

# UA: TERMODINÁMICA

## AÑO DE ELABORACIÓN : 2019

Horas teóricas	3.0
Horas prácticas	1.0
Total de horas	4.0
Créditos institucionales	7.0
Título del material	Segunda ley de la Termodinámica (primera parte)
Tipo de unidad de aprendizaje	curso
Carácter de la unidad de aprendizaje	obligatoria
Núcleo de formación	Sustantivo
Programa educativo	Ingeniería Mecánica
Espacio académico	Facultad de Ingeniería
Responsable de la elaboración	Juan Carlos Posadas Basurto

# ÍNDICE

	<b>Página</b>
Presentación	1
Estructura de la unidad de aprendizaje	2
Contenido de la presentación	7
Termodinámica. Segunda ley de la termodinámica (primera parte)	9
Introducción a la segunda ley de la termodinámica	10
Máquinas térmicas	14
Refrigeradores	26
Bombas de calor o térmicas	35
Bibliografía	41

# PRESENTACIÓN

- La unidad de aprendizaje Termodinámica es obligatoria y se sugiere cursarla en el quinto período. No tiene Unidad de Aprendizaje antecedente.
- El propósito de la Unidad de Aprendizaje es que el discente identifique los procesos termodinámicos para su análisis mediante balances de energía utilizando los conceptos, principios y métodos de la termodinámica.
- Es importante que al final del curso el discente sea capaz de analizar ciclos termodinámicos ya que en la Unidad de Aprendizaje consecuente, Ingeniería Térmica, se analizan ciclos de potencia y refrigeración.

# ESTRUCTURA DE LA UNIDAD DE APRENDIZAJE

1. Propiedades de las sustancias puras.
  - 1.1 Definición de sistemas, estado termodinámico, propiedad, proceso, ciclo, sistema simple compresible.
  - 1.2 Sustancia pura y fases.
  - 1.3 Procesos de cambio de fase en sustancias puras.
  - 1.4 Diagramas de propiedades para procesos de cambio de fase.
  - 1.5 Cálculo de propiedades termodinámicas usando tablas.
  - 1.6 Cálculo de propiedades termodinámicas con el modelo de gas ideal.
  - 1.7 Factor de compresibilidad.
  - 1.8 Ecuaciones de Estado .

- 2. Energía y primera ley de la termodinámica.
  - 2.1 Energía de un sistema .
  - 2.2 Energía transferida mediante trabajo de expansión o compresión.
  - 2.3 Energía transferida por calor.
  - 2.4 Energía interna y entalpía.
  - 2.5 Calores específicos a volumen constante y a presión constante
  - 2.6 Balance de masa y el volumen de control.
  - 2.7 Balance de energía para un volumen de control
  - 2.8 Análisis de energía para volúmenes de control en estado estacionario.
  - 2.9 Análisis de varios dispositivos de interés en ingeniería

- 3. Segunda Ley de la termodinámica.
  - 3.1 Introducción a la segunda ley de la termodinámica.
  - 3.2 Máquinas térmicas, refrigeradores y bombas de calor.
  - 3.3 Segunda ley de la termodinámica: enunciado de Clausius.
  - 3.4 Segunda ley de la termodinámica: enunciado de Kelvin-Planck
  - 3.5 Procesos reversibles e irreversibles.
  - 3.6 Corolarios de Carnot.
  - 3.7 Escala Kelvin de temperatura
  - 3.8 Rendimiento y ciclo de Carnot.
  - 3.9. Coeficiente de desempeño, el refrigerador de Carnot y la bomba de calor.

## 4. Entropía.

4.1 Desigualdad de Clausius.

4.2 Principio del incremento de entropía.

4.3 Obtención de valores de entropía en sustancias puras.

4.4 Procesos isoentrópicos.

4.5 Balance de entropía para sistemas cerrados.

4.6 Rendimientos isoentrópicos de turbinas, toberas, compresores y bombas.

4.7. Transferencia de calor y trabajo en procesos de flujo estacionario internamente reversible.

## 5. Exergía.

5.1 Introducción a la exergía.

5.2 Definición de exergía, trabajo reversible e irreversibilidad.

5.3 Eficiencia exergética (segunda ley).

5.4 Cambio de exergía de un sistema.

5.5 Transferencia de exergía por calor, trabajo y masa.

5.6. Balance de exergía en un sistema cerrado



# CONTENIDO DE LA PRESENTACIÓN

- La presentación comprende, del capítulo 3, los incisos 3.1 y 3.2 donde se inicia el estudio de la segunda ley de la termodinámica.
- Se plantea la necesidad de una segunda ley de la termodinámica al analizar que satisfacer la primera ley de la termodinámica no asegura que en realidad el proceso tenga lugar.
- Posteriormente se definen las máquinas térmicas, refrigeradores y bombas de calor.

- También se definen la eficiencia y el coeficiente de operación para las máquinas térmicas y las máquinas térmicas inversas, respectivamente.
- Se proponen ejemplos para el uso de las ecuaciones y relaciones termodinámicas presentadas.
- Al final se incluye un apartado de referencias para que tanto el docente como el discente profundicen en los temas de interés.



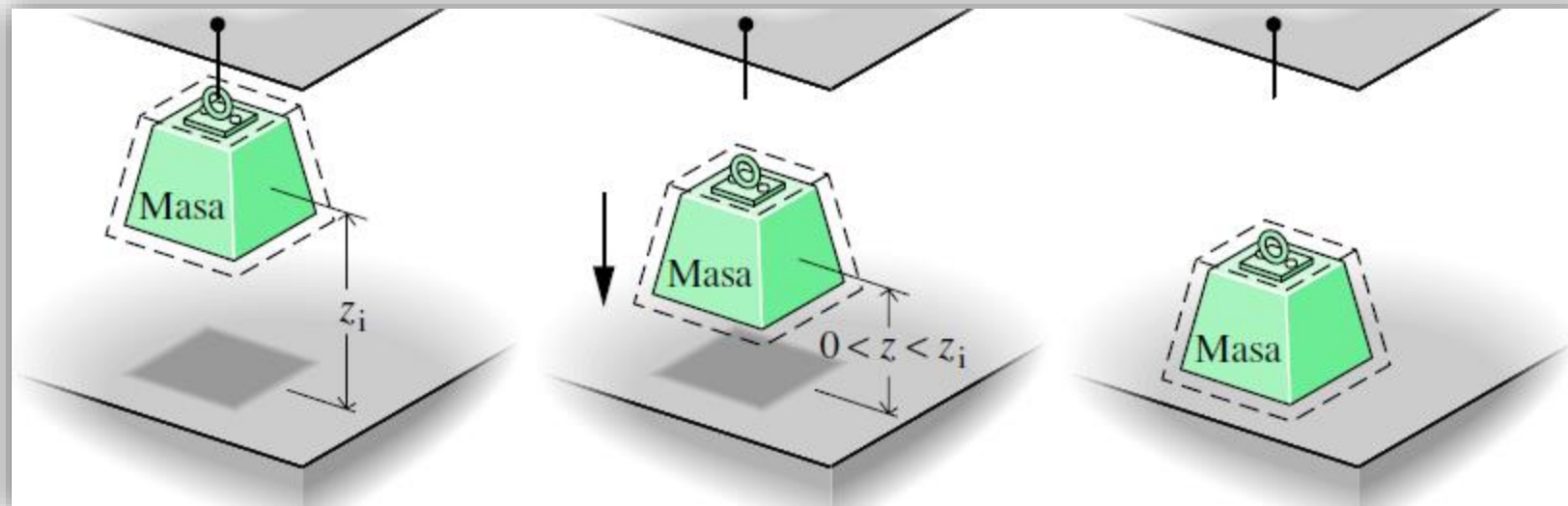
# TERMODINÁMICA

Segunda ley de la Termodinámica (primera parte)

Juan Carlos Posadas Basurto

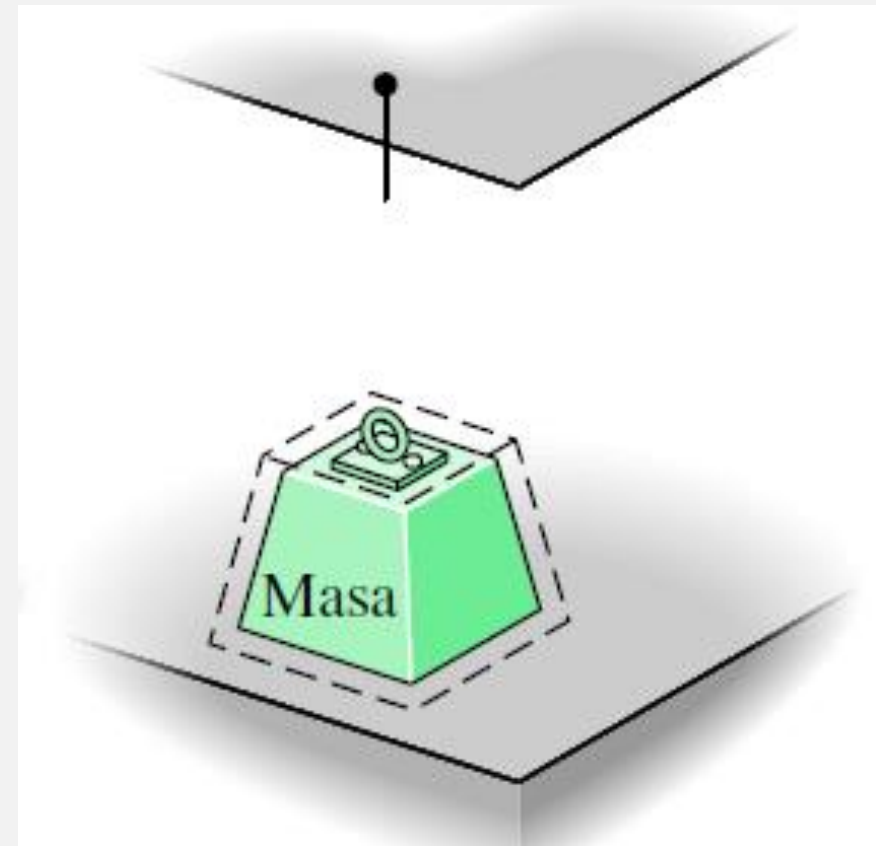
# INTRODUCCIÓN A LA SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

- La primera ley de la Termodinámica no restringe la dirección de un proceso pero satisfacerla no asegura que ocurra (Cengel & Boles, 2014).
- Por ejemplo, una masa suspendida por un cable en la elevación  $Z_i$  cae cuando se libera (Moran & Shapiro, 2008).



(Moran & Shapiro, 2008).

- Cuando alcanza velocidad cero, la energía potencial de la masa en su condición inicial se transforma en un aumento en la energía interna de la masa y sus alrededores, de acuerdo con el principio de conservación de la energía.
- Eventualmente, la masa también alcanzaría la temperatura de los alrededores.



(Moran & Shapiro, 2008).

- El proceso inverso no se llevaría a cabo de manera espontánea, aunque la energía podría conservarse: la masa no volvería espontáneamente a su elevación inicial, a menos que reciba ayuda (suministro de energía), mientras que su energía interna o la de su entorno disminuyeran.
- La primera ley de la Termodinámica se relaciona con la cantidad de energía y la segunda ley, con su calidad (Cengel & Boles, 2014).
- La segunda ley de la Termodinámica establece que siempre que se produce una transferencia de energía, debe conservarse y parte de ella tiene que reducir su nivel (calidad) en forma permanente (Burghardt & Harbach, 1993).

- Moran & Shapiro (2008) afirman que la segunda ley de la Termodinámica proporciona medios para:
  1. predecir la dirección de los procesos,
  2. establecer las condiciones de equilibrio,
  3. determinar las mejores prestaciones teóricas de ciclos, motores y otros dispositivos,
  4. evaluar cuantitativamente los factores que impiden alcanzar en la práctica dicho nivel ideal de prestaciones,
  5. la definición de una escala de temperatura independiente de la sustancia termométrica empleada.
  6. el desarrollo de procedimientos para evaluar propiedades como energía interna ( $u$ ) y entalpía ( $h$ ) en función de otras que pueden obtenerse más fácilmente por vía experimental.

# MÁQUINAS TÉRMICAS

- Un cuerpo hipotético con capacidad de energía térmica relativamente grande, que puede suministrar o absorber cantidades finitas de calor sin experimentar cambio alguno de temperatura, se conoce como depósito de energía térmica o sólo depósito (Cengel & Boles, 2014).
- Un depósito que suministra energía en forma de calor se conoce como fuente (Cengel & Boles, 2014).
- Un depósito que absorbe energía en forma de calor, se llama sumidero (Cengel & Boles, 2014).
- El trabajo se puede convertir en calor de manera directa y por completo pero, convertir el calor en trabajo requiere de dispositivos conocidos como máquinas térmicas (Cengel & Boles, 2014).



- De acuerdo a Cengel & Boles (2014) las máquinas térmicas se caracterizan por:
  - a. Recibir calor de una fuente de temperatura alta.
  - b. Convertir parte del calor recibido en trabajo.
  - c. Rechazar el calor de desecho hacia un sumidero de calor de baja temperatura.
  - d. Operar en un ciclo termodinámico.
- Las máquinas térmicas y otros dispositivos cíclicos, como refrigeradores y bombas de calor, requieren de un fluido hacia o desde el cual se transfiere energía. Este fluido se conoce como fluido de trabajo (Cengel & Boles, 2014).

- La eficiencia o rendimiento  $\eta$  de una máquina térmica se define como

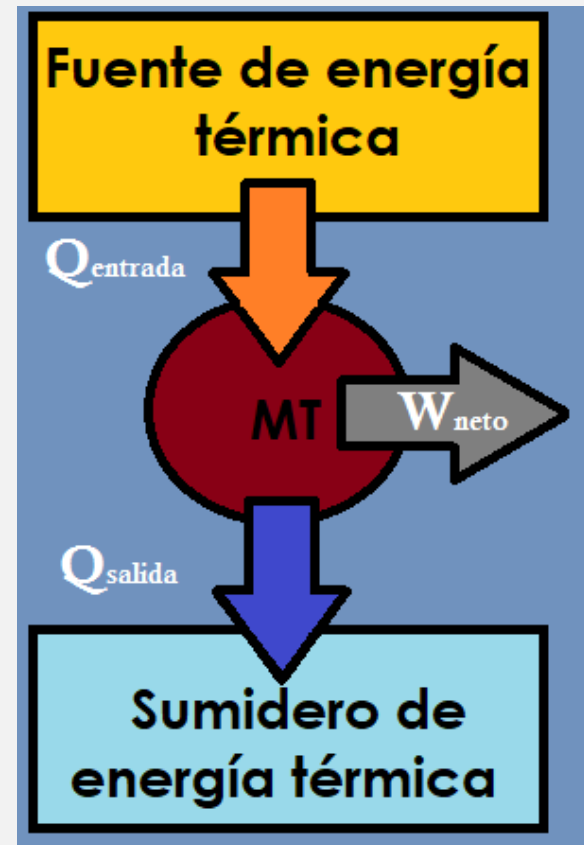
$$\eta = \frac{\text{Energía obtenida}}{\text{Energía suministrada}} \quad (1)$$

$$\eta = \frac{\text{Trabajo neto}}{\text{Calor suministrado}} = \frac{W_{\text{neto}}}{Q_{\text{entrada}}} \quad (2)$$

- Donde

$$W_{\text{neto}} = Q_{\text{entrada}} - |Q_{\text{salida}}| \quad (3)$$

- Ya que siempre habrá un calor residual (de salida) la eficiencia es menor que 1.



# EJEMPLO 1

- La eficiencia térmica de una máquina térmica general es 40 por ciento, y produce 30 hp. ¿A qué tasa se expulsa calor de este motor, en kJ/s?
- Datos:  $\eta=0.4$ ;  $\dot{W} = 30 \text{ hp}$
- Suposiciones: El sistema trabaja de manera permanente y se desprecian pérdidas de calor.
- De la ecuación (2)

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{entrada}} = \frac{\dot{W}_{neta}}{\dot{Q}_{entrada}}$$

- Por lo que

$$\dot{Q}_{entrada} = \frac{\dot{W}_{neta}}{\eta} = \frac{30}{0.4} = 75 \text{ hp} = 75 \text{ hp} \left( \frac{0.7457 \text{ kJ/s}}{1 \text{ hp}} \right) = 55.9 \text{ kJ/s}$$

- La ecuación (3) también se puede escribir en función de tasas de cambio o potencias

$$\dot{W}_{neta} = \dot{Q}_{entrada} - |\dot{Q}_{salida}|$$

- De manera que

$$|\dot{Q}_{salida}| = |\dot{Q}_{transferencia}| = \dot{Q}_{entrada} - \dot{W}_{neta}$$

- Sustituyendo valores se tiene

$$|\dot{Q}_{transferencia}| = 75 - 30 = 45 \text{ hp}$$

$$|\dot{Q}_{transferencia}| = 45 \text{ hp} \left( \frac{0.7457 \text{ kJ/s}}{1 \text{ hp}} \right) = 33.55 \text{ kJ/s}$$

## EJEMPLO 2

- Una planta termoeléctrica con una generación de potencia de 150 MW consume carbón a razón de 60 toneladas/h. Si el poder calorífico del carbón es 30000 kJ/kg, determine la eficiencia total de esta planta.
- Datos:  $\dot{W}_{neta} = 150 \text{ MW}$ ;  $\dot{m} = 60 \text{ toneladas/h}$ ;  $h_{pr} = 30000 \text{ kJ/kg}$ .
- Suposiciones: El sistema trabaja de manera permanente y se desprecian pérdidas de calor. La tonelada métrica equivale a 1000 kg.
- Recordando que el flujo de masa  $\dot{m}$  es el cambio de masa  $m$  respecto al tiempo  $t$ , generalmente en unidades de kg/s.

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = 60 \frac{\text{toneladas}}{\text{h}} \left( \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} \right) \left( \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ tonelada}} \right) = 16.66 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

- El poder calorífico es la cantidad de calor liberado cuando se quema por completo una unidad de combustible y los productos de la combustión se enfrían a la temperatura ambiente (Cengel & Boles, 2014).
- El poder calorífico se representa con las literales  $h_{pr}$ . Es decir, es la entalpía  $h$  obtenida al quemarse el combustible en laboratorio bajo atmósfera controlada a un punto de referencia ( $pr$ ).
- Como el poder calorífico representa la energía liberada del combustible cuando se quema, entonces la tasa de calor suministrado o de entrada es

$$\dot{Q}_{entrada} = \dot{m}h_{pr} \quad (4)$$

$$\dot{Q}_{entrada} = 16.66(30000) = 500000 \text{ kW} = 500 \text{ MW}$$

- De la ecuación (2)

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{entrada}} = \frac{\dot{W}_{neta}}{\dot{Q}_{entrada}}$$

- Por lo que

$$\eta = \frac{150}{500} = 0.3$$

- Al multiplicar por 100 se obtiene el porcentaje

$$\eta = 0.3(100) = 30\%$$

## EJEMPLO 3

- Una planta eléctrica de carbón produce una potencia neta de 300 MW con una eficiencia térmica total de 32 por ciento. La relación real gravimétrica aire-combustible en el horno se calcula que es 12 kg aire/kg de combustible. El poder calorífico del carbón es 28 000 kJ/kg. Determine:
  - a) la cantidad de carbón que se consume durante un periodo de 24 horas,
  - b) la tasa de aire que fluye a través del horno.
- Datos:  $\dot{W}_{neta} = 300 \text{ MW}$ ;  $\eta = 0.32$ ;  $r_{a/c} = 12 \text{ kg}_{\text{aire}}/\text{kg}_{\text{combustible}}$ ;  $h_{pr} = 28000 \text{ kJ}/\text{kg}$ .
- Suposiciones: *El sistema trabaja de manera permanente y se desprecian pérdidas de calor*



a) La cantidad de carbón que se consume durante un periodo de 24 horas es su masa que se quema durante un día.

- Un día convertido en segundos es

$$t = 24 \text{ h} \left( \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} \right) = 86400 \text{ s}$$

- De la ecuación (2)

$$\dot{Q}_{entrada} = \frac{\dot{W}_{neta}}{\eta} = \frac{300}{0.32} = 937.5 \text{ MW} = 937500 \text{ kW}$$

- El flujo de masa  $\dot{m}$  de carbón se obtiene de la ecuación (4)

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_{entrada}}{h_{pr}} = \frac{937500}{28000} = 33.48 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

- Al multiplicarlo por un día se obtiene la cantidad de carbón en kg

$$dm = \dot{m} dt$$

- Para una masa constante

$$m = \dot{m} t = 33.48(86400) = 2892857.14 \text{ kg}$$

b) La tasa de aire que fluye a través del horno

- La relación aire combustible se define como la masa de aire dividida entre la masa del combustible

$$r_{a/c} = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} \left[ \frac{\text{kg}_{aire}}{\text{kg}_{combustible}} \right] \quad (5)$$

- La relación aire combustible también se puede ver en función de flujos de masas

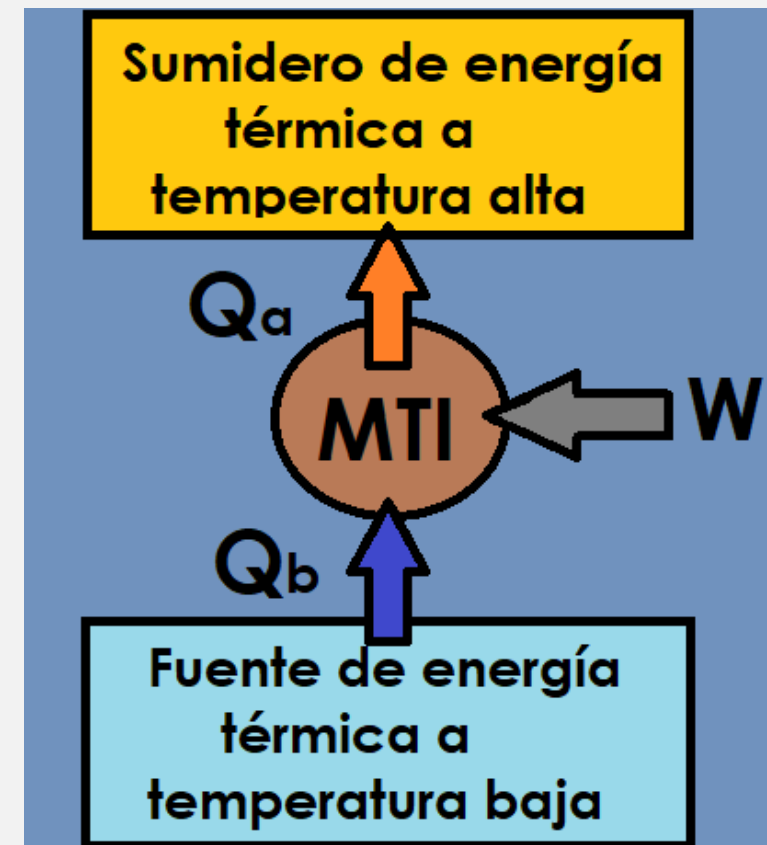
$$r_{a/c} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_c} \left[ \frac{kg_{aire/s}}{kg_{combustible/s}} \right] \quad (6)$$

- Utilizando la ecuación (6) para obtener el flujo de masa de aire se tiene

$$\dot{m}_{aire} = r_{a/c} \dot{m}_c = (12)(33.48) = 401.76 \frac{kg_{aire}}{s}$$

# REFRIGERADORES

- La absorción de calor de un medio que se encuentra a baja temperatura transferido hacia otro de temperatura alta requiere de dispositivos llamados refrigeradores o máquinas térmicas inversas (MTI).
- Su fluido de trabajo se conoce como refrigerante.
- Los refrigeradores cuentan con coeficiente de operación que se define igual que la eficiencia térmica.



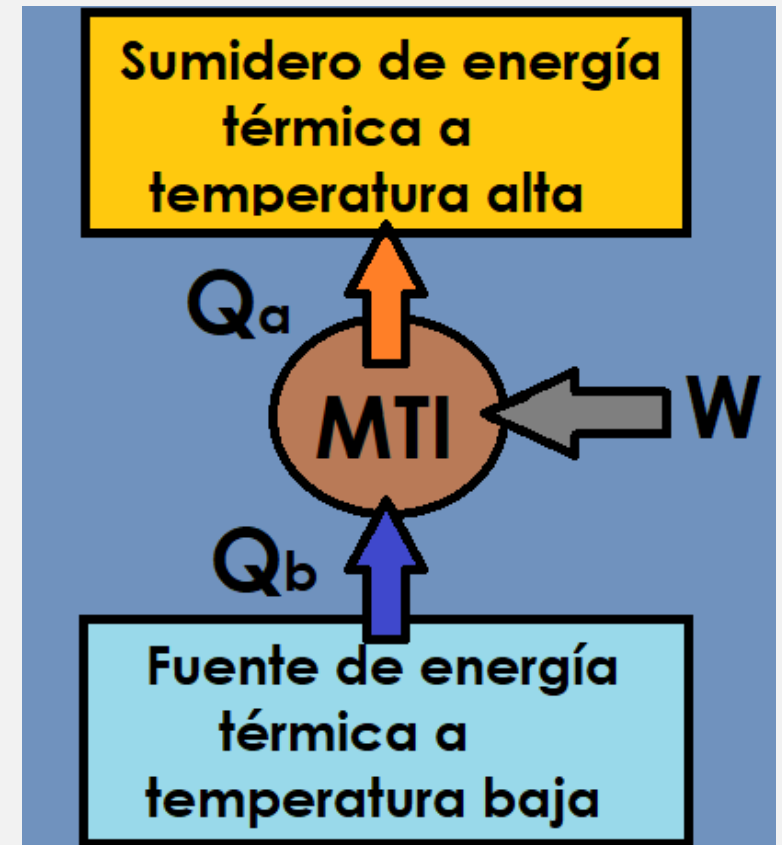
- Coeficiente de operación de refrigeradores

$$COP_R = \frac{\text{Energía obtenida}}{\text{Energía suministrada}} \quad (7)$$

$$COP_R = \frac{\text{Calor absorbido}}{\text{Trabajo neto}} = \frac{Q_b}{|W_{neto}|} \quad (8)$$

$$W_{neto} = Q_b - |Q_a| \quad (9)$$

- El  $COP_R$  siempre será mayor que 1.



## EJEMPLO 4

- Un refrigerador que se usa para enfriar una computadora necesita 3 kW de potencia eléctrica, y tiene un COP de 1.4. Calcule el efecto de enfriamiento de este refrigerador, en kW.
- Datos:  $\dot{W}_{neta} = 3 \text{ kW}$ ; COP = 1.4.
- Suposiciones: El sistema trabaja de manera permanente y se desprecian pérdidas de calor.
- De la ecuación (8)

$$COP_R = \frac{\text{Calor absorbido}}{\text{Trabajo neto}} = \frac{Q_b}{|W_{neta}|} = \frac{\dot{Q}_b}{|\dot{W}_{neta}|}$$

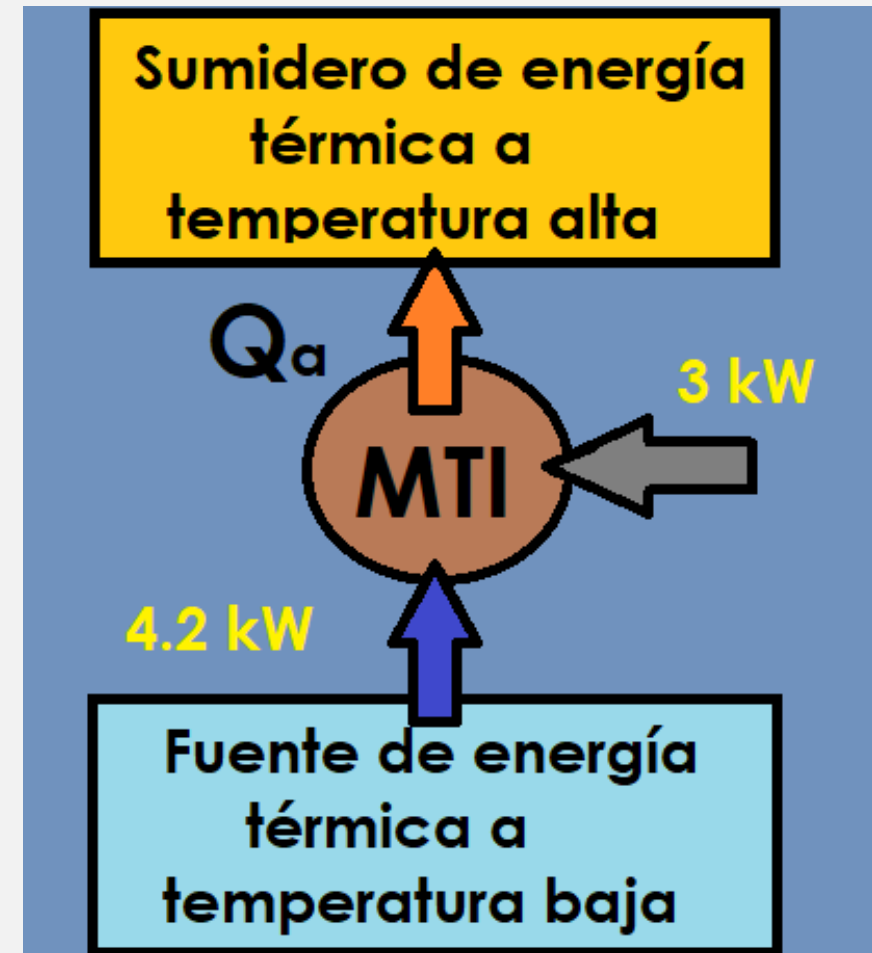
- Donde  $\dot{Q}_b$  es el calor absorbido de la fuente o efecto de enfriamiento

- Despejando  $\dot{Q}_b$  de la ecuación

$$\dot{Q}_b = COP_R \dot{W}_{neta}$$

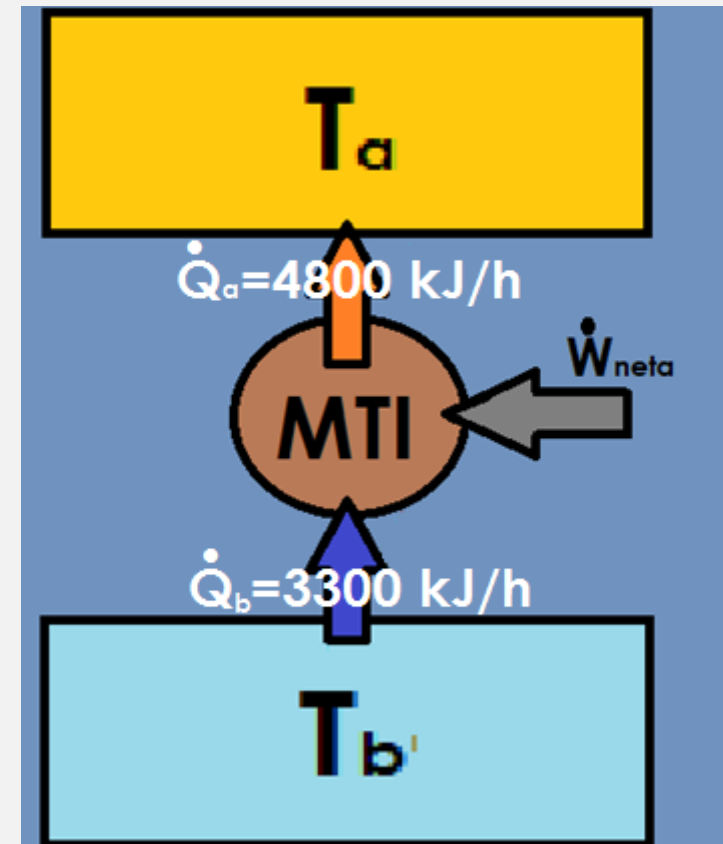
- Sustituyendo los datos

$$\dot{Q}_b = (1.4)(3) = 4.2 \text{ kW}$$



## EJEMPLO 5

- Un almacén de alimentos se mantiene a temperatura baja mediante un refrigerador. La absorción total de calor del almacén se estima en 3 300 kJ/h, y el rechazo de calor de 4 800 kJ/h. Determine
  - a) la entrada de potencia al sistema, en kW, y
  - b) el COP del refrigerador.





- Datos:  $\dot{Q}_b = 3300 \text{ kJ/h}$  ;  $\dot{Q}_a = 4800 \text{ kJ/h}$  .
  - Suposiciones: El sistema trabaja de manera permanente y se desprecian pérdidas de calor.
- a) Entrada de potencia al sistema. La ecuación (9) se puede ver en función de tasas de cambio.

$$\dot{W}_{neta} = \dot{Q}_b - |\dot{Q}_a| = 3300 - 4800 = -1500 \text{ kJ/h}$$

- El signo negativo indica que la potencia mecánica entra al sistema. Se suministra potencia. Se pide el valor en kW.

$$\dot{W}_{neta} = -1500 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \left( \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} \right) \left( \frac{1\text{kW}}{1\frac{\text{kJ}}{\text{s}}} \right) = -0.42 \text{ kW}$$

b) El coeficiente de operación se obtiene de la ecuación (8)

$$COP_R = \frac{\text{Calor absorbido}}{\text{Trabajo neto}} = \frac{Q_b}{|W_{neto}|} = \frac{\dot{Q}_b}{|\dot{W}_{neta}|}$$

- Sustituyendo los valores dados y obtenido se tiene

$$COP_R = \frac{3300}{1500} = 2.2$$

## EJEMPLO 6

- Un refrigerador tiene un COP de 1.5. Es decir, el refrigerador remueve 1.5 kWh de energía del espacio refrigerado por cada kWh de electricidad que consume. ¿Es ésta una violación de la primera ley de la termodinámica? Explique.
- Datos:  $\text{COP} = 1.5$ ;  $\dot{Q}_b = 1.5\dot{W}_{\text{neto}}$  kWh.
- Suposiciones: El sistema trabaja de manera permanente y se desprecian pérdidas de calor.
- La primera ley de la Termodinámica establece que la energía que entra a un sistema es igual a la energía que sale del mismo.

- Haciendo un balance de energía de la MTI se tiene

$$\dot{Q}_b + \dot{W}_{neta} = \dot{Q}_a$$

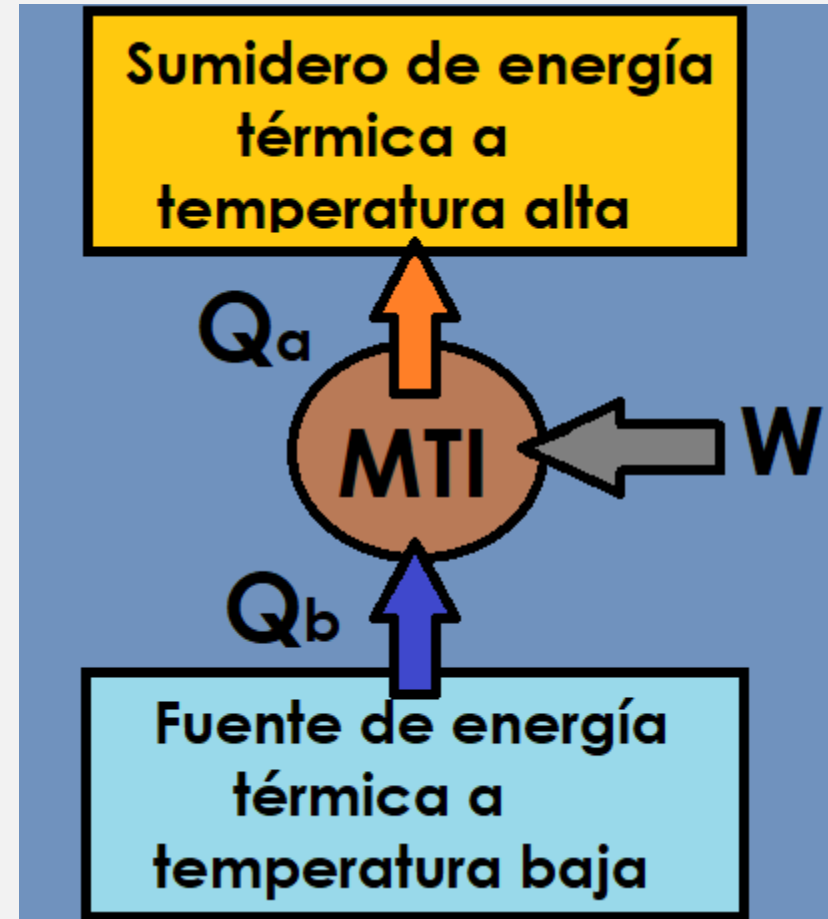
- Sustituyendo las relaciones dadas

$$1.5\dot{W}_{neta} + \dot{W}_{neta} = \dot{Q}_a$$

- De aquí que el calor expulsado al sumidero de temperatura alta debe ser

$$\dot{Q}_a = 4.5\dot{W}_{neta}$$

- La energía se conserva y por lo tanto no viola el primer principio de la termodinámica



# BOMBAS DE CALOR O TÉRMICAS

- La bomba térmica, transfiere calor de un depósito a baja temperatura para suministrarlo hacia otro de temperatura alta.
- El COP de la bomba térmica se define como

$$COP_{BT} = \frac{\text{Energía obtenida}}{\text{Energía suministrada}} = \frac{Q_a}{W_{neto}} \quad (10)$$

$$W_{neto} = Q_b - |Q_a| \quad (11)$$

- El  $COP_{BT}$  siempre será mayor que 1.



## EJEMPLO 7

- Una bomba de calor residencial tiene un coeficiente de desempeño de 2.4. ¿Cuánto efecto de calefacción se obtiene, en Btu/s, cuando se suministran 5 hp de potencia mecánica a esta bomba de calor?
- Datos:  $COP = 2.4$ ;  $\dot{W}_{neto} = 5 \text{ hp}$ .
- Suposiciones: El sistema trabaja de manera permanente y se desprecian pérdidas de calor.
- El efecto de calefacción es el calor expulsado de la MTI. Es decir, se pide el valor de  $\dot{Q}_a$ .
- Para convertir hp a Btu se utiliza la siguiente relación

$$1 \text{ hp} = 2544.5 \text{ Btu/h} = 0.7068 \text{ Btu/s}$$

- De la ecuación (10)  

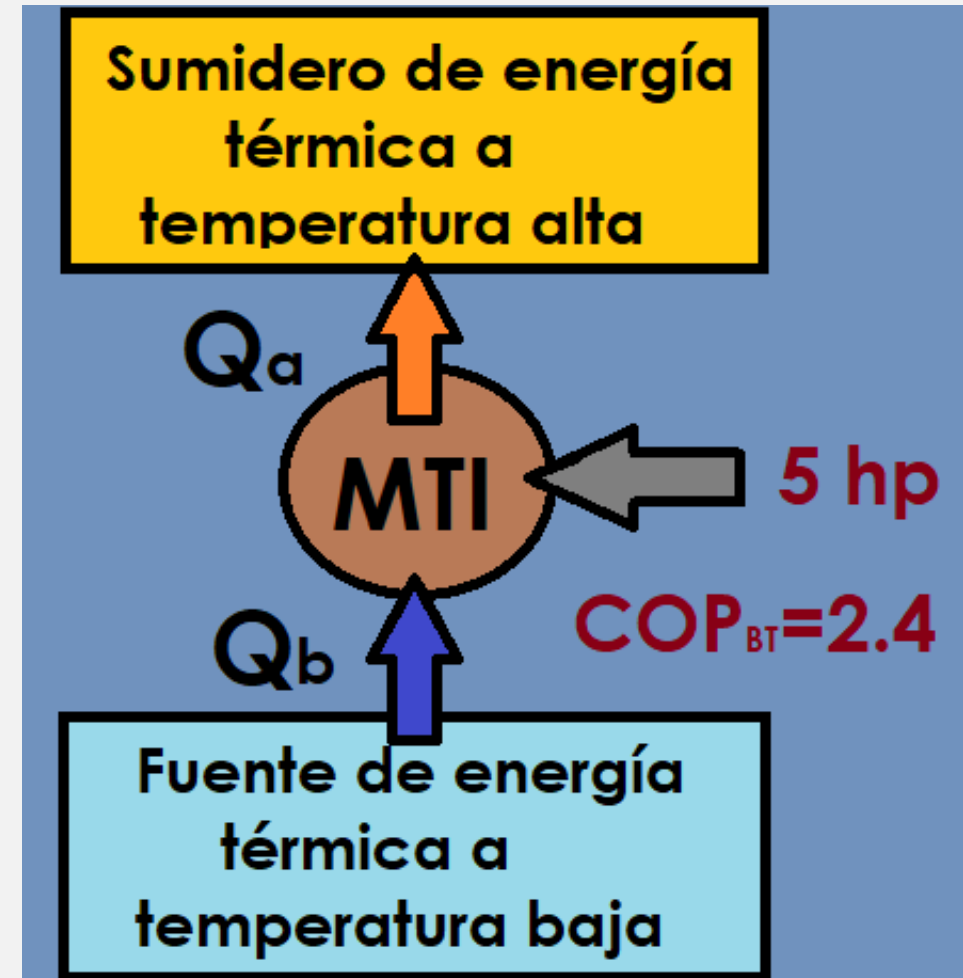
$$\dot{Q}_a = COP_{BT} \dot{W}_{neta}$$
- Sustituyendo valores

$$\dot{Q}_a = 2.4(5) = 12 \text{ hp}$$

- Convirtiendo hp a Btu/s se tiene

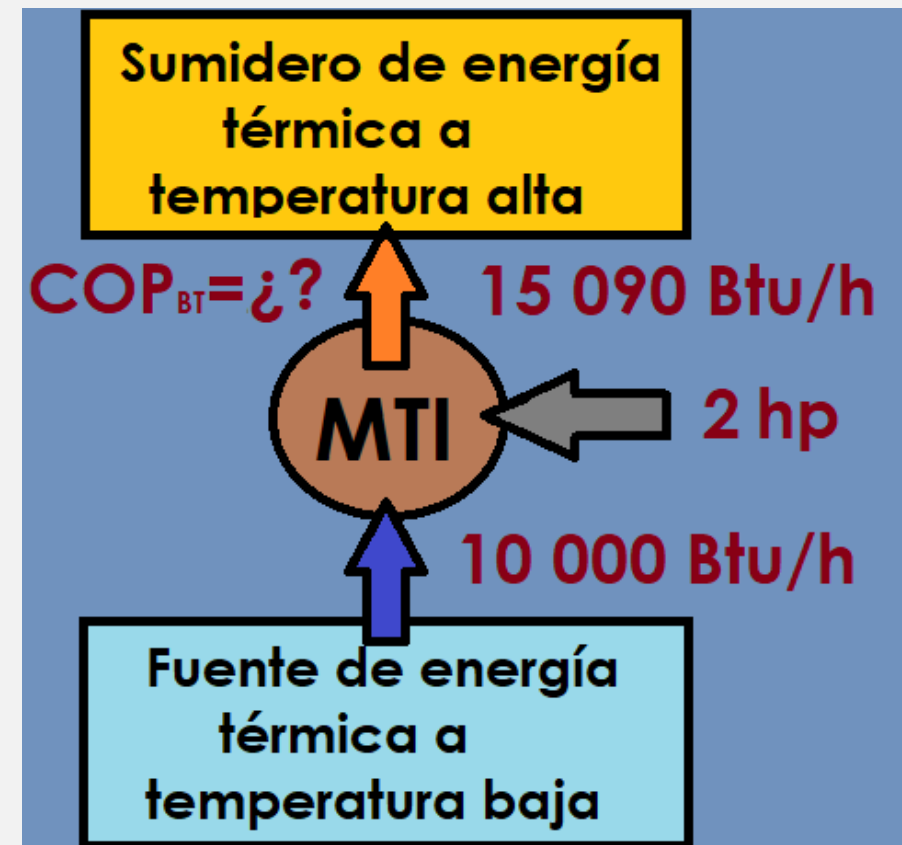
$$\dot{Q}_a = 12 \text{ hp} \left( \frac{0.7068 \text{ Btu/s}}{1 \text{ hp}} \right)$$

$$\dot{Q}_a = 8.5 \frac{\text{Btu}}{\text{s}}$$



## EJEMPLO 8

- Una bomba de calor comercial quita 10 000 Btu/h de la fuente de calor, rechaza 15 090 Btu/h al sumidero térmico y necesita 2 hp de potencia. ¿Cuál es el coeficiente de desempeño de la bomba de calor?
- Datos:  $\dot{Q}_b = 10\,000$  Btu/h,
- $\dot{Q}_a = 15\,090$  Btu/h,  $\dot{W} = 2$  hp
- Suposiciones: El sistema trabaja de manera permanente y se desprecian pérdidas de calor.





- Cambiando las unidades de las tasas de energía térmica (calor absorbido y calor rechazado) se tiene

$$\dot{Q}_b = 10000 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} \left( \frac{1 \text{ hp}}{2544.5 \text{ Btu/h}} \right) = 3.93 \text{ hp}$$

$$\dot{Q}_a = 15090 \frac{\text{Btu}}{\text{h}} \left( \frac{1 \text{ hp}}{2544.5 \text{ Btu/h}} \right) = 5.93 \text{ hp}$$

- La tasa de energía mecánica (potencia mecánica) se obtiene de la ecuación (11)

$$\dot{W}_{neta} = \dot{Q}_b - |\dot{Q}_a| = 3.93 - 5.93 = -2 \text{ hp}$$

- Que es el valor de la potencia mecánica que se da como dato. Por lo tanto los valores son correctos y el COP, según la ecuación (10), es

$$COP_{BT} = \frac{\dot{Q}_a}{\dot{W}_{neta}} = \frac{5.93}{2} = 2.96$$

Una razón para expresar la eficiencia de un refrigerador y bomba térmica con el coeficiente de desempeño es para evitar la rareza de tener eficiencias mayores que la unidad.

# BIBLIOGRAFÍA

- Burghardt, M. D. & Harbach, J. A., 1993. *Engineering Thermodynamics*. New York: HarperCollins College Publishers.
- Cengel, Y. A. & Boles, M. A., 2014. *Termodinámica*. México: McGraw-Hill.
- Moran, M. J. & Shapiro, H. N., 2008. *Fundamentals of engineering thermodynamics*. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc..
- Moran, M. N., Shapiro, H. N., Boettner, D. D. & Bailey, M. B., 2011. *Fundamentals of engineering thermodynamics*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.