



2º de Bachillerato

Tecnología Industrial II

Contenidos

Principios de máquinas: Conceptos termodinámicos, calor y frío

Desde el comienzo de la historia de la humanidad, el hombre ha utilizado combustibles como fuente de energía. Los hombres prehistóricos descubrieron la posibilidad de quemar madera para obtener calor. Mucho más tarde se comenzó a utilizar el carbón y más tarde los derivados del petróleo.

Las primeras máquinas dotadas de motor, como la máquina de vapor de James Watt desarrollada en el siglo XVIII, consumían agua y madera para liberar calor y con él generar movimiento. Posteriormente estas máquinas comenzaron a quemar carbón. En la actualidad prácticamente estamos asistiendo a la desaparición de las últimas locomotoras diesel, sustituidas por en la mayor parte de los casos por locomotoras eléctricas e incluso llegando a las más modernas y futuristas que se desplazan sobre campos magnéticos.

Todos estos motores térmicos utilizan la energía química almacenada en los combustibles y la transforman en energía mecánica. Esta energía mecánica puede tener las más variadas aplicaciones, llegando incluso a poder utilizarse para generar (o más bien transformarse) energía eléctrica.

Según donde y como se realice la combustión, estas máquinas se clasifican en:

Máquinas de combustión externa

El calor desprendido al quemar el combustible se transmite a un fluido intermedio. La energía térmica almacenada en ese fluido intermedio caliente se utiliza para generar movimiento en una turbina o máquina alternativa. Se produce pues un primer proceso de conversión de energía química en energía térmica y a continuación esta energía térmica genera energía cinética. Son sistemas de este tipo las máquinas de vapor, las turbinas de vapor y las turbinas de gas de ciclo cerrado. Ejemplos de este tipo de máquinas se encuentran en los grandes barcos de vapor o las primeras locomotoras de ferrocarril.

Este tipo de sistemas tiene un gran inconveniente. El fluido de trabajo no puede alcanzar temperaturas muy altas, puesto que su calentamiento se lleva a cabo por medio de cambiadores de calor.

Normalmente utilizan carbón como combustible.



Imagen de Nicolás Pérez en [Wikimedia](#). Licencia [CC](#)

Máquinas de combustión interna



Imagen de Blas Rubio en [ITE](#). Licencia [CC](#)

En este tipo de sistemas la combustión se produce en el interior del motor y son los propios gases resultantes de ésta los que transmiten el movimiento a los mecanismos del motor al expandirse. Son máquinas de este tipo son las turbinas de gas, las turbohélices, el motor de un automóvil.

En estos casos se utilizan combustibles líquidos o gaseosos.

En el tema número tres de este bloque estudiaremos de forma detenida los principales tipos de máquinas térmicas que se utilizan en la actualidad. Sin embargo y antes de ello se hace necesario realizar un estudio de los fundamentos físicos en los cuales está basado el funcionamiento de estos sistemas y que se engloban dentro de

una rama de la física más general a la que se conoce como **Termodinámica**.

1. Principios termodinámicos. Definiciones.



En primer lugar es necesario definir una serie de conceptos que serán utilizados a lo largo de este y los próximos temas:

Importante

Sistema: Porción de universo sometida a estudio termodinámico.

Entorno: Porción del universo que no es el sistema.

Energía interna: Energía total que posee el sistema. En los gases ideales, no hay interacciones entre las partículas que lo componen, por lo tanto la energía interna depende exclusivamente de la temperatura del sistema.

Temperatura: Medida macroscópica promedio de la energía cinética que poseen las partículas del sistema.

Un sistema sólo puede intercambiar energía con su entorno de dos formas:

Importante

Trabajo (W): Quedó definido en el tema anterior. En el caso de las máquinas térmicas consideraremos el trabajo de expansión. Este trabajo es la energía intercambiada entre el sistema y su entorno por medio de una variación en el volumen del sistema.

Calor (Q): Flujo de energía entre el sistema y su entorno. Para su transmisión es necesaria una diferencia de temperatura entre ambos. El calor es un flujo de energía desde un cuerpo a temperatura superior a otro cuerpo que está a una temperatura inferior.

Para diferenciar energía que entra o sale al sistema es necesario establecer un convenio de signos, a lo largo de esta unidad se seguirá el siguiente convenio:

Importante

- **Trabajo positivo:** Trabajo hecho por el sistema, comunica energía al entorno.

entorno.

- **Calor positivo:** Calor comunicado al sistema, toma energía del entorno.

- **Calor negativo:** Calor comunicado por el sistema, se aporta energía al entorno.



La termodinámica basa todo su desarrollo en tres principios. Estos principios se toman como ciertos aunque no pueden ser demostrados, se aceptan ya que no se ha encontrado ningún proceso termodinámico que no los cumpla.

En este tema haremos referencia a los dos primeros principios, que constituyen la base sobre la que se desarrollará el campo de los motores térmicos.

Importante

PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA

En toda transformación termodinámica el incremento de energía interna del sistema es igual al calor suministrado menos el trabajo realizado por el mismo.

$$\Delta U = Q - W$$

Por **transformación termodinámica** se entiende cualquier proceso en el que un sistema pasa de un estado inicial a un estado final en el que alguna de las propiedades que sirven para describirlo ha variado.

Un aspecto muy importante a tener en cuenta es que hay propiedades cuyo valor solamente depende del estado en que se encuentra el sistema. Estas propiedades reciben el nombre de **funciones de estado**.

La energía interna es una función de estado. También lo son la presión, la temperatura, el volumen...

Sin embargo el calor y el trabajo no lo son. Esto es así por dos motivos. En primer lugar calor y trabajo no son propiedades del sistema sino que son formas de energía en tránsito. En segundo lugar su valor en una transformación dependerá del camino seguido, tal y como se vio en el tema anterior cuando se presentó el concepto Trabajo.

Las funciones de estado de un sistema en equilibrio estarán relacionadas por medio de las **ecuaciones de estado**. En el caso de los gases ideales, esta ecuación es la ecuación de estado de los gases ideales:

$$PV = nRT$$

Donde P es la presión del sistema, V el volumen, n el número de moles gaseosos contenidos en el sistema, T la temperatura y R la constante de los gases ideales, cuyo valor en unidades SI es 8.314 J/mol.K

Como veremos más adelante las máquinas térmicas funcionan repitiendo ciclos termodinámicos. Un **ciclo termodinámico** es todo proceso en el que un sistema parte de un estado inicial, sufre una serie

de transformaciones termodinámicas tras las cuales llega a un estado final igual al inicial. Según esto y dado que la energía interna es una función de estado, en todo ciclo termodinámico se cumplirán:

$$\Delta U = 0 \Rightarrow W = Q$$

Es decir la energía interna no variará y el calor neto comunicado al sistema será igual al trabajo realizado por el mismo.

Importante

SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINAMICA

La transformación íntegra en un proceso termodinámico de calor en trabajo o viceversa es imposible.

Es decir es imposible construir un dispositivo que en que todo el trabajo se transforme en calor extraído o comunicado, siempre habrá una parte que se pierda.

Curiosidad

Históricamente se pensaba que calor y energía eran dos tipos de magnitudes diferentes, por ello se medían en unidades distintas.

La unidad de calor era la caloría. (Una caloría es la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de un gramo de agua destilada desde 14,5°C a 15,5°C.)

En un primer momento se pensaba que el calor era un fluido (denominado calórico) que impregnaba los cuerpos y era responsable del calor que se trasegaba entre ellos cuando se ponían en contacto.

Por medio de un experimento Joule demostró que el calor es una forma de energía, que era posible obtener a partir de energía mecánica.

Joule trató de demostrar que era posible aumentar la temperatura del agua transfiriéndole energía mecánica. Para lo que construyó una máquina parecida a la representada en la figura. Dentro de un recipiente se introduce 1 kg de agua a 14,5°C, en el interior se sitúa un eje solidario a unas aspas, conectadas a una masa, por medio de una cuerda, que tiende a caer por gravedad, al descender ésta a una velocidad constante, las aspas giran debido a la energía potencial de la masa. El giro de las aspas se convertía en calor, aumentando la temperatura del agua.

Tras este experimento Joule comprobó que para conseguir elevar la temperatura del agua 1°C, es decir para conseguir una energía de 1000 calorías, debía disminuir, la energía potencial de la masa en 4180 Julios. Por lo que dedujo que la equivalencia entre las unidades de calor y energía es:

4180 J = 1000 cal = 1 Kcal, es decir 1 cal = 4,18 J, o bien, 1 J = 0,24 cal.

2. Motor térmico

Importante

Motor térmico:

Máquina cíclica que recibe calor Q_1 de un foco caliente a T_1 . Parte de ese calor es transformada en trabajo W mientras que el resto del calor, Q_2 , se cede a un foco frío a una temperatura menor T_2 .

Es decir, un motor termico es una máquina que toma calor y lo transforma en trabajo útil. Sin embargo, y según dice el segundo principio de la termodinámica, no es posible realizar una conversión íntegra de calor en trabajo. Esa energía no transformada en trabajo se cede en forma de calor a un foco frío.

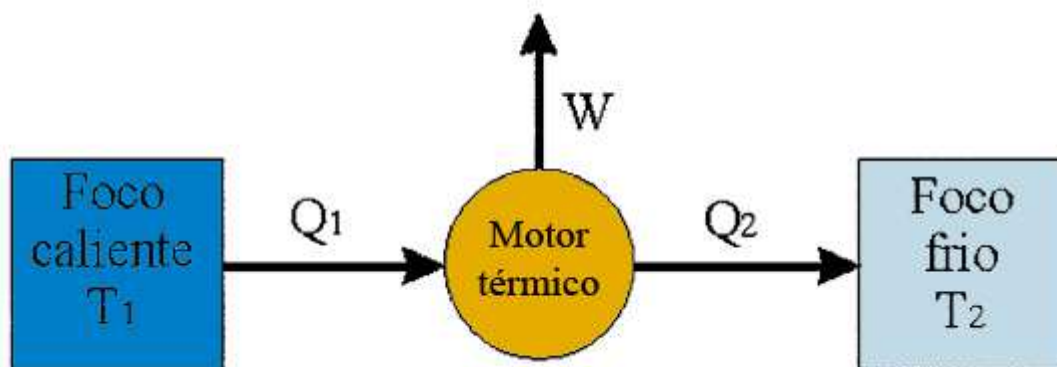


Imagen de elaboración propia

Puesto que el proceso es cíclico, no hay incremento de energía interna. Por lo tanto:

$$\Delta U = 0$$

Como ya hemos dicho anteriormente, según el 2º principio de la termodinámica, Q_2 nunca puede ser cero. Por lo tanto:

$$\Delta U = -W + Q_1 - Q_2 \Rightarrow 0 = -W + Q_1 - Q_2 \Rightarrow W = Q_1 - Q_2$$

Siendo el rendimiento del proceso:

$$\eta = \frac{W}{Q} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \Rightarrow < 1$$

Es decir el rendimiento de este tipo de máquina siempre será menor a la unidad.

Ejercicio resuelto

Una máquina térmica absorbe un 360 J de calor mientras realiza un trabajo de 25 J durante cada ciclo.

Determinar: a) Eficiencia que presenta la máquina. b) Calor liberado cedido durante cada ciclo.

Mostrar retroalimentación

Solución

Una máquina térmica que presenta una eficiencia del 30%, realiza un trabajo de 200 J. durante cada ciclo.

Determina:

- a) ¿Que cantidad de calor absorbe durante el ciclo?
- b) ¿Qué cantidad de calor libera?

Mostrar retroalimentación

Solución

Una máquina térmica de 5 Kw de potencia, con una eficiencia del 25%, se sabe que cede 8 KJ de calor durante cada ciclo.

Determina:

- a) Calor que absorbe durante cada ciclo.
- b) Tiempo que dura cada ciclo.

Mostrar retroalimentación

Solución

Una máquina térmica absorbe del foco caliente 1500 J, y cede al foco frío 800J.

Determina:

- a) Eficiencia de la máquina.
- b) Trabajo producido durante un ciclo.
- c) Potencia de la máquina térmica, si la duración de cada ciclo es de 0,2s.

Mostrar retroalimentación

Solución

3. Máquina frigorífica

Importante

Máquina frigorífica

En este tipo de sistemas se realiza un trabajo W sobre la máquina. Gracias a ese trabajo se consigue extraer un calor Q_2 de un foco frío a una temperatura T_2 .

La conversión no puede ser completa por lo que además se cede un calor Q_1 a un foco caliente a T_1 mayor que T_2 .

La imposibilidad de transformar integramente el trabajo en calor extraído es una consecuencia directa del segundo principio de termodinámica.

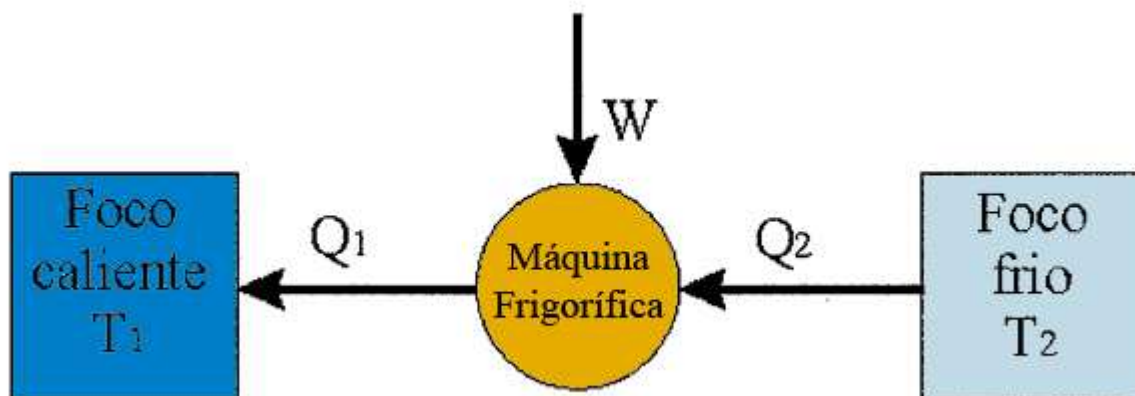


Imagen de elaboración propia

Al igual que ocurría en el caso del motor, se trata de un proceso cíclico, por lo tanto no hay incremento de energía interna:

$$\Delta U = 0$$

Como ya hemos dicho anteriormente, según el 2º principio de la termodinámica, Q_1 nunca puede ser cero. Por lo tanto:

$$\Delta U = -(-W) - Q_1 + Q_2 \Rightarrow 0 = W - Q_1 + Q_2 \Rightarrow W = Q_1 - Q_2$$

Al ser $W > 0$, necesariamente el calor cedido al foco caliente es mayor que el calor extraído del foco frío.

Para determinar el rendimiento de una máquina frigorífica se utiliza el **coeficiente de operación frigorífico**. Este parámetro se obtiene como cociente entre el calor extraído del foco frío y el trabajo consumido para conseguirlo.

$$\epsilon_{FRIG} = \frac{Q_2}{W}$$

Sustituyendo:

$$\epsilon_{FRIG} = \frac{Q_1}{Q_2 - Q_1}$$

La eficiencia térmica en una máquina frigorífica es un concepto equiparable al del rendimiento en un motor térmico, pero con la salvedad de que la eficiencia puede ser mayor que uno y el rendimiento nunca puede ser mayor que uno.

Ejercicio resuelto

Un frigorífico con un COP de 5, absorbe 120J de calor de una fuente fría durante cada ciclo.

Determina: a) Trabajo realizado durante cada ciclo. b) Calor cedido a la fuente caliente.

Mostrar retroalimentación

[Solución](#)

Un frigorífico absorbe 100 J del foco frío durante cada ciclo, cediendo 130 J al foco caliente.

Determinar:

- a) La potencia que debe tener el compresor si se realizan 60 ciclos por segundo durante el proceso de refrigeración.
- b) COP del frigorífico.

Mostrar retroalimentación

[Solución](#)

Importante

Bomba de calor:

En este tipo de sistemas se realiza un trabajo sobre la máquina. Gracias a este trabajo se consigue comunicar un calor Q_1 a un foco caliente a T_1 .

La conversión se completa con un calor Q_2 retirado de un foco frío a T_2 menor que T_1 .

El esquema de este tipo de máquinas será igual que el de las máquinas frigoríficas. Sin embargo la finalidad es distinta. En el caso de las máquinas frigoríficas el objetivo es retirar calor de un foco frío interior (disminuir su temperatura) y como consecuencia se transmite calor al entorno. En el caso de las bombas de calor el objetivo es suministrar calor a un foco caliente interior (aumentar su temperatura), para ello será necesario retirar calor de un foco frío que es el entorno de la máquina.

Curiosidad

En este tipo de máquinas es necesario aportar trabajo externo al ciclo para conseguir que la transferencia de calor se produzca de la fuente más fría a la más caliente, contra la tendencia natural de los procesos térmicos que tratan de transmitir calor desde los focos calientes a los focos fríos.

Este proceso de transferencia de energía calorífica se realiza mediante un sistema de refrigeración por compresión de gases refrigerantes, empleando una válvula inversora de ciclo, que permite invertir el sentido del flujo de refrigeración, haciendo que el condensador actúe de evaporador y viceversa.

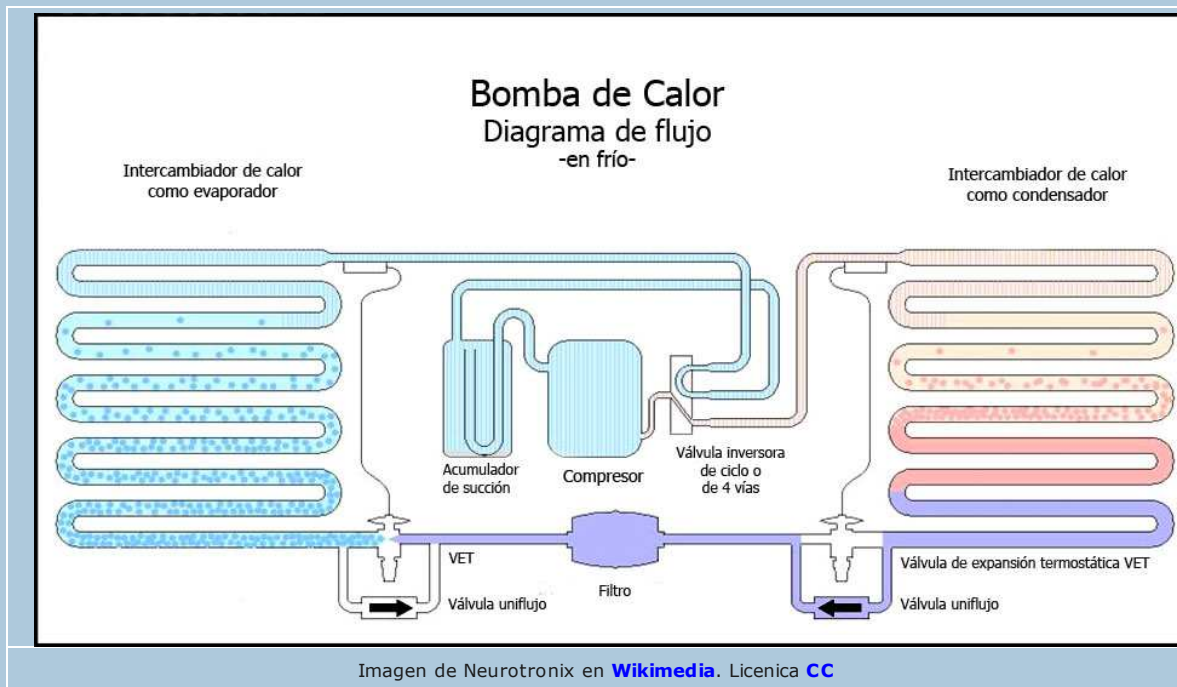
La bomba de calor de refrigeración por compresión de vapor (es la empleada con mayor frecuencia) utiliza un fluido refrigerante de bajo punto de ebullición, que necesita energía para evaporarse (calor latente), extrayendo esta energía de su entorno en forma de calor, con lo que provoca la refrigeración de éste.

El fluido refrigerante a baja temperatura y en estado gaseoso, procedente del evaporador (foco frío), consume energía mecánica de un compresor para que el fluido refrigerante adquiera la presión necesaria, de forma que el calor absorbido por el fluido refrigerante en el evaporador se disipa en el condensador (foco caliente), cuando el fluido se licúa.

El ciclo continúa, cuando el fluido atraviesa un expansor, que es una válvula (orificio capilar) de modo que el fluido condensado a alta presión, que sale relativamente frío del

El fluido evaporado, regresa al compresor, cerrándose el ciclo.

La válvula inversora de ciclo o válvula inversora de cuatro vías se sitúa a la salida del compresor y, según las necesidades térmicas del ambiente a climatizar selecciona un sentido u otro de circulación del fluido refrigerante.



La bomba de calor se emplea en sistemas de climatización, y en sistemas domésticos de aire acondicionado, ya que el ciclo reversible que presenta proporciona la opción tanto de extraer (enfriar) como de introducir (calentar) energía calorífica al medio, con un único equipo. Gracias a la versatilidad de este proceso, se pueden utilizar bombas de calor tanto para climatizar una piscina, como para controlar el ambiente de un invernadero.

Tal y como hemos dicho el principio de funcionamiento es el de un aparato frigorífico. Un refrigerador consigue enfriar un recinto ya que capta energía calorífica del ambiente interior, a baja temperatura, y la cede al exterior, a mayor temperatura, calentándolo.

Invertiendo este funcionamiento, enfriando el aire exterior y calentando el interior, obtenemos una bomba de calor. Por este motivo estos aparatos son reversibles actuando como refrigerantes en verano y como calefactores en invierno.

Rendimiento de una bomba de calor

La cantidad de calor que se trasiega depende de la diferencia de temperatura entre los focos caliente y frío. Cuanto mayor sea ésta diferencia, menor será el rendimiento del proceso.

Las bombas térmicas presentan un rendimiento, denominado COP (coefficient of performance, coeficiente de operación) que es adimensional y mayor que la unidad. Al igual que ocurría en las máquinas frigoríficas esto puede parecer una contradicción respecto a lo que siempre hemos estudiado acerca del rendimiento, sin embargo no lo es. El hecho de que el rendimiento sea mayor a la unidad es debido a que en realidad se está transfiriendo calor usando energía, en vez de producir calor como el que se obtiene por efecto Joule en las resistencias eléctricas.

En las bombas de calor se cumple que el calor transmitido al foco caliente es la suma del calor extraído del foco frío, más la energía que absorbe el compresor durante el proceso.

$$Q_C = Q_F + W$$

Dependiendo de la función que desempeñe la bomba de calor, hay dos expresiones para calcular el COP. Como **refrigerador** para enfriar un ambiente, el efecto útil es el calor extraído del foco frío.

$$COP = \frac{Q_F}{W}$$

El objetivo de un refrigerador es extraer la mayor cantidad posible de calor de un foco frío empleando la menor cantidad de trabajo posible.

Como **calefactor**, para caldear un ambiente, el efecto útil es el calor introducido en el foco caliente:

$$COP = \frac{Q_C}{W} = \frac{Q_F + W}{W}$$

Según la diferencia de temperatura entre los focos frío y caliente el valor del COP oscila entre dos y seis.

Curiosidad

Las bombas de calor se suelen clasificar según el medio de origen y destino de la energía, de modo que se denominan mediante dos palabras. La primera corresponde al medio que absorbe calor (foco frío) y la segunda al medio receptor (foco caliente). A continuación se describen algunos de estos tipos.

- **Bomba de calor aire-aire:** Son las más utilizadas, principalmente en climatización.
- **Bomba de calor aire-agua:** Empleadas para producir agua fría para refrigeración o agua caliente para calefacción y agua sanitaria.
- **Bomba de calor agua-agua:** Permiten aprovechar la energía contenida en el agua de los ríos, mares, aguas residuales, etc.

Ejercicio resuelto

Una oficina de proyectos técnicos se ha comprometido a diseñar un equipo que mantendrá una temperatura de 22°C en un edificio que presenta unas pérdidas de calor de 8 kw, para lo que extraerá el calor de las aguas de un embalse próximo que se mantiene a una temperatura de 2°C, empleando para ello una bomba de calor que tiene un consumo de 0,5 kw.

Mostrar retroalimentación

Solución

Importante

Tal y como hemos definido en el punto 1, entenderemos por **transformación termodinámica** cualquier proceso en el que un sistema pase de un estado inicial a un estado final en el que el valor de alguna de las propiedades que sirven para describirlo ha variado.

Recuerda también que la descripción de los sistemas se realiza por medio de las funciones de estado, las cuales a su vez están relacionada por medio de las **ecuaciones de estado**.

En este punto estudiaremos transformaciones termodinámicas que actúan sobre los llamados gases perfectos.

Un gas perfecto es aquel cuyo ecuación de estado tiene la forma:

$$PV = nRT$$

Donde:

- P es la presión del sistema (Pa)
- V el volumen (m^3)
- n el número de moles gaseosos contenidos en el sistema
- T la temperatura (K)
- R la constante de los gases perfectos, cuyo valor en las unidades anteriores es $0,082 \text{ Pa}\cdot m^3/\text{K}\cdot\text{mol}$ (en unidades SI es $8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$)

Estudiaremos ahora una por una las transformaciones termodinámicas más importantes.

Importante

Transformación isócara. Transformación termodinámica que tiene lugar a volumen constante.

Un ejemplo de este tipo de transformaciones sería el proceso de calentamiento de los gases contenidos en un recipiente rígido y herméticamente cerrado.

Por ser constante el volumen, el trabajo en estos procesos es cero.

En este tipo de transformaciones se mantiene constante el volumen, pero además hay que tener en cuenta que:

- Si no hay reacción química también se mantiene constante el número de moles.
- Por otro lado R es una constante.

Por lo tanto puedo despejar en la ecuación de los gases perfectos y obtener:

$$\frac{P}{T} = nVR = cte$$

Si consideramos un instante inicial 1 y un instante final 2:

$$\frac{P_A}{T_A} = \frac{P_B}{T_B}$$

Ordenando términos:

$$\frac{T_A}{T_B} = \frac{P_A}{P_B}$$

Además también tenemos que:

$$W = 0$$

$$Q = n \cdot c_v (T_B - T_A)$$

Donde c_v es el calor específico a volumen constante.

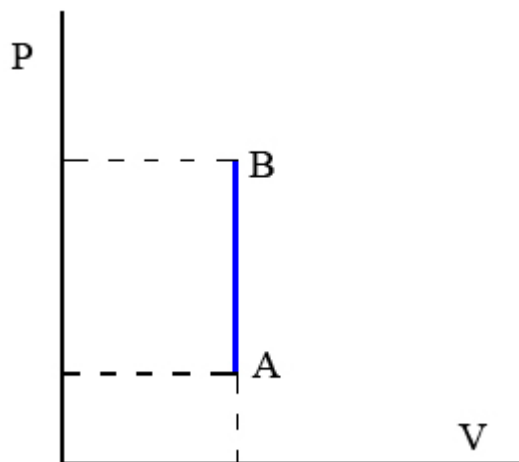


Imagen de elaboración propia

Importante

Transformaciones isóbara: Transformación termodinámica realizada a presión constante.

Un ejemplo de este tipo de transformaciones sería el proceso de calentamiento de los gases contenidos en un globo herméticamente cerrado.

De forma análoga a la seguida en las transformaciones isobáricas llegaríamos a:

$$\frac{T_B}{T_A} = \frac{V_B}{V_A}$$

Además tenemos que:

$$W = P(V_B - V_A)$$

$$Q = n \cdot c_p (T_B - T_A)$$

Donde c_p es el calor específico a presión constante.

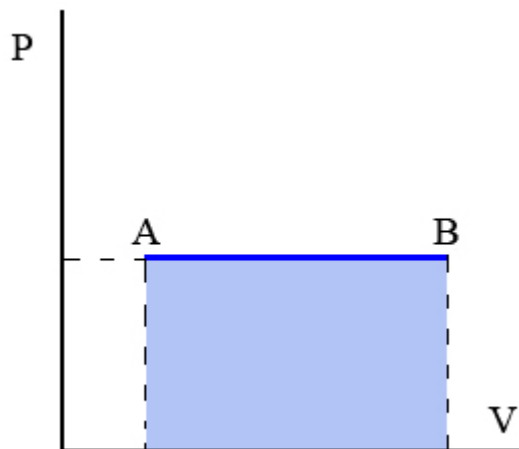


Imagen de elaboración propia

Importante

Transformación isoterma: Transformación termodinámica realizada a temperatura constante.

La compresión o expansión de un gas ideal en contacto permanente con un termostato es un ejemplo de proceso isoterma, puede llevarse a cabo colocando el gas en contacto térmico con otro sistema de capacidad calorífica muy grande y a la misma temperatura que el gas.

En el diagrama p-v se obtiene una hipérbola como en la figura. Por ello podemos escribir:

$$P_A \cdot V_A = P_B \cdot V_B$$

Además tenemos que el trabajo es el área bajo la curva:

$$W = \int_A^B p \cdot dV$$

Por otro lado en los gases perfectos la energía interna sólo es función de la temperatura. Al ser esta constante en los procesos isotérmicos se obtiene:

$$\Delta U = 0 \Rightarrow Q = W$$

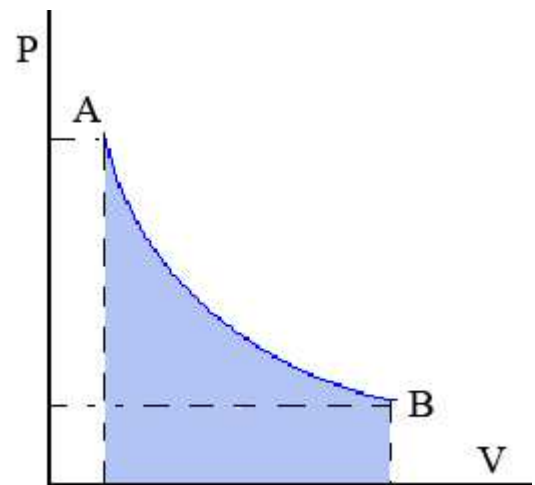


Imagen de elaboración propia

Importante

Transformación adiabática: Es la que tiene lugar sin intercambio de calor.

Un ejemplo de transformación de este tipo sería la compresión de un gas contenido en un cilindro en la que se varía el volumen a través de un émbolo, estando el sistema cerrado y aislado térmicamente del exterior.

En este tipo de transformaciones el diagrama p-V toma la forma de una hipérbola como en la figura. La ecuación que describe estos procesos es:

$$P_A \cdot V_A^\gamma = P_B \cdot V_B^\gamma$$

Donde γ es el coeficiente adiabático del gas (en el caso del aire $\gamma=1,4$).

Además tenemos que:

$$W = \int_A^B p \cdot dV$$

Por otro lado como $Q=0$

$$W = -\Delta U = -n \cdot c_v (T_B - T_A)$$

Donde c_v es el calor específico a volumen constante.

La transformación adiabática siempre presenta mayor pendiente que la isoterma.

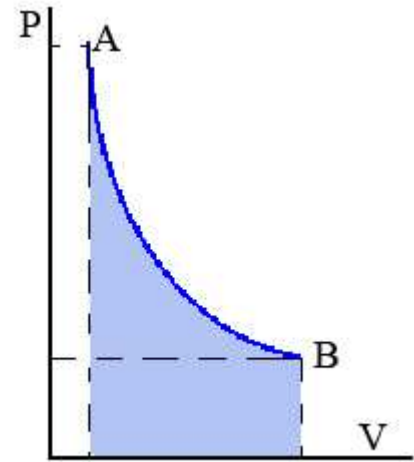


Imagen de elaboración propia

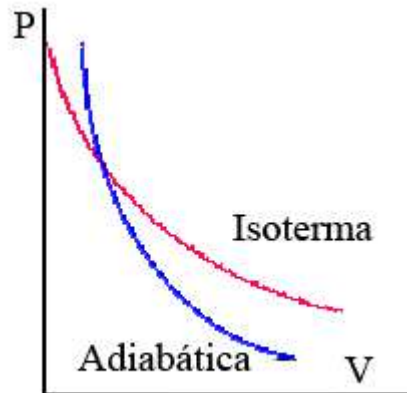


Imagen de elaboración propia

Reflexiona

De forma similar a como se ha hecho en las transformaciones isocoras obtén la expresión que rige las transformaciones isobaras e isotermas.

Mostrar retroalimentación

Debes tomar como punto de partida la ecuación de los gases perfectos y considerar en cada caso que funciones de estado permanecen invariables.

Ejercicio resuelto

En una transformación termodinámica se comprime un gas isobáricamente a una presión de 0,8 atm desde un volumen de 9 dm³ hasta 2dm³, mientras transcurre el proceso el gas cede al ambiente una energía calorífica de 400j.

Determinar: Trabajo que realiza el gas durante la transformación y el incremento de energía interna que experimenta el gas.

Mostrar retroalimentación

Solución

Una cantidad de gas ideal constituida por cinco moles, sufren una transformación por la que se expanden a temperatura constante de 127°C, hasta que ocupan un volumen cuatro veces mayor que el inicial.

Determinar: el trabajo realizado por el gas durante el proceso y el calor total cedido al sistema.

Mostrar retroalimentación

Solución

Dos moles de un gas ideal que se encuentra a 27°C y 0,4 atm., se comprimen isotérmicamente hasta alcanzar una presión de 1,2 atm.

Determinar: El volumen final del gas. El trabajo realizado por el gas durante el proceso, y el calor que se transfiere.

Mostrar retroalimentación

Solución

Un gas ideal que se encuentra a 27°C se expande isobáricamente hasta alcanzar 2,5 kPa, durante el proceso su volumen aumenta de 1 m³ a 3 m³, se aportan al sistema 12,5 KJ de calor para realizar el proceso.

Determine: La modificación de energía interna del gas, y su temperatura el final del proceso.

Mostrar retroalimentación

Solución

6. Ciclos termodinámicos

Entenderemos por Ciclo termodinámico cualquier proceso en que un sistema partiendo de un estado inicial, sufre una serie de transformaciones termodinámicas tras las cuales llega a un estado final que es igual al inicial.

En un ciclo termodinámico $\Delta U=0$, o lo que es igual $W=Q$. Es decir el calor neto comunicado al sistema es igual al trabajo neto realizado por el mismo.

Este funcionamiento cíclico es la idea de partida de cualquier máquina térmica. Veremos a continuación los cuatro ciclos termodinámicos más importantes.



Imagen de Materialschemist en [Wikimedia](#). Dominio público

Ejercicio resuelto

Un fluido gaseoso sufre un proceso cíclico, siguiendo el camino ABCA como el indicado en la figura adjunta.

Determine el calor neto transferido durante el ciclo completo al sistema.

Si se invierte el sentido de circulación del ciclo, es decir las transformaciones van por la ruta ACBA. Determina el calor cedido por el ciclo.

Mostrar retroalimentación

Solución

Un mol de un gas que inicialmente se encuentra a 2 atm y ocupa 0,3 dm³, tiene una energía interna de 91 J. En su estado final sus condiciones son 1,5 atm, 0,8 dm³ y 182 J. Para llegar al estado final ha podido recorrer tres trayectos diferentes IAF, IBF e IF, según la figura adjunta.

Determine: El trabajo realizado por el gas y el calor neto que se transfiere al sistema, en cada una de las tres trayectorias.

Solución

6.1. Ciclo de Carnot

En el siglo XIX el ingeniero francés Nicolas Carnot concibió, estudió y desarrolló un ciclo termodinámico, que constituye el ciclo básico de todos los motores térmicos, en el:

- Se suministra al motor energía en forma de calor a temperatura elevada.
- La acción del calor permite realizar un trabajo mecánico al motor.
- El motor cede calor al foco de temperatura inferior.

El ciclo de Carnot es un ciclo teórico y **reversible**, su limitación es la capacidad que posee un sistema para convertir en calor el trabajo, se utiliza en las máquinas que usan vapor o una mezcla de combustible con aire u oxígeno.

Importante

Se dice que un proceso termodinámico es reversible, cuando acometiendo pequeños cambios en el ambiente podemos conseguir que recorra su trayectoria inversa. En la práctica es imposible, en la naturaleza todos los procesos que ocurren son irreversibles. Sin embargo el estudio de estos procesos es muy útil pues nos da el valor del rendimiento máximo que se puede obtener de una máquina.

Representado en un diagrama p-v se obtiene la siguiente figura:

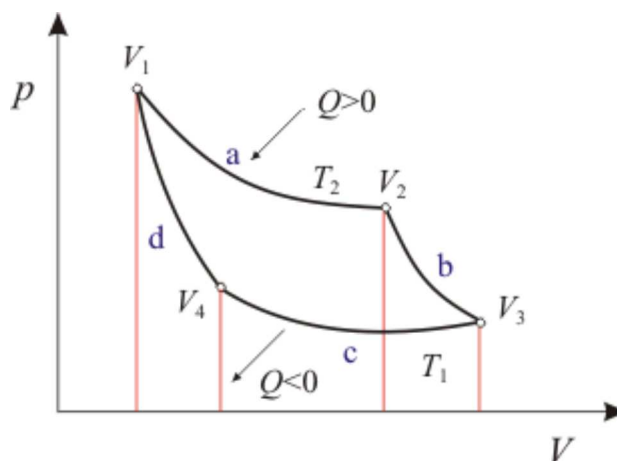


Imagen de elaboración propia

El ciclo se divide en cuatro etapas, cada una de las cuales se corresponde con una transformación termodinámica básica:

● Etapa A) Expansión isotérmica

En el gráfico es el paso del estado 1 al estado 2. Es un proceso isoterma y por ser un gas perfecto eso hace que la temperatura se mantenga constante T_1 .

El gas se encuentra en un estado de equilibrio inicial representado por p_1 , V_1 , T_1 , en el interior del cilindro. Se produce una expansión isotérmica entre 1 y 2, hasta alcanzar los valores p_2 , V_2 , T_1 , el sistema realiza un trabajo W_1 positivo (aumenta el volumen, luego es un trabajo hecho por el sistema, trabajo positivo), comunicando energía al entorno, por otro lado como la variación de energía interna ha de ser cero, toma un calor del entorno equivalente Q_1 :

$$W_1 = Q_1$$

● **Etapla B) Expansión adiabática**

Se parte del punto 2 y se llega al estado 3.

Por ser un proceso adiabático no hay transferencia de calor, el gas debe realizar un trabajo, elevando el émbolo, para lo que el cilindro debe estar aislado térmicamente, alcanzándose los valores p_3 , V_3 , T_2 .

● **Etapla C) Compresión isotérmica**

Entre los estados 3 y 4, hasta alcanzar los valores p_4 , V_4 , T_2 , siendo el trabajo realizado por el pistón. En este caso es un trabajo de compresión (negativo), se recibe energía del entorno en forma de trabajo y se cede una energía equivalente en forma de calor:

$$W_2 = Q_2$$

● **Etapla D) Compresión adiabática**

Entre los estados 4 y 1 cerrándose el ciclo.

Se alcanzan de nuevo los valores p_1 , V_1 , T_1 sin transferencia de calor con el exterior.

Consideramos ahora el efecto global del ciclo.

- El **trabajo neto** W realizado durante el ciclo por el sistema será el representado por la superficie encerrada en el trayecto 1-2-3-4-1.
- La cantidad **neta de energía calorífica** recibida por el sistema será la diferencia entre Q_2 y Q_1 .

Para calcular el rendimiento de un ciclo de Carnot se emplea la misma expresión mencionada anteriormente:

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

En la práctica es mucho más difícil obtener los valores de los calores trasegados que los valores de la temperatura (en grados Kelvin) de los dos focos, que se conocen por la lectura de un termómetro, y se puede considerar que la transmisión de calor es proporcional a las temperaturas de ambos focos sin que se cometa un error apreciable (recuerda que son gases perfectos y que la variación de energía interna es función exclusiva de la variación de temperatura) por lo que se puede escribir:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$$

Y por lo tanto se puede expresar el rendimiento como:

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

El rendimiento de este tipo de máquinas será mayor cuanto mayor sea la diferencia entre las temperaturas del foco caliente T_1 y el foco frío T_2 .

Existen otros ciclos termodinámicos que también poseen el rendimiento máximo aunque se utilizan mucho menos que el de Carnot.

Ejercicio resuelto

Los siguientes ejercicios hacen referencia al rendimiento máximo teórico que se puede obtener de una máquina térmica.

Una máquina térmica reversible con un rendimiento del 30% y cuyo foco frío se encuentra a 107°C , cede una cantidad de calor de 120 kcal a dicho foco frío durante cada ciclo. Determina la temperatura y el calor cedido por el foco caliente.

Mostrar retroalimentación

Solución

Una máquina térmica se encuentra funcionando entre dos focos a 27°C y a 227°C y tiene un rendimiento del 25% del máximo posible. Se repite el ciclo con una frecuencia de 5 veces cada segundo, siendo su potencia 20 kW. Determina el trabajo que se produce en cada ciclo y cuántas kcal/hora cede al foco frío.

Mostrar retroalimentación

Solución

Para mantener una temperatura en su interior de -18°C un congelador funciona con un COP real de $1/3$ de su valor teórico máximo, para ello consume una potencia de 2kW. Si consideramos que la temperatura ambiental permanece a 20°C . Determina la energía que se tiene que extraer del congelador.

Mostrar retroalimentación

Solución

Una máquina térmica trabaja entre dos focos a 300°C y 100°C . Absorbiendo una cantidad de calor $Q_1 = 100 \text{ Kcal}$ y cediendo un trabajo de 50.KJ.

Determinar:

- a) El rendimiento de la máquina térmica.
- b) El máximo rendimiento que podría llegar a tener esa máquina térmica.
- c) El calor cedido a la fuente fría.

Mostrar retroalimentación

Solución

Una máquina térmica absorbe 900 J de un foco caliente que se encuentra a 177°C , presentando una eficiencia del 40%.

Determina:

- a) Calor cedido al foco frío
- b) Temperatura a que se encuentra el foco frío.

Mostrar retroalimentación

Ejercicio resuelto

CICLO DE CARNOT

Un gas ideal diatómico ($c_v = 5/2 R$) se encuentra inicialmente a una temperatura $T_1 = 27^\circ\text{C}$, una presión $p_1 = 105 \text{ Pa}$ y ocupa un volumen $V_1 = 0.4 \text{ m}^3$. El gas se expande adiabáticamente hasta ocupar un volumen $V_2 = 1,2 \text{ m}^3$. Posteriormente se comprime isotérmicamente hasta que su volumen es otra vez V_1 y por último vuelve a su estado inicial mediante una transformación isócara. Todas las transformaciones son reversibles.

- a) Dibuja el ciclo en un diagrama p-V. Calcula el número de moles del gas y la presión y la temperatura después de la expansión adiabática.
- b) Calcula la variación de energía interna, el trabajo y el calor en cada transformación.

Mostrar retroalimentación

Solución

Un frigorífico que actúa según un ciclo de Carnot, funciona con 18 moles de un gas ideal monoatómico, realizando ciclos de 2 s de duración. Las temperaturas de los focos son 450 K y 150 K y consumiendo una potencia de 60 kW.

Se pide:

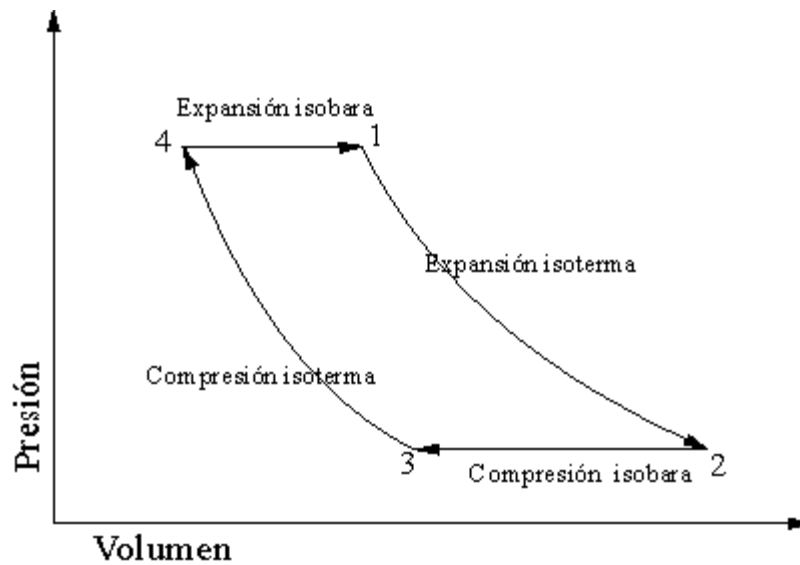
- a) Dibuja el ciclo en un diagrama p-V especificando las transformaciones que lo componen. Calcula la eficiencia.
- b) Calcula el calor intercambiado en cada etapa y la relación entre los volúmenes en la compresión isoterma.
- c) Sabiendo que después de la expansión isoterma el volumen del gas es $V_3 = 0.5 \text{ m}^3$, calcula la presión y el volumen después de la compresión adiabática.

Mostrar retroalimentación

Solución

6.2. Ciclo de Ericsson

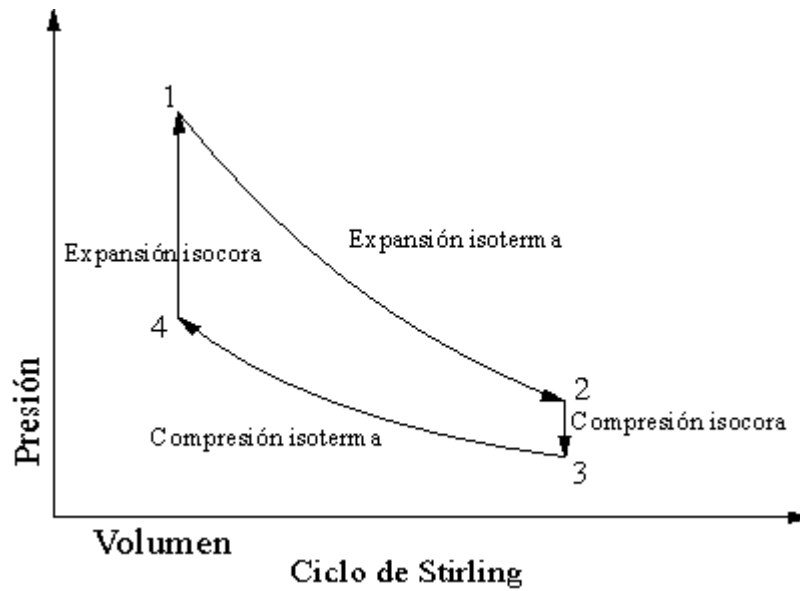
En este ciclo termodinámico, también reversible y por tanto nos da el rendimiento máximo que se puede obtener de la máquina, el fluido evoluciona realizando dos transformaciones isotermas y dos isobáricas, tal como se puede observar en la figura adjunta:



Ciclo de Ericsson
Imagen de elaboración propia

6.3. Ciclo de Stirling

En este ciclo termodinámico el fluido evoluciona realizando dos transformaciones isotérmicas y dos transformaciones isocóricas (a volumen constante), tal como se puede observar en la figura adjunta:



6.4. Ciclo de Rankine

El ciclo Rankine opera con vapor, y es el utilizado en las centrales termoeléctricas. Consiste en calentar agua en una caldera hasta evaporarla y elevar la presión del vapor, que se hace incidir sobre los álabes de una turbina, donde pierde presión produciendo energía cinética. Prosigue el ciclo hacia un condensador donde el fluido se licúa, para posteriormente introducirlo en una bomba que de nuevo aumentará la presión, y ser de nuevo introducido en la caldera.

La representación en diagrama p-V de ciclos en los que el fluido se vaporiza, presentan una diferencia con respecto a los ciclos de gas, ya que aparece una campana, llamada de cambio de fase.

A la izquierda corresponde al estado líquido, en el que prácticamente no hay modificaciones de volumen, cuando se aumenta su temperatura o su presión. Por ello las isothermas son prácticamente verticales.

A la derecha corresponde al estado vapor, aquí el fluido se comporta como un gas, y por ello las isothermas son muy parecidas a las de los gases ideales.

Dentro de la campana, el fluido se está evaporando, y las isothermas son horizontales.

Esto es así porque dada una presión, el calor que se le aporta al fluido no se emplea en elevar la temperatura, sino en su evaporación.

El rendimiento ideal de este ciclo tiene es el mismo que el ciclo de Carnot, aunque no alcanza valores tan elevados.

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

El ciclo de Rankine es en el que se basaban las antiguas máquinas de vapor y locomotoras, utilizaban un cilindro de doble efecto con un componente desplazable llamado corredera que dirigía el vapor a un lado u otro del pistón.

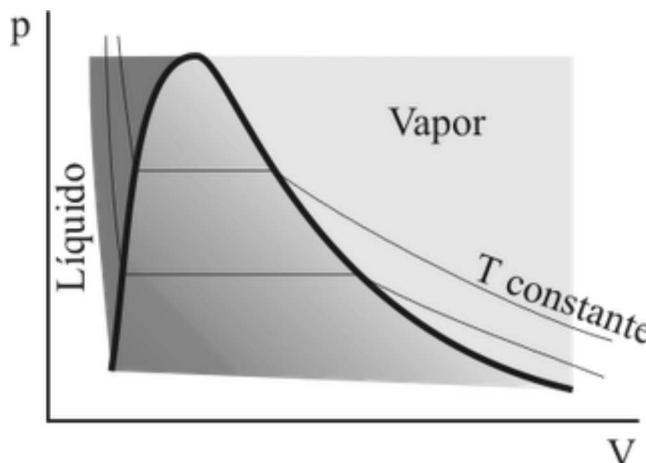


Imagen de elaboración propia

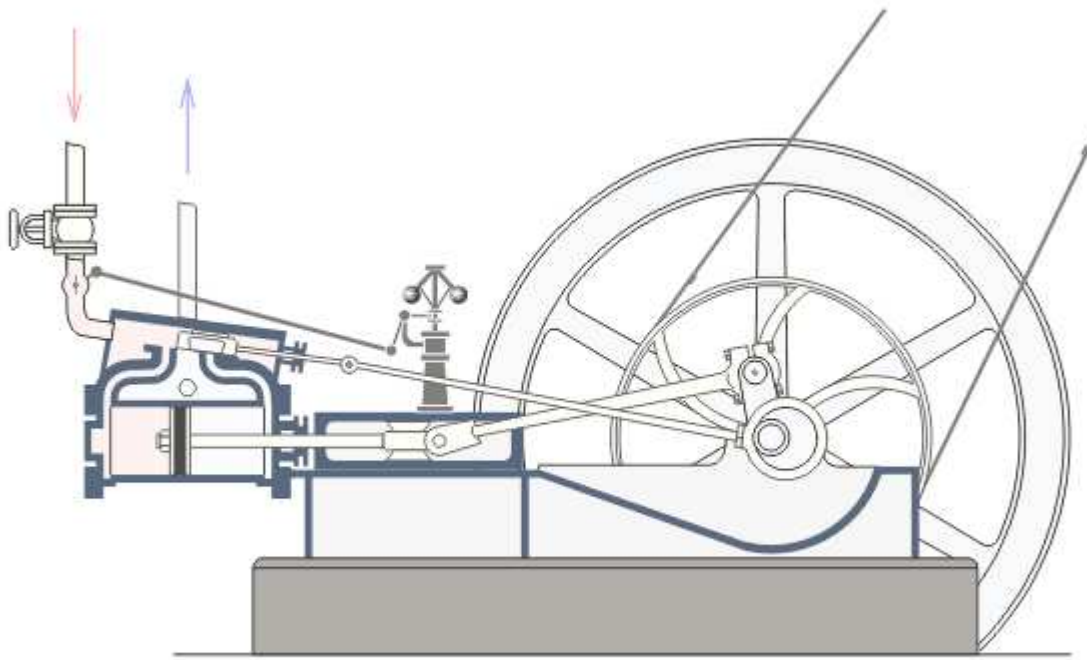
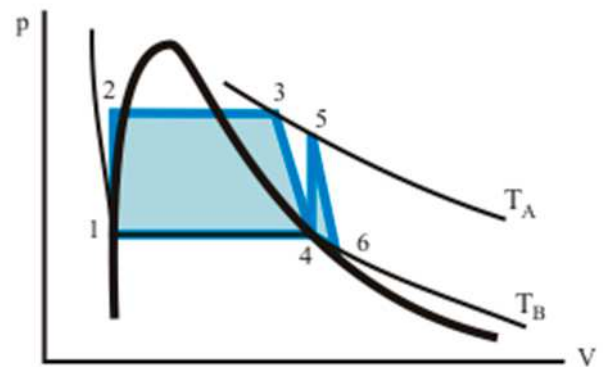
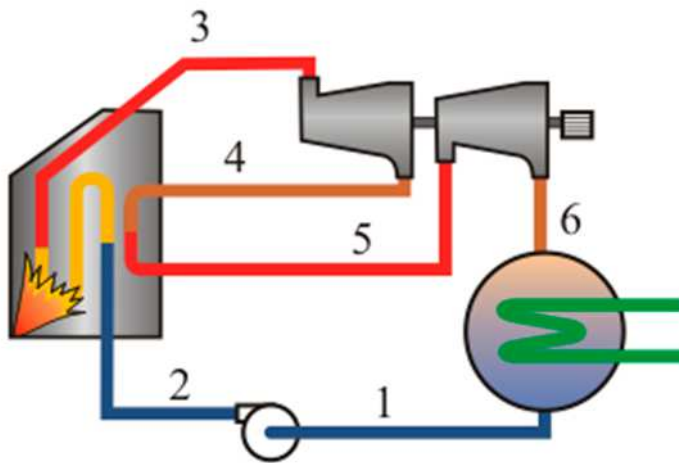


Imagen de Panther en [Wikimedia](#). Licencia [CC](#)

Analicemos más despacio las etapas del ciclo:



- En la transformación 1-2 aumenta la presión del líquido sin pérdidas de calor, por medio de un compresor, con aportación de un trabajo mecánico externo.
- En la transformación 2-3 se aporta calor al fluido a presión constante en una caldera, con lo que se evapora todo el líquido elevándose la temperatura del vapor al máximo.
- La transformación 3-4 es una expansión adiabática, con lo que el vapor a alta presión realiza un trabajo en la turbina.
- La transformación 4-1 consiste en refrigerar el fluido vaporizado a presión constante en el condensador hasta volver a convertirlo en líquido, y comenzar de nuevo el ciclo.

Para optimizar el aprovechamiento del combustible, se somete al fluido a ciertos procesos, para tratar de incrementar el área encerrada en el diagrama p-V.

- Precalentamiento del agua comprimida 4-5 aprovechando el calor de los gases que salen por la chimenea de la caldera. Con esto no se aumenta el área del diagrama, pero se reduce el calor que hay que introducir al ciclo.
- Recalentamiento del vapor que ha pasado por la turbina 5-6 haciéndolo pasar por la caldera y después por otra turbina de baja presión.

