

TERMODINÁMICA

PRODUCCIÓN INDUSTRIAL

Innovación que
TRANSFORMA

FICHA
GENERAL

PRODUCCIÓN INDUSTRIAL

Modalidad: Híbrida

Materia: Termodinámica

Docente: Andrés López

2023-2024

AUTOR / OBRA
PhD. Andrés López

REVISORES INTERNOS
Ing. Juan Carlos Vidal

COLABORADORES
Diego Vintimilla

DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN
Andrés Bernal



© Institutos Superior Tecnológico Wissen

Primera Edición, 2024

© Instituto Superior Tecnológico Wissen

Av. 10 de agosto y J. María Sánchez Cuenca –
Ecuador
(+593) 0987934934
investigacion@wissen.edu.ec
www.wissen.edu.ec

Fecha de publicación: 2024

La reproducción parcial o total de esta obra,
en cualquier forma y por cualquier medio
mecánico o electrónico, está permitida
siempre y cuando sea autorizada por los
editores y se cite correctamente la fuente.

DISTRIBUCIÓN GRATUITA
PROHIBIDA SU VENTA

INTRODUCCIÓN	2
Descripción de la Asignatura:	2
Objetivo General de la Asignatura:	2
Resultados de Aprendizaje:	2
1. Unidad 1: Conceptualización de la Termodinámica	5
1.1. Introducción a la Termodinámica	5
1.2 Termodinámica y energía	5
1.3 Unidades	8
1.3.1 Temperatura	8
1.3.2 Presión	9
1.3.3 Presión y energía	9
1.3.4 Potencia y densidad de energía	10
1.3.5 Propiedades intensivas y extensivas	10
1.3.6 Tipos de Energía: ejemplo “primera ley”	11
2. Unidad 2: Sustancias Puras	12
2.1 Conceptualización de las Sustancias Puras	12
2.2 Ecuaciones de estado	15
2.2.1 Ecuaciones de estado de Van Der Waals	15
2.2.2 Ecuación de estado de Beattie-Bridgeman	15
2.2.3 Ecuación de estado de Benedict-Webb-Rubin	16
3. Unidad 3: Formas de energía	17
3.1 Diferentes formas de energía	17
3.2 Primera ley de la termodinámica en sistemas cerrados	20
3.3 Análisis de la primera ley de la termodinámica en sistemas cerrados con flujo no estacionario	23
3.3 Segunda ley de termodinámica	24
3.3.1 La segunda Ley de la Termodinámica: Enunciado de Kelvin – Plank	26
3.3.2 La segunda ley de la Termodinámica: Enunciado de Clausius	26
3.3.3 Ciclos de Carnot	30
4. Unidad 4: Entropía	33
4.1 Conceptualización a la entropía	33
5. Bibliografía	35

INTRODUCCIÓN

La termodinámica es una disciplina fundamental de la física que estudia la energía, sus transformaciones y su influencia en los sistemas físicos. Por ello, esta guía ha sido diseñada para facilitar una comprensión integral de los principios básicos y aplicados de la termodinámica, promoviendo el desarrollo de habilidades analíticas y la capacidad de resolver problemas.

Este material está estructurado para guiar a los estudiantes en su aprendizaje a través de conceptos teóricos, ejemplos prácticos y actividades didácticas que fomentan la reflexión y el trabajo colaborativo.

Descripción de la Asignatura:

La asignatura de Termodinámica aborda los principios y leyes fundamentales que rigen el intercambio de energía y las transformaciones de materia en diversos sistemas. Mediante un enfoque teórico y práctico, los estudiantes desarrollarán habilidades para analizar y optimizar sistemas energéticos, interpretar diagramas termodinámicos y aplicar conceptos clave como la conservación de energía, la entropía y los ciclos térmicos en escenarios reales.

Objetivo General de la Asignatura:

Comprender los principios fundamentales de la termodinámica y aplicarlos en el análisis y optimización de procesos industriales, con un enfoque en la eficiencia energética y la sostenibilidad.

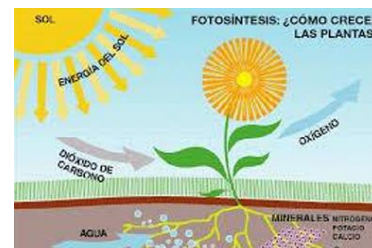
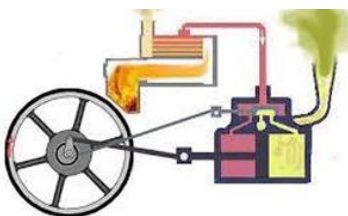
Resultados de Aprendizaje:

- **Resultados de aprendizaje de conocimientos:**
 - a. Comprender los principios y leyes de la Termodinámica aplicados a sistemas industriales.
 - b. Analizar los conceptos de eficiencia energética en distintos procesos y ciclos.
- **Resultados de aprendizaje de destrezas:**
 - a. Aplicar los principios termodinámicos para calcular la eficiencia de sistema energéticos.
 - b. Medir las variables termodinámicas, como la temperatura y presión.
- **Resultados de aprendizaje de valores y actitudes:**
 - a. Fomentar el compromiso con la eficiencia energética y la sostenibilidad en el ámbito industrial.
 - b. Valorar el trabajo colaborativo y la ética profesional en la optimización de sistemas energéticos.

Conceptualización de la Termodinámica

1.1. Introducción a la Termodinámica

La termodinámica es una disciplina que se encarga del estudio de los principios fundamentales que rigen la energía, el calor y el trabajo, así como sus transformaciones e interacciones dentro de los sistemas y objetos físicos.



"La mente es un paracaídas: trabaja sólo cuando está abierta. Las leyes de la naturaleza constituyen el gobierno invisible de la tierra" (Alfred A. Montapert).

1.2 Termodinámica y energía

El consumo de energía varía significativamente entre países y refleja factores como el nivel de desarrollo económico, la densidad poblacional y las políticas energéticas adoptadas. Una imagen nocturna del mundo, captada por los sistemas satelitales meteorológicos de defensa de EE.UU., conocidos como "Operation Linescan Systems," ofrece una representación visual impactante de estas diferencias energéticas entre naciones (Ver Figura 1).

Figura 1

Global energy demands are high

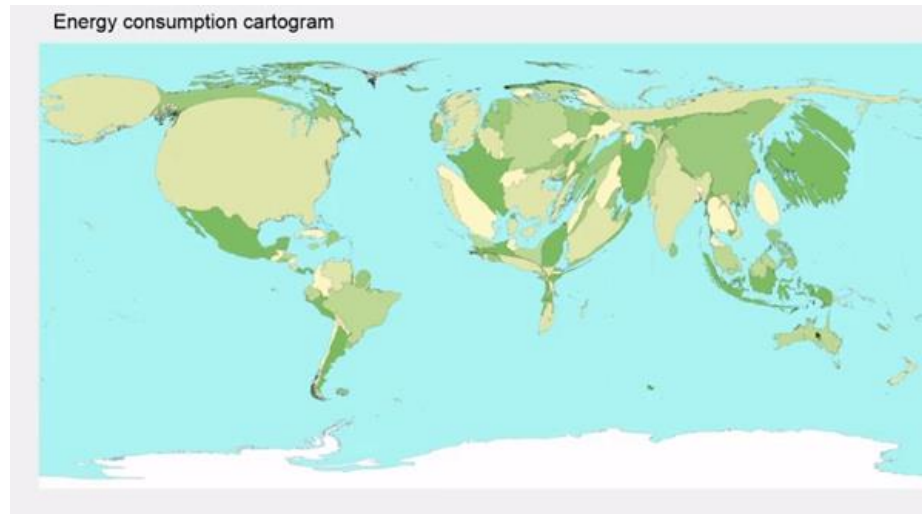


Fuente: Science@Nasa, Lighting up the ecosphere

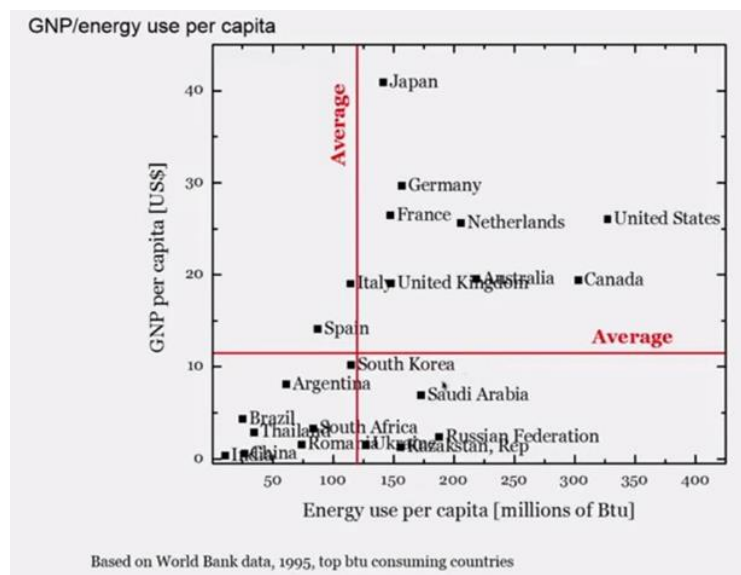
- Proporción de los países y su población (representación gráfica):



- Cartograma mundial en función del consumo de energía:

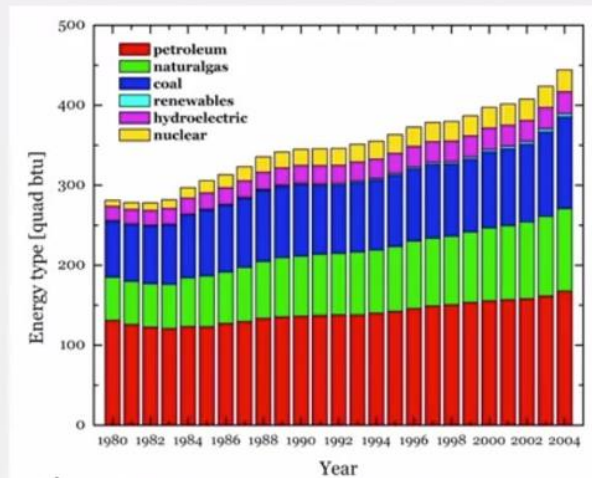


- **Uso de energía per cápita (millones de BTU) vs PIB (USD):**



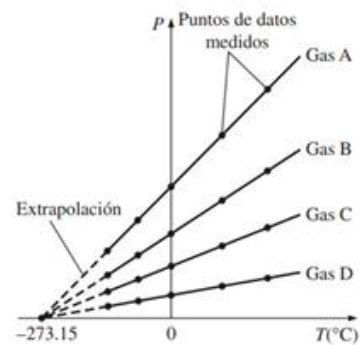
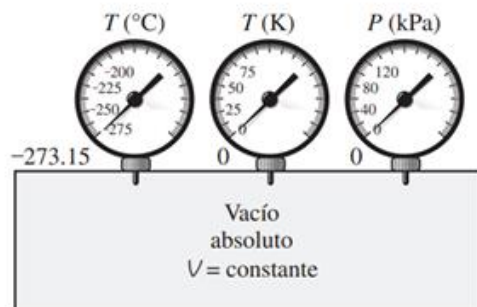
- **Diferentes formas de energía por su fuente a nivel mundial:**

Global consumption of energy by source

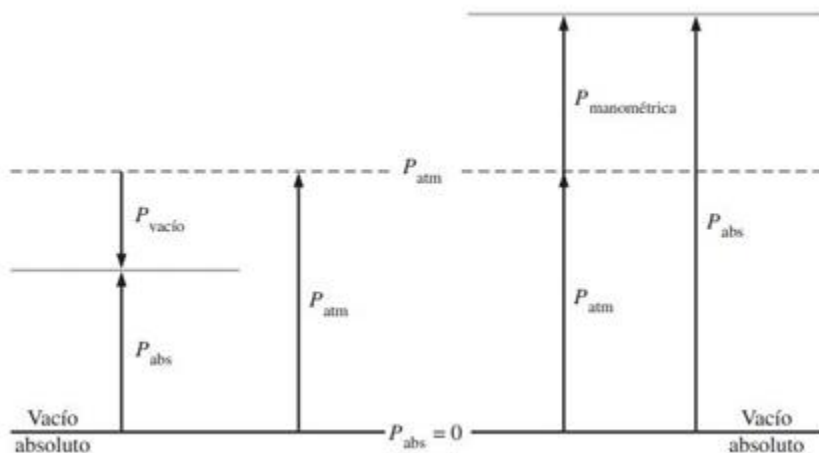


1.3 Unidades

1.3.1 Temperatura



1.3.2 Presión



1.3.3 Presión y energía

UNITS ARE ABSOLUTELY CRITICAL FOR THERMODYNAMICS

Common Units and Conversion Factors for Energy Analysis

Pressure

$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ kg/m s}^2 = 1 \text{ kg/(m s}^2) = 1 \times 10^{-5} \text{ bar} = 1.4504 \times 10^{-4} \text{ psia} = 9.8692 \times 10^{-6} \text{ atm}$
 $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0.98692 \text{ atm} = 14.504 \text{ psia} = 2088.6 \text{ lbf/ft}^2$
 $1 \text{ lbf/in}^2 \text{ (psia)} = 144 \text{ lbf/ft}^2 = 6894.8 \text{ Pa} = 6.8948 \times 10^{-2} \text{ bar} = 0.068046 \text{ atm}$
 $1 \text{ atm} = 101.325 \text{ kPa} = 14.696 \text{ psia} = 1.0133 \text{ bar} = 2116.2 \text{ lbf/ft}^2$

Energy

$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ kg m}^2/\text{s}^2 = 1 \text{ Ws}$
 $1 \text{ kJ} = 1 \text{ kW s} = 0.94783 \text{ Btu} = 0.23885 \text{ kcal} = 737.56 \text{ ft lbf}$
 $1 \text{ Btu} = 1.0550 \text{ kJ} = 0.252 \text{ kcal} = 778.16 \text{ ft lbf}$
 $1 \text{ kcal} = 4.1868 \text{ kJ} = 3.9684 \text{ Btu} = 3088.0 \text{ ft lbf}$
 $1 \text{ kWh} = 3.60 \times 10^3 \text{ kJ} = 2655.2 \times 10^3 \text{ ft lbf} = 3412.2 \text{ Btu}$
 $1 \text{ ft lbf} = 1.2851 \times 10^{-3} \text{ Btu} = 1.3558 \times 10^{-3} \text{ kJ}$
 $1 \text{ therm} = 10^5 \text{ Btu} = 29.3 \text{ kWh} = 1.05506 \times 10^8 \text{ J}$
 $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$
 $1 \text{ MTOE} = 1 \text{ million tonnes of oil equivalent} = 0.04 \times 10^{15} \text{ Btu} = 6.9 \times 10^7 \text{ BOE}$
 $1 \text{ BOE} = 1 \text{ barrel of oil equivalent} = 5.8 \times 10^6 \text{ Btu}$
 $1 \text{ gallon of gasoline} = 1.24 \times 10^5 \text{ Btu}$

1.3.4 Potencia y densidad de energía

Common Units and Conversion Factors for Energy Analysis

Energy Rate or Power

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$$

$$1 \text{ W} = 3.4122 \text{ Btu/h} = 0.85987 \text{ kcal/h} = 1.34102 \times 10^{-3} \text{ hp} = 0.73756 \text{ ft lbf/s}$$

We = Watt of electric power

Wt = Watt of thermal power

$$1 \text{ Btu/h} = 0.29307 \text{ W} = 0.252 \text{ kcal/h} = 3.93 \times 10^{-4} \text{ hp} = 0.21616 \text{ ft lbf/s}$$

$$1 \text{ kcal/h} = 1.163 \text{ W} = 3.9683 \text{ Btu/h} = 1.5595 \times 10^{-3} \text{ hp} = 0.85778 \text{ ft lbf/s}$$

$$1 \text{ hp} = 550 \text{ ft lbf/s} = 2544.5 \text{ Btu/h} = 745.7 \text{ W}$$

$$1 \text{ ton (cooling capacity)} = 12,000 \text{ Btu/h} = 3.5168 \text{ kW}$$

Energy Density (Energy per Unit Mass or per Unit Mole or per Unit Area)

(Mass)

$$1 \text{ kJ/kg} = 0.42992 \text{ Btu/lbm} = 0.23885 \text{ kcal/kg} = 334.55 \text{ ft lbf/lbm}$$

(Mole)

$$1 \text{ kJ/kmol}, 1 \text{ Btu/mol}, \text{ etc.}$$

(Rate per Area)

$$1 \text{ W/m}^2 = 0.317 \text{ Btu/(h ft}^2\text{)} = 0.85986 \text{ kcal/(h m}^2\text{)}$$

$$1 \text{ Btu/(h ft}^2\text{)} = 3.1546 \text{ W/m}^2 = 2.7125 \text{ kcal/(h m}^2\text{)}$$

$$1 \text{ kcal/(h m}^2\text{)} = 1.163 \text{ W/m}^2 = 0.36867 \text{ Btu/(h ft}^2\text{)}$$

1.3.5 Propiedades intensivas y extensivas

Extensive properties – depend on the extent (or amount) of material in the system; these are properties that are additive, like mass

Intensive properties – do NOT depend on the extent (or amount) of material in the system; these are properties which are NOT additive, like temperature

Equilibrium – when the system is unchanging in terms of thermal, mechanical, phase and chemical characteristics

Process – a path between two states

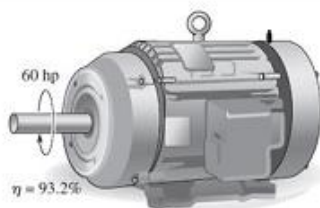
1.3.6 Tipos de Energía: ejemplo “primera ley”

$$\Delta E = Q - W$$

ΔE : Variación de energía en el sistema

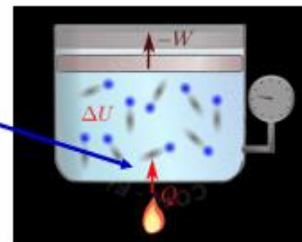
Q : Calor intercambiado con el sistema

W : Trabajo que realiza el sistema



Motor de alta eficiencia

Energía Interna $\Delta U = m(u_2 - u_1)$
 Energía Cinética $\Delta EC = \frac{1}{2}m(V_2^2 - V_1^2)$
 Energía Potencial (Energía del fluido) $\Delta EP = mg(z_2 - z_1)$



“La verdadera medida de un hombre es la forma en que trata a alguien que no puede hacerle absolutamente ningún bien” (Samuel Johnson).

2.1 Conceptualización de las Sustancias Puras

Las sustancias puras poseen una composición química uniforme y constante en todas sus partes, junto con propiedades físicas bien definidas. Esto significa que una sustancia pura está compuesta únicamente por un tipo de molécula o átomo, sin mezclas de otras sustancias. Es por ello que, en Termodinámica, se estudian las propiedades y el comportamiento de estas sustancias cuando cambian de fase —por ejemplo, de líquido a gas— bajo distintas condiciones de presión y temperatura.

Qué está mal con esta expresión:

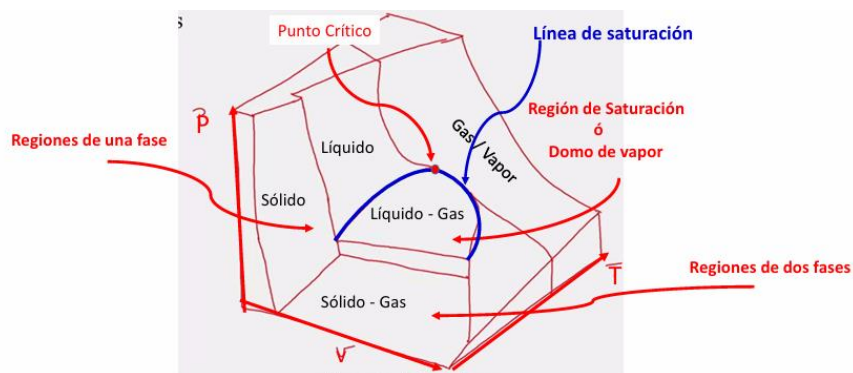
$$\int \delta Q = Q_2 - Q_1?$$

Conservación de la energía:

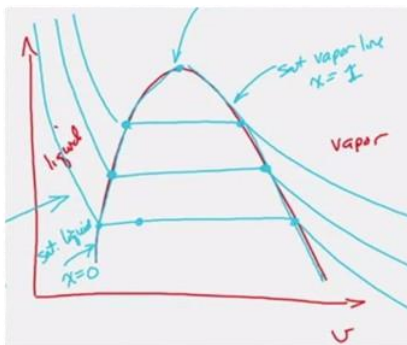
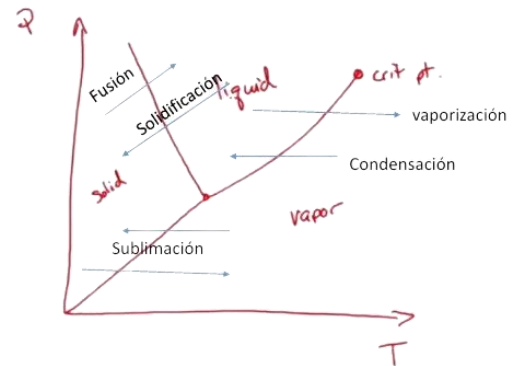
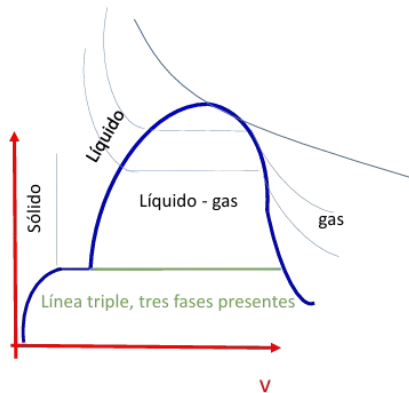
$$E_2 - E_1 = Q_2 - W_2$$

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} \leftarrow$$

- Diagrama 3D de fases y estados de la materia



- Diagrama 2D de fases

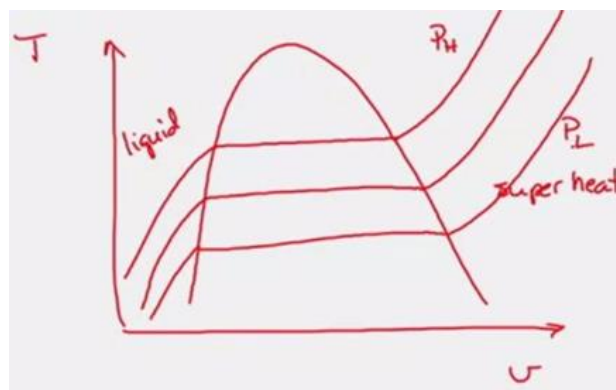


$$\text{Calidad} = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{liq}} + m_{\text{vapor}}} = x [-]$$

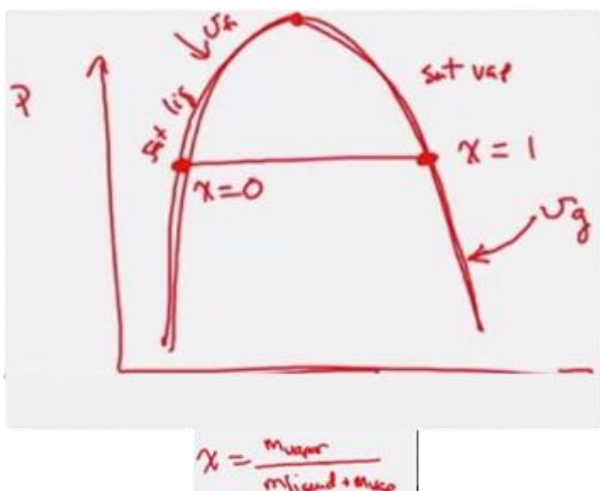
$x=1$ Vapor saturado

$x=0$ Líquido saturado

- Diagrama 2D Temperatura – Volumen



- Análisis de la calidad y el volumen



$$v_{\text{Tot}} = \frac{V_{\text{Tot}}}{m_{\text{Tot}}} = \frac{V_{\text{liq}}}{m_{\text{Tot}}} + \frac{V_{\text{vap}}}{m_{\text{Tot}}}$$

$$V_{\text{liq}} = m_{\text{liq}} v_f \quad V_{\text{vap}} = m_{\text{vap}} v_g$$

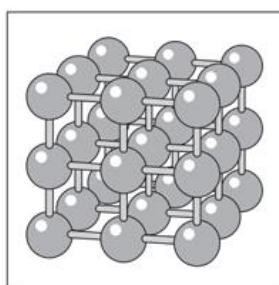
$$v_{\text{Tot}} = \frac{m_{\text{liq}} v_f + m_{\text{vap}} v_g}{m_{\text{Tot}}}$$

$$v_{\text{Tot}} = (1-x)v_f + xv_g$$

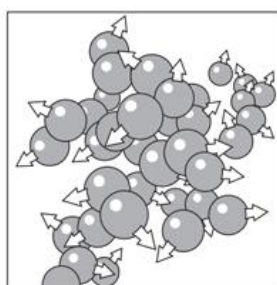
Ejercicio Práctico

Ejercicio Práctico

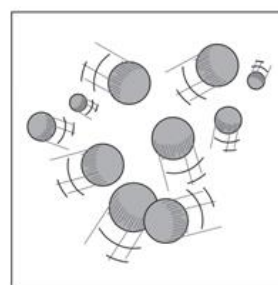
¿Cuáles son los tres estados de la materia?



a)



b)



c)

2.2 Ecuaciones de estado

Las ecuaciones de estado es una relación matemática que conecta las propiedades de un sistema de equilibrio, como la presión, volumen y temperatura. Estas ecuaciones ayudan a describir el estado de un gas o de un sistema en función de estas variables, y son fundamentales para entender el comportamiento de los gases y los líquidos en diversas condiciones.

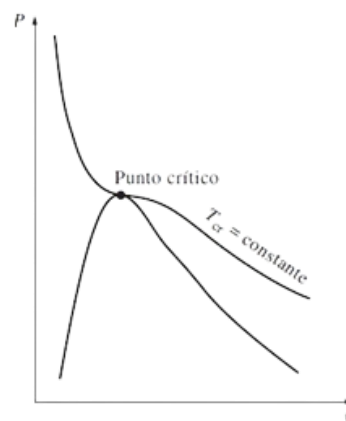
2.2.1 Ecuaciones de estado de Van Der Waals

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT$$

a fuerzas intermoleculares

b volumen que ocupan las moléculas del gas

$$a = \frac{27R^2T_{cr}^2}{64P_{cr}} \quad y \quad b = \frac{RT_{cr}}{8P_{cr}}$$



2.2.2 Ecuación de estado de Beattie-Bridgeman

hasta $0.8p_{cr}$

$$P = \frac{R_u T}{\bar{v}^2} \left(1 - \frac{c}{\bar{v} T^3}\right) (\bar{v} + B) - \frac{A}{\bar{v}^2} \quad \text{tabla 3-4} \quad A = A_0 \left(1 - \frac{a}{\bar{v}}\right) \quad y \quad B = B_0 \left(1 - \frac{b}{\bar{v}}\right)$$

a) Cuando P está en kPa, $\bar{v}$ está en m^3/kmol , T en K y $R_u = 8.314 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kmol} \cdot \text{K}$, las cinco constantes de la ecuación de Beattie-Bridgeman son:

Gas	A_0	a	B_0	b	c
Aire	131.8441	0.01931	0.04611	-0.001101	4.34×10^4
Argón, Ar	130.7802	0.02328	0.03931	0.0	5.99×10^4
Dióxido de carbono, CO_2	507.2836	0.07132	0.10476	0.07235	6.60×10^5
Helio, He	2.1886	0.05984	0.01400	0.0	40
Hidrógeno, H_2	20.0117	-0.00506	0.02096	-0.04359	504
Nitrógeno, N_2	136.2315	0.02617	0.05046	-0.00691	4.20×10^4
Oxígeno, O_2	151.0857	0.02562	0.04624	0.004208	4.80×10^4

Fuente: Gordon J. Van Wylen y Richard E. Sonntag, *Fundamentals of Classical Thermodynamics*, versión sistema inglés/SI, 3a. ed., Nueva York, John Wiley & Sons, 1986, p. 46, tabla 3.3.

2.2.3 Ecuación de estado de Benedict-Webb-Rubin

$$P = \frac{R_u T}{\bar{v}} + \left(B_0 R_u T - A_0 - \frac{C_0}{T^2} \right) \frac{1}{\bar{v}^2} + \frac{b R_u T - a}{\bar{v}^3} + \frac{a \alpha}{\bar{v}^6} + \frac{c}{\bar{v}^3 T^2} \left(1 + \frac{\gamma}{\bar{v}^2} \right) e^{-\gamma/\bar{v}^2}$$

b) Cuando P está en kPa, $\bar{v}$ está en m^3/kmol , T está en K y $R_u = 8.314 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kmol} \cdot \text{K}$, las ocho constantes de la ecuación de Benedict-Webb-Rubin son:

Gas	a	A_0	b	B_0	c	C_0	α	γ
n-butano, C_4H_{10}	190.68	1 021.6	0.039998	0.12436	3.205×10^7	1.006×10^8	1.101×10^{-3}	0.0340
Dióxido de carbono, CO_2	13.86	277.30	0.007210	0.04991	1.511×10^6	1.404×10^7	8.470×10^{-5}	0.00539
Monóxido de carbono, CO	3.71	135.87	0.002632	0.05454	1.054×10^5	8.673×10^5	1.350×10^{-4}	0.0060
Metano, CH_4	5.00	187.91	0.003380	0.04260	2.578×10^5	2.286×10^6	1.244×10^{-4}	0.0060
Nitrógeno, N_2	2.54	106.73	0.002328	0.04074	7.379×10^4	8.164×10^5	1.272×10^{-4}	0.0053

Fuente: Kenneth Wark, *Thermodynamics*, 4a. ed., Nueva York, McGraw-Hill, 1983, p. 815, tabla A-21M. Publicado originalmente en H. W. Cooper y J. C. Goldfrank, *Hydrocarbon Processing* 46, núm. 12, 1967, p. 141.

Ejercicio Práctico

Análisis

- Haga la predicción de la presión del gas nitrógeno a $T=175 \text{ K}$ y $V = 0.00375 \text{ m}^3/\text{kg}$ con base en a) la ecuación de gas ideal, b) la ecuación de estado de Van der Waals, c) la ecuación de estado de Beattie-Bridgeman y d) la ecuación de estado de Benedict-Webb-Rubin. Compare los valores obtenidos con el valor de 10.000 kPa, determinando en forma experimental. R nitrógeno 0.2968 kPa – $\text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{K}$

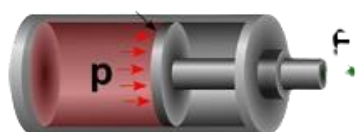
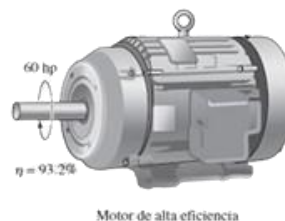
$$P = \frac{RT}{v} = \frac{(0.2968 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{K})(175 \text{ K})}{0.00375 \text{ m}^3/\text{kg}} = 13\,851 \text{ kPa}$$

3.1 Diferentes formas de energía

Se renuncia al uso de una convención de signos formal para calor y trabajo debido a que a menudo puede ser contraproducente. Se adopta un método físicamente significativo e interesante para crear interacciones en lugar de un método mecánico. Los subíndices “entrada” y “salida” se emplean en lugar de los signos más y menos con el fin de señalar las direcciones de las interacciones.

$$T = F r \times d$$

$$N = T \times \omega$$



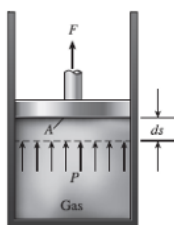
$$W = \int P dV$$

$$N = W \times 1/s$$

Problema: Se tiene un pistón de aire que trabaja en dos procesos en serie:

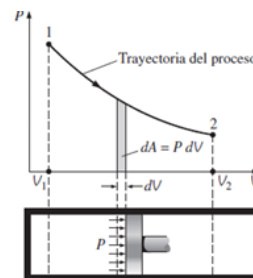
- En el primer proceso el aire es comprimido en un proceso politrópico Donde: $PV^n = \text{const.}$ ($n=1,3$). La condición inicial del aire es 100kPa y 0,04m³/kg. El volumen específico al final del primer proceso es 0,02m³/kg.
- a) Realice el diagrama presión – volumen de los 2 procesos y de los estados 1, 2 y 3.
- b) Determine el trabajo específico para cada proceso y el total del trabajo.

• Trabajo de frontera móvil:

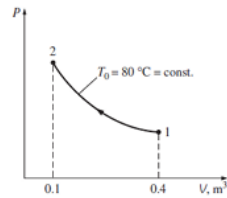


$$\delta W_b = F ds = PA ds = P dV$$

$$W_b = \int_1^2 P dV$$



- Trabajo de frontera móvil a temperatura constante

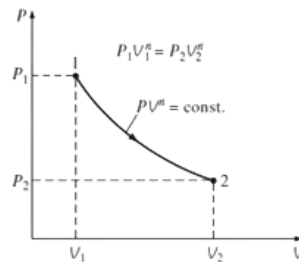


$$W_b = \int_1^2 P dV$$

$$PV = mRT_0 = C \quad \text{o} \quad P = \frac{C}{V}$$

$$W_b = \int_1^2 \frac{C}{V} dV = C \int_1^2 \frac{dV}{V} = C \ln \frac{V_2}{V_1} = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

- Trabajo de frontera en proceso politrópico



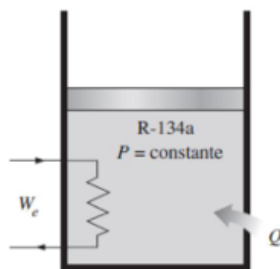
$$W_b = \int_1^2 P dV :$$

$$P = CV^{-n}$$

$$W_b = \int_1^2 CV^{-n} dV = C \frac{V_2^{-n+1} - V_1^{-n+1}}{-n+1} = \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{1-n}$$

$$W_b = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1-n} \quad n \neq 1$$

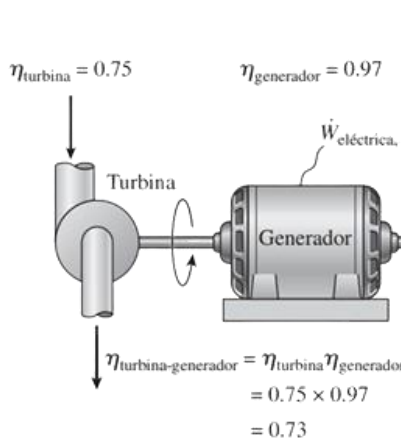
- Diferentes formas de trabajo



$$\dot{W}_e = \dot{I} \cdot V$$

$$W_e = I \cdot V \cdot t$$

- Eficiencia del trabajo



$\eta_{turbina} = 0.75$ $\eta_{generador} = 0.97$

$\eta_{turbina-generator} = \eta_{turbina} \eta_{generador}$
 $= 0.75 \times 0.97$
 $= 0.73$

Motor: $\eta_{motor} = \frac{\text{Salida de potencia mecánica}}{\text{Entrada de potencia eléctrica}} = \frac{\dot{W}_{flecha, salida}}{\dot{W}_{eléctrica, entrada}}$

y

Generador: $\eta_{generador} = \frac{\text{Salida de potencia eléctrica}}{\text{Entrada de potencia mecánica}} = \frac{\dot{W}_{eléctrica, salida}}{\dot{W}_{flecha, entrada}}$

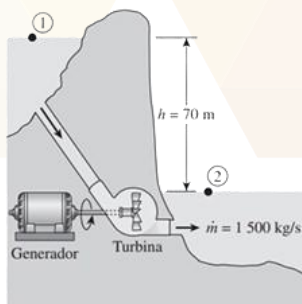
$\eta_{bomba-motor} = \eta_{bomba} \eta_{motor} = \frac{\dot{W}_{bomba, e}}{\dot{W}_{eléctrica, entrada}} = \frac{\Delta \dot{E}_{mecánica, fluido}}{\dot{W}_{eléctrica, entrada}}$

$\eta_{turbina-generator} = \eta_{turbina} \eta_{generador} = \frac{\dot{W}_{eléctrica, salida}}{\dot{W}_{turbina, e}} = \frac{\dot{W}_{eléctrica, salida}}{|\Delta \dot{E}_{mecánica, fluido}|}$

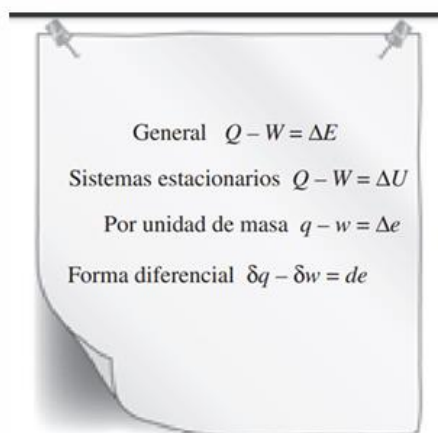
Ejercicio Práctico

Análisis

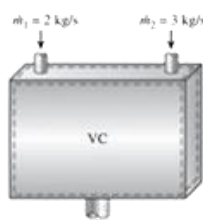
Se generará energía eléctrica mediante la instalación de una turbina hidráulica en un punto ubicado a 70 metros por debajo de la superficie de un gran embalse. Este embalse puede suministrar agua de manera continua a una tasa de 1,500 kg/s. La potencia mecánica generada por la turbina es de 800 kW, y la potencia eléctrica obtenida es de 750 kW. Determine la eficiencia de la turbina y la eficiencia total combinada del sistema turbina-generator de esta planta, ignorando las pérdidas en las tuberías.



3.2 Primera ley de la termodinámica en sistemas cerrados



$$\left(\text{Masa total que entra al VC durante } \Delta t \right) - \left(\text{Masa total que sale del VC durante } \Delta t \right) = \left(\text{Cambio neto de masa dentro del VC durante } \Delta t \right)$$



- **Cantidad de energía transportada por la masa**

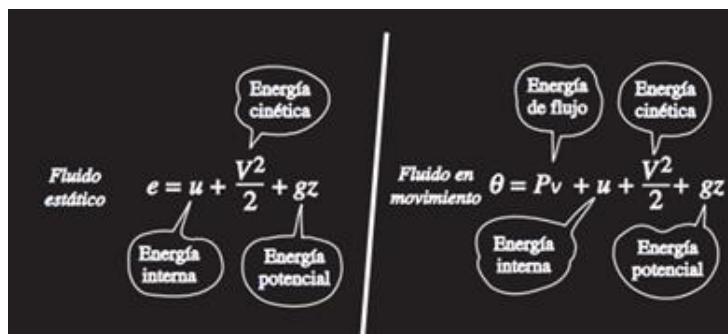
- Cantidad de energía transportada:

$$E_{\text{masa}} = m\theta = m \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \quad (\text{kJ})$$

- Tasa de energía transportada:

$$\dot{E}_{\text{masa}} = \dot{m}\theta = \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \quad (\text{kW})$$

- Formas de energía para la primera ley



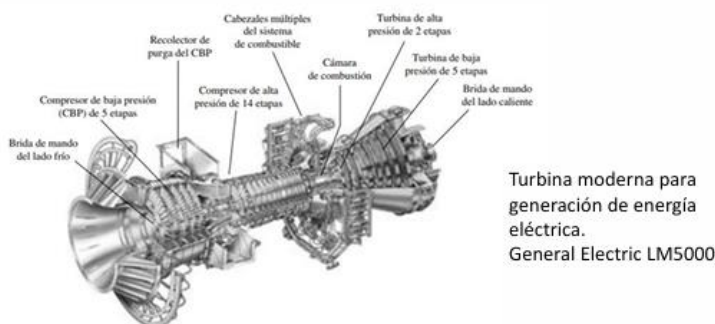
- Primera ley en flujo estacionario

$$\dot{Q}_{\text{entrada}} + \dot{W}_{\text{entrada}} + \sum_{\text{entrada}} \dot{m}\theta = \dot{Q}_{\text{salida}} + \dot{W}_{\text{salida}} + \sum_{\text{salida}} \dot{m}\theta$$

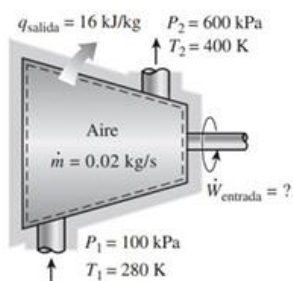
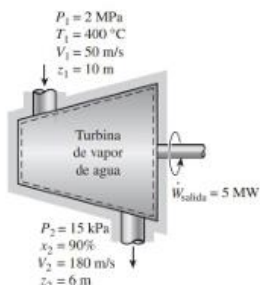
- También se puede considerar esta opción:

$$\dot{Q}_{\text{entrada}} + \dot{W}_{\text{entrada}} + \sum_{\text{entrada}} \dot{m} \underbrace{\left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)}_{\text{por cada entrada}} = \dot{Q}_{\text{salida}} + \dot{W}_{\text{salida}} + \sum_{\text{salida}} \dot{m} \underbrace{\left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)}_{\text{por cada salida}}$$

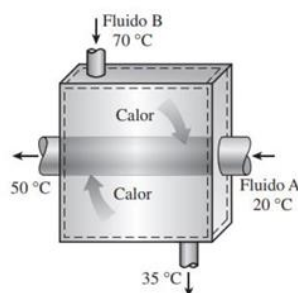
- Dispositivos ingenieriles de flujo estacionario



- Turbina y compresores



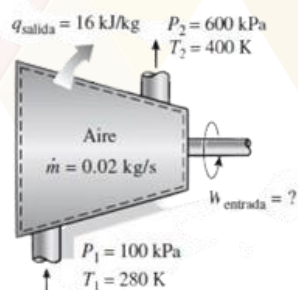
- Intercambiadores de calor



Ejercicio Práctico

Análisis

Aire a 100 kPa y 280 K se comprime en régimen estacionario hasta alcanzar una presión de 600 kPa y una temperatura de 400 K. El flujo másico de aire es de 0.02 kg/s y se produce una pérdida de calor de 16 kJ/kg durante el proceso. Suponiendo que los cambios en la energía cinética y potencial son despreciables, determine la potencia de entrada necesaria para el compresor.

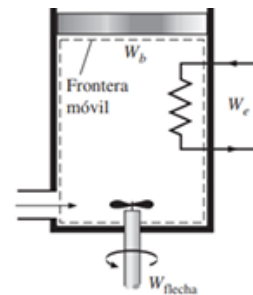


3.3 Análisis de la primera ley de la termodinámica en sistemas cerrados con flujo no estacionario

El balance de energía para un sistema de flujo uniforme se fundamenta en aplicar la primera ley de la termodinámica a un volumen de control bajo condiciones de flujo estacionario:

$$\left(Q_{\text{entrada}} + W_{\text{entrada}} + \sum_{\text{entrada}} m\theta \right) - \left(Q_{\text{salida}} + W_{\text{salida}} + \sum_{\text{salida}} m\theta \right) = (m_2e_2 - m_1e_1)_{\text{sistema}}$$

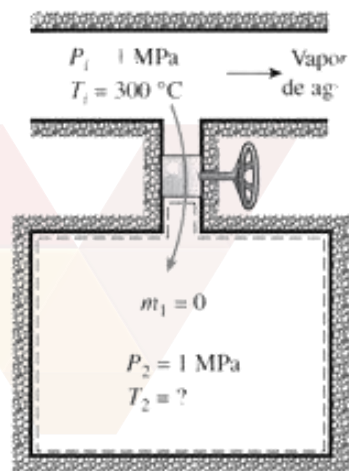
$$Q - W = \sum_{\text{salida}} mh - \sum_{\text{entrada}} mh + (m_2u_2 - m_1u_1)_{\text{sistema}}$$



Ejercicio Práctico

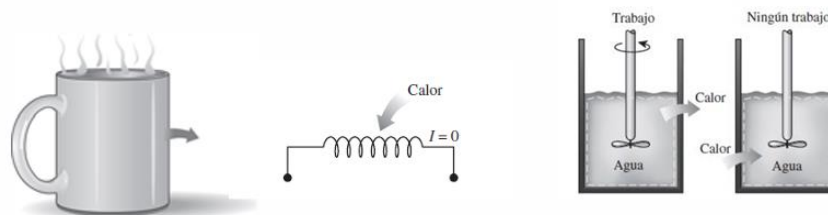
Análisis

Un recipiente rígido y aislado, inicialmente vacío, está conectado mediante una válvula a una línea de suministro que transporta vapor de agua a 1 MPa y 300 °C. Al abrir la válvula, se permite que el vapor fluya lentamente hacia el recipiente hasta que la presión en su interior alcanza 1 MPa, momento en el cual se cierra la válvula. Determine la temperatura final del vapor dentro del recipiente.

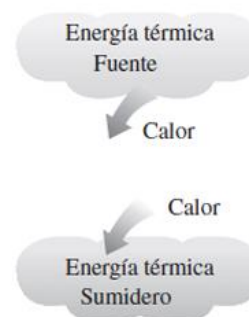
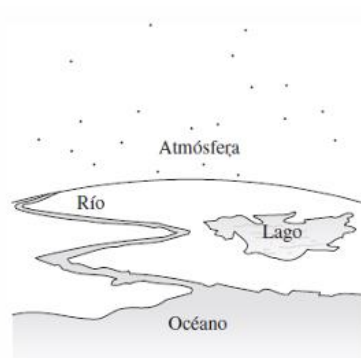


a) Flujo de vapor de agua hacia un recipiente evacuado

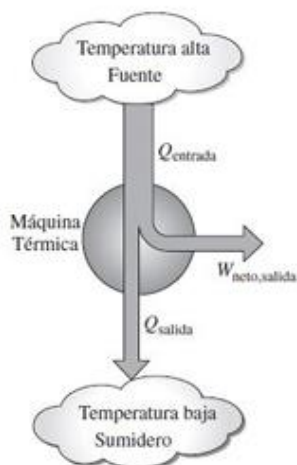
3.3 Segunda ley de termodinámica



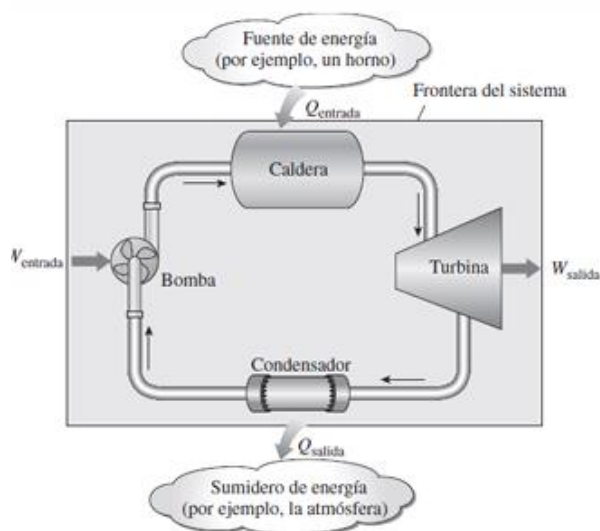
- **Dispositivos de energía**



- **Máquinas térmicas**



1. Reciben calor de una fuente a temperatura alta (energía solar, horno de petróleo, reactor nuclear, etcétera).
2. Convierten parte de este calor en trabajo (por lo general en la forma de una flecha rotatoria).
3. Rechazan el calor de desecho hacia un sumidero de calor de baja temperatura (la atmósfera, los ríos, etcétera).
4. Operan en un ciclo



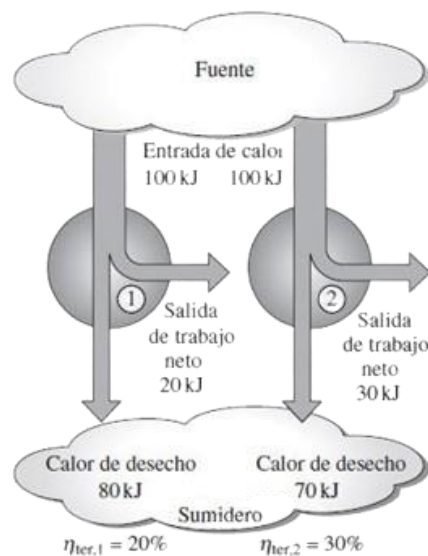
- $Q_{entrada}$ cantidad de calor suministrada al vapor en una caldera desde una fuente de temperatura alta (horno).
- Q_{salida} cantidad de calor rechazada del vapor en el condensador hacia un sumidero de temperatura baja (atmósfera, río, etc).
- W_{salida} cantidad de trabajo que entrega el vapor cuando se expande en una turbina.
- $W_{entrada}$ cantidad de trabajo requerida para comprimir agua a la presión de la caldera.

• Eficiencia Térmica

$$\text{Eficiencia térmica} = \frac{\text{Salida de trabajo neto}}{\text{Entrada de calor total}}$$

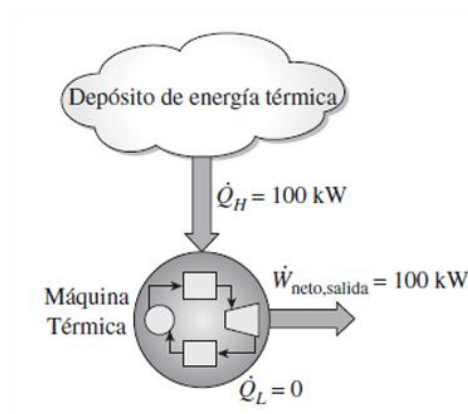
$$\eta_{\text{ter}} = \frac{W_{\text{neto, salida}}}{Q_{\text{entrada}}}$$

$$\eta_{\text{ter}} = 1 - \frac{Q_{\text{salida}}}{Q_{\text{entrada}}}$$



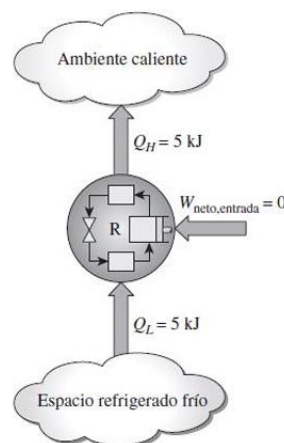
3.3.1 La segunda Ley de la Termodinámica: Enunciado de Kelvin – Plank

Es imposible que un dispositivo que opera en un ciclo reciba calor de un único depósito y genere una cantidad neta de trabajo.

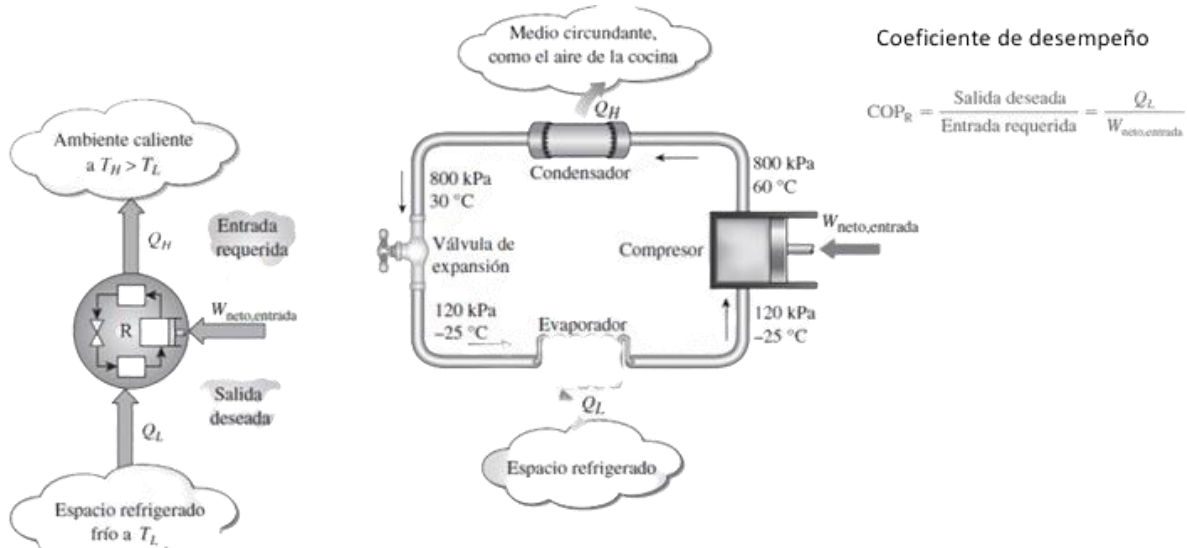


3.3.2 La segunda ley de la Termodinámica: Enunciado de Clausius

Es imposible construir un dispositivo que opere en un ciclo y produzca como único efecto la transferencia de calor desde un cuerpo a menor temperatura hacia otro de mayor temperatura.

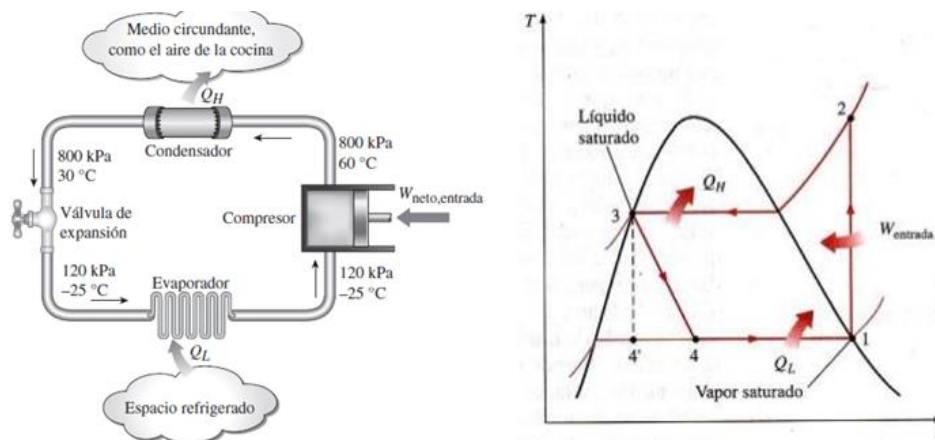


- Refrigeradores



Coefficiente de desempeño

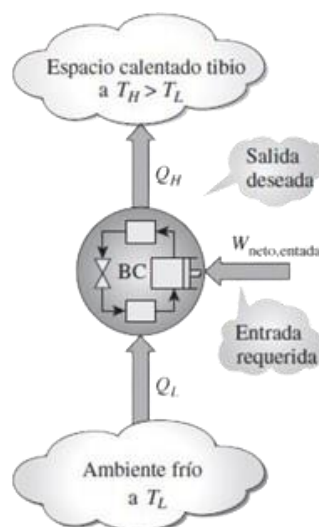
$$\text{COP}_R = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Entrada requerida}} = \frac{Q_L}{W_{\text{neto, entrada}}}$$



- Bomba de Calor

Coeficiente de desempeño

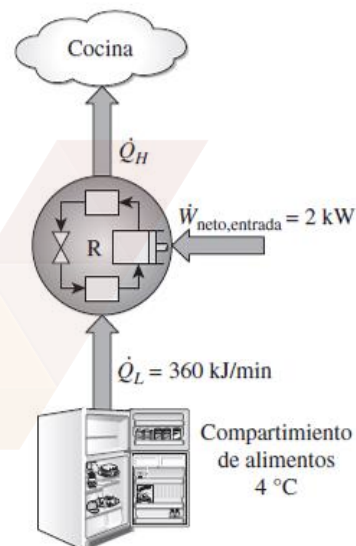
$$\text{COP}_{\text{HP}} = \frac{\text{Salida deseada}}{\text{Entrada requerida}} = \frac{Q_H}{W_{\text{neto, entrada}}}$$



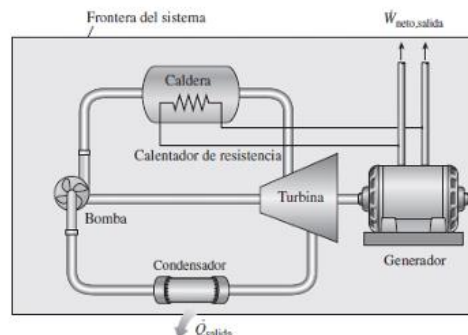
Ejercicio Práctico

Análisis

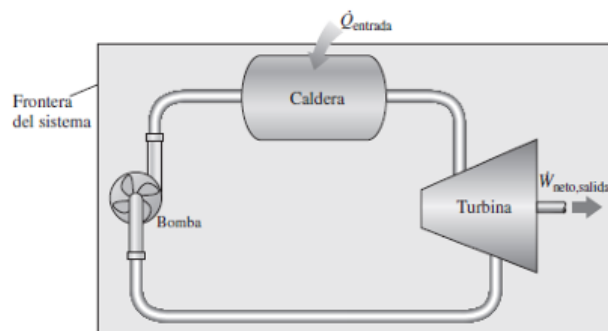
El compartimiento de alimentos de un refrigerador, mostrado en la figura, se mantiene a 4 °C mediante la extracción de calor a una tasa de 360 kJ/min. Si la potencia requerida para operar el refrigerador es de 2 kW, determine: a) el coeficiente de desempeño del refrigerador, y b) la tasa de calor rechazado hacia el ambiente de la habitación donde se encuentra el refrigerador.



- **Máquina de movimiento perpetuo tipo 1 (MMP1)**

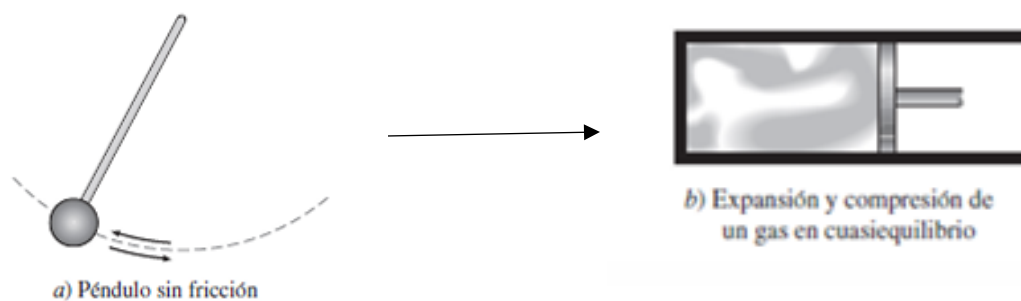


- **Máquinas de movimiento perpetuo 2 (MMP2)**



- **Procesos reversibles**

Proceso que se pueden invertir sin dejar ningún rastro en los alrededores. Regresan a condición inicial sin invertir trabajo/energía.



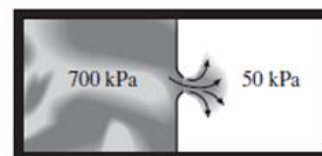
- **Procesos irreversibles**

No regresan a su estado inicial

- Fricción
- Mezclado de dos fluidos
- Transferencia de calor
- Resistencia eléctrica
- Expansión líquida

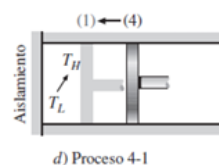
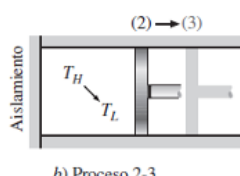
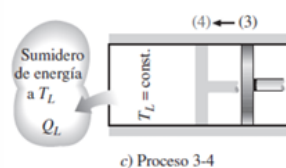
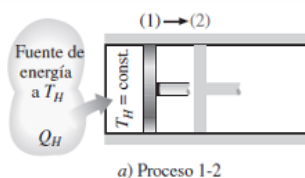


b) Expansión y compresión de un gas en cuasiequilibrio



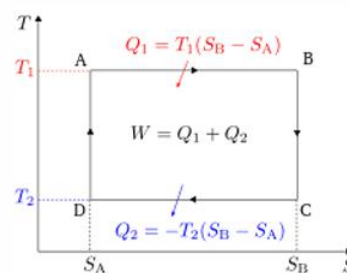
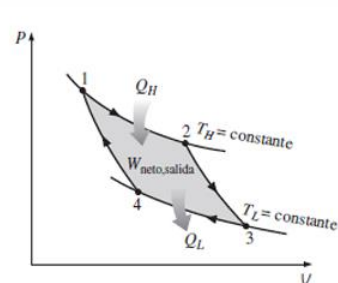
3.3.3 Ciclos de Carnot

- **Ciclos reversibles más completos**

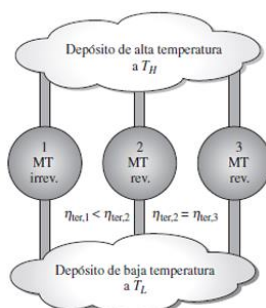


- 1-2 Expansión isotérmica reversible
- 2-3 Expansión adiabática reversible
- 3-4 Compresión isotérmica reversible
- 4-1 Compresión adiabática reversible

- **Ciclos de Carnot**

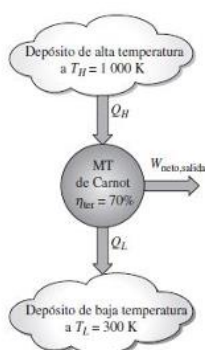


- Principios de Carnot



1. La eficiencia de una máquina irreversible es siempre menor que la eficiencia de una máquina reversible que opera entre los mismo dos depósitos.
2. Las eficiencias de las máquinas térmicas reversibles que operan entre los mismo dos depósitos son las mismas.

- La Máquina Térmica de Carnot – (rendimiento). Temperatura - Escala Kelvin



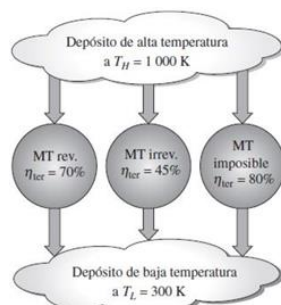
$$\eta_{\text{ter}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}$$

Reversible o irreversible

$$\eta_{\text{ter, rev}} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Máquina térmica reversible
Máquina de Carnot

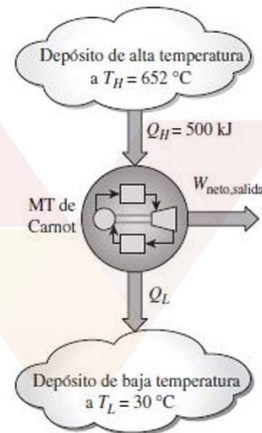
- Eficiencia en Máquinas Térmicas



$$\eta_{\text{ter}} \begin{cases} < \eta_{\text{ter, rev}} & \text{máquina térmica irreversible} \\ = \eta_{\text{ter, rev}} & \text{máquina térmica reversible} \\ > \eta_{\text{ter, rev}} & \text{máquina térmica imposible} \end{cases}$$

Ejercicio Práctico**Análisis**

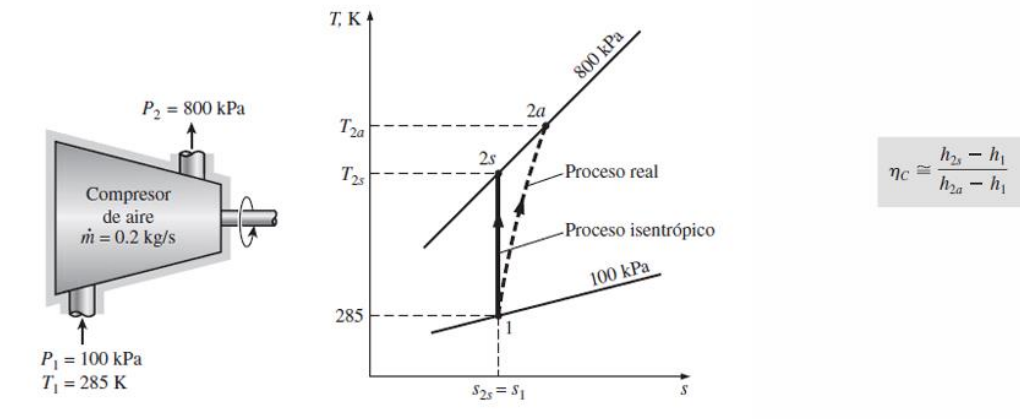
Una máquina térmica de Carnot, como se muestra en la figura, recibe 500 kJ de calor por ciclo desde una fuente de alta temperatura a 652 °C y rechaza calor hacia un sumidero de baja temperatura a 30 °C. Determine: a) la eficiencia térmica de esta máquina de Carnot y b) la cantidad de calor rechazada por ciclo hacia el sumidero.



4.1 Conceptualización a la entropía

- Los procesos solo pueden ocurrir en una dirección.
- La entropía es una propiedad que no se conserva.
- La generación de entropía es una medida de las magnitudes de las irreversibilidades.

- Evaluación de la eficiencia de una máquina (compresor)



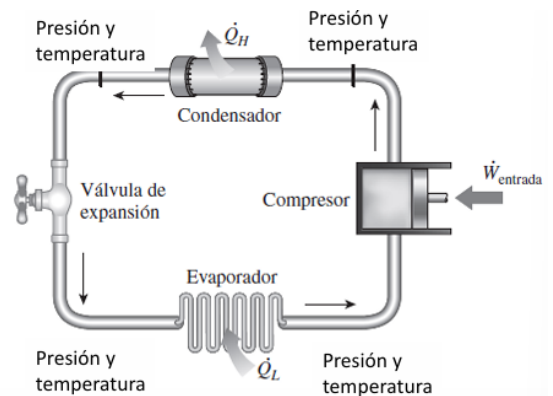
- Sistema de refrigeración (QI)

$$Q_h = m C_p (T_2 - T_1) \text{ Problema}$$

$$Q_l = m C_p (T_2 - T_1) \text{ Problema}$$

$$Q_h = Q_h \text{ refrigerante}$$

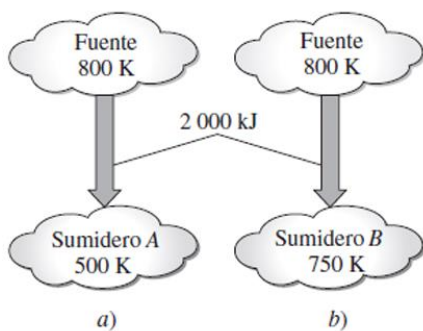
$$Q_l = Q_l \text{ refrigerante}$$



Ejercicio Práctico

Análisis

Una fuente de calor a 800 K pierde 2,000 kJ de calor hacia un sumidero que se encuentra a: a) 500 K y b) 750 K. Determine en cuál de estos casos el proceso de transferencia de calor es más irreversible.



$$\Delta S_{\text{fuente}} = \frac{Q_{\text{fuente}}}{T_{\text{fuente}}} = \frac{-2\,000 \text{ kJ}}{800 \text{ K}} = -2.5 \text{ kJ/K}$$

$$\Delta S_{\text{sumidero}} = \frac{Q_{\text{sumidero}}}{T_{\text{sumidero}}} = \frac{2\,000 \text{ kJ}}{500 \text{ K}} = +4.0 \text{ kJ/K}$$

$$S_{\text{gen}} = \Delta S_{\text{total}} = \Delta S_{\text{fuente}} + \Delta S_{\text{sumidero}} = (-2.5 + 4.0) \text{ kJ/K} = 1.5 \text{ kJ/K}$$

$$\Delta S_{\text{fuente}} = -2.5 \text{ kJ/k}$$

$$\Delta S_{\text{sumidero}} = +2.7 \text{ kJ/K}$$

$$S_{\text{gen}} = \Delta S_{\text{total}} = (-2.5 + 2.7) \text{ kJ/K} = 0.2 \text{ kJ/K}$$

5. Bibliografía

Çengel, Y. y Boles, M. A. (2011). *Termodinámica* (7.ª ed.). McGraw-Hill.

Michigan University. (s.f.). *Curso de termodinámica*.

Van Wylen, G. (1978). *Fundamentos de termodinámica* (2.ª ed.). Wiley.