencia de Carnot entre 900 K y 300 K.

    1. 1 − 300/900.

    Respuesta: 66.7%.

2. Una bomba de calor entrega 12 kW con COP 4. Halla la potencia eléctrica y el calor tomado del exterior.

    1. W = 12/4; Q_L = 12 − 3.

    Respuesta: 3 kW y 9 kW.

3. Halla Δs de 1 kg de aire de 300 K, 100 kPa a 600 K, 100 kPa.

    1. 1.005 ln 2.

    Respuesta: 0.697 kJ/(kg·K).

4. Halla la exergía de 500 kJ de calor a 1000 K con T_0 = 300 K.

    1. 500 × 0.7.

    Respuesta: 350 kJ.

5. Halla la eficiencia Otto con r = 9.

    1. 1 − 9^(−0.4).

    Respuesta: 58.5%.

6. Un ciclo de refrigeración tiene q_L = 150 kJ/kg y w = 37.5 kJ/kg. Halla COP_R y COP_HP.

    1. 150/37.5.

    Respuesta: 4.0 y 5.0.

Hoja de fórmulas

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Constantes

Constante	**Valor**
Constante universal de los gases	R_u = 8.314 kJ/(kmol·K)
Aire (gas ideal, temperatura ambiente, valores de libro de texto)	R = 0.287 kJ/(kg·K), c_p = 1.005, c_v = 0.718 kJ/(kg·K), k = 1.4
Agua líquida (valor de libro de texto)	c = 4.18 kJ/(kg·K)
Calores latentes (valores de libro de texto)	fusión del hielo 334 kJ/kg; vaporización a 100 °C 2257 kJ/kg
Unidades de energía	1 kWh = 3600 kJ; 1 Btu = 1.055 kJ; 1 kWh = 3412 Btu
Temperatura absoluta	T(K) = T(°C) + 273.15

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

Textos, datos y simulaciones gratuitos

Usa estas clases, datos de propiedades y simulaciones gratuitos junto con el curso.

- MIT OpenCourseWare 16.050 Thermal Energy (Fall 2002) (https://ocw.mit.edu/courses/16-050-thermal-energy-fall-2002/): Apuntes y problemas gratuitos 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/): Apuntes gratuitos de termodinámica 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): Capítulo de 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): Capítulo de libro gratuito.
- NIST Chemistry WebBook: Thermophysical properties of fluid systems (https://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/): Tablas gratuitas de propiedades del vapor y de refrigerantes.
- PhET: Gas Properties (https://phet.colorado.edu/en/simulations/gas-properties): Presión, volumen y temperatura de forma interactiva.

Glosario

Adiabático
Sin transferencia de calor.

Relación de trabajo de retroceso
Trabajo del compresor entre trabajo de la turbina.

COP
Coeficiente de desempeño de un refrigerador o una bomba de calor.

Ciclo de Carnot
Ciclo reversible entre dos depósitos; el mejor posible.

Volumen de control
Región del espacio que la masa puede cruzar.

Estado muerto
Equilibrio con los alrededores.

Entalpía
$h = u + pv$.

Entropía
Propiedad con $dS = \delta Q_{rev}/T$; mide la irreversibilidad.

Exergía
Trabajo útil máximo obtenible.

Máquina térmica
Dispositivo que convierte calor en trabajo en un ciclo.

Bomba de calor
Dispositivo que mueve calor de lo frío a lo caliente usando trabajo.

Consumo térmico unitario
Btu de combustible por kWh generado.

Isentrópico
Entropía constante; reversible y adiabático.

Calor latente
Energía para el cambio de fase a temperatura constante.

Calidad
Fracción másica de vapor de una mezcla saturada.

Ciclo Rankine
Ciclo de potencia de vapor: bomba, caldera, turbina, condensador.

Proceso reversible
Proceso idealizado sin generación de entropía.

Saturación
Estado en que coexisten líquido y vapor.

Calor específico
Energía para elevar 1 kg en 1 K.

Estrangulamiento
Caída de presión a entalpía constante.

Rúbrica de autoevaluación

No se otorga nota ni crédito. Úsala para valorar con honestidad dónde estás en cada unidad.

Nivel	Cómo se ve
4 · Dominio	Dibuja sistemas y diagramas, busca los estados correctamente, escribe balances completos de masa, energía y entropía, comprueba con los límites de Carnot y realiza las prácticas con seguridad.
3 · Competente	Resuelve los problemas de práctica con algún error ocasional de tablas o unidades.
2 · En desarrollo	Sigue los ejemplos resueltos pero confunde sistemas abiertos y cerrados, o usa °C en cocientes.
1 · Inicial	Sustituye números en fórmulas sin esquema del sistema; necesita repasar la unidad.

Ponderación sugerida si quieres una nota

Parte	Peso
Problemas de práctica	20%
Prácticas	25%
Serie de práctica de mitad de curso	25%
Serie de práctica final	30%

Apunta al nivel 3 o superior en cada unidad antes de pasar al siguiente curso.

Cursos relacionados

- Aerodinámica I AERO 310
- Mecánica de fluidos ENGR 330
- Actuaciones de aeronaves AERO 320
- Todos los cursos