
CICLOS TERMODINÁMICOS Y LA SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

INTRODUCCION La conversión de energía es un proceso que tiene lugar en la biosfera. Sin embargo, los seres humanos a lo largo de la historia hemos inventado diversos artefactos que posibilitan también la conversión de energía. La eficiencia con que se produce esta transformación esta directamente relacionada con la proporción en su forma final y su forma inicial y también depende de las leyes físicas y químicas que gobiernan la conversión.

CICLOS TERMODINAMICOS Se denomina ciclo termodinámico al proceso que tiene lugar en:

- Dispositivos destinados a la obtención de trabajo a partir de dos fuentes de calor a distinta temperatura (Máquinas Térmicas) o, de manera inversa, a producir el paso de calor de la fuente de menor temperatura a la fuente de mayor temperatura mediante la aportación de trabajo (Refrigeradores y Bombas de Calor).

El rendimiento es el principal parámetro que caracteriza a un ciclo termodinámico y se define como el trabajo obtenido dividido por el calor gastado en el proceso, en un mismo tiempo de ciclo completo si el proceso es continuo.

La eficiencia térmica del ciclo mide qué cantidad del calor ingresado es convertido en trabajo útil.

Este parámetro es diferente según los múltiples tipos de ciclos termodinámicos que existen, pero está limitado por el factor o rendimiento del ciclo de Carnot.

MAQUINAS TERMICAS La máquina térmica es un dispositivo que convierte energía térmica en otras formas útiles de energía como:

- La energía eléctrica: En un proceso característico para producir electricidad en una planta de potencia, el carbón o algún otro tipo de combustible se quema y el calor generado se utiliza para producir vapor de agua. El vapor se dirige hacia las aspas de una turbina, poniéndola a girar. Por último, la energía mecánica asociada a dicha rotación se usa para mover un generador eléctrico.

- Mecánica: El motor de combustión interna en un automóvil extrae calor del combustible en combustión y convierte una fracción de esta energía mecánica. Como se observa, el termino maquina térmica, muchas veces tiene un sentido mas amplio para incluir dispositivos que producen trabajo, que no operan en un ciclo termodinámico, máquinas que producen combustión interna, como las turbinas de gas y los motores de automóvil entran en esta categoría. Los dispositivos operan en un ciclo mecánico pero no en un ciclo termodinámico, ya que el fluido de trabajo no se somete a un ciclo completo.

En un ciclo mecánico: En lugar de que se enfríen a su temperatura inicial, los gases de escape se evacuan y se sustituyen por una mezcla de aire puro y de combustible al final del ciclo.



PLANTA DE VAPOR El dispositivo productor de trabajo que mejor encaja en la definición de máquina térmica es la central eléctrica de vapor que es una máquina de combustión externa. El proceso de combustión sucede fuera de la máquina y la energía térmica liberada durante este proceso se trasfiere al agua como calor para producir vapor.

Un diagrama esquemático es como el siguiente:



Para ello, en la máquina térmica se hace que una sustancia de trabajo (agua) recorra un proceso cíclico durante el cual :

- 1) El agua absorbe calor de una fuente a alta temperatura en una caldera, donde se calienta hasta el punto de ebullición y luego vaporizada produciendo vapor. Ambos procesos ocurren a presión aproximadamente constante. Por último, el vapor es recalentado a la misma presión.
 - 2) Este vapor pasa a través de una turbina donde se expande en un proceso aproximadamente adiabático y realiza un trabajo, hasta que la temperatura y la presión caen a los valores de funcionamiento del condensador.
 - 3) El vapor a baja presión, ingresa a un condensador y libera calor a una fuente a temperatura más baja condensándose. El agua condensada se halla un poco por debajo de la presión atmosférica a una temperatura menor que la del punto de ebullición.
 - 4) Finalmente el agua condensada es retornada a la caldera (que está a mayor presión temperatura) por medio de una bomba. En esta planta hay procesos que presentan algún grado de dificultades:
 - La aceleración y la turbulencia causadas por las diferencias de presión requeridas para que el vapor fluya.
 - Las fricciones
 - La transferencia de calor a través de las paredes de los equipos durante la expansión del vapor.
 - La transferencia irreversible de calor debido a las diferencias finitas de temperatura.
- Una primera aproximación a la solución del problema de esta planta de vapor se logra haciendo algunas simplificaciones, que aunque no sean reales en la práctica, conducen a una primera aproximación de la eficiencia máxima que se podría lograr.

Estas definen el llamado

Ciclo Rankine.

CICLO RANKINE IDEAL En este ciclo se supone que todos los procesos son reversibles

$$\text{Calor ingresado} = Q_{\text{ingresa}} = h_2 - h_1$$

$$\text{Calor que sale del sistema} = Q_{\text{sale}} = h_4 - h_3$$

El trabajo neto W realizado por la máquina (Esta es el área encerrada bajo la curva del ciclo en un diagrama $p-v$), es igual al calor neto que fluye hacia la misma (Área encerrada en la curva del ciclo en un diagrama $T-s$).

$$Q_{\text{neto}} = Q_{\text{ingresa}} - Q_{\text{sale}} \quad W_{\text{neto}} = Q_{\text{ingresa}} - Q_{\text{sale}}$$

Donde Q_{ingresa} y Q_{sale} se toman como cantidades positivas.

La eficiencia térmica: η de una máquina térmica se define como la razón del trabajo neto realizado al calor absorbido durante un ciclo:

$$\eta = W_{\text{neto}} / Q_{\text{ingresado}}$$

AUMENTO DEL RENDIMIENTO DEL CICLO DE RANKING

En general en un ciclo cualquier modificación que produzca un aumento del área encerrada por el ciclo sin modificar la cantidad de energía suministrada Q_{ingresa} , ha de aumentar el rendimiento de la máquina térmica, puesto que un aumento del área significa un aumento del W_{neto} , por lo que necesariamente aumenta el η .
Algunos de los modos de conseguir esto son:

1. Disminuir la presión a la salida de la turbina
2. Aumentar la temperatura de operación de la caldera (y por supuesto también la presión)
3. Usar un ciclo regenerativo (no lo vemos en este curso)

1. Disminuir la presión a la salida de la turbina

Cuando se disminuye la presión del vapor a la salida de la turbina, se aumenta el trabajo producido por el ciclo. El calor consumido en la caldera es el mismo y el calor entregado en el condensador se incrementa. Esto significa que al condensador hay que acoplarle algún equipo para producir vacío.

La disminución de la presión produce ahorro en combustible, pero también trae algunos inconvenientes:

- Debido a que la presión de operación es menor que la atmosférica, resulta casi imposible evitar que penetre aire al interior del sistema por las grietas que se producen en las tuberías, uniones, prensaestopas, etc. Al ingresar aire, ingresa CO_2 y O_2 ambos elementos corrosivos que producen daños en la caldera y en la turbina. Por lo que hay que incluir otro elemento: un "desaireador", cuya misión es eliminar el aire disuelto en el condensado antes que el fluido retorne a la caldera.

- Otro factor que incide son las vibraciones producidas por las bombas, el flujo de fluidos. Esto hace que sea difícil mantener estanco el sistema

Por lo general las instalaciones de generación de energía eléctrica a vapor operan con presiones del condensador entre 0,035 Kgf/cm^2 y 0,04 Kgf/cm^2 absolutos, debido a limitaciones de temperatura del agua de enfriamiento, que se obtiene de fuentes como aguas superficiales, aguas de pozo o torres de enfriamiento. Generalmente estas están a temperatura ambiente, que puede variar de $0^\circ C$ a $30^\circ C$, de modo que la presión del condensador está fijada por esta temperatura.

2. Aumentar la temperatura de operación de la caldera (y por supuesto también

Si en lugar de obtener vapor saturado en la caldera, se sigue calentando hasta obtener vapor sobrecalentado, se observa un aumento de la superficie encerrada en el ciclo (en el diagrama $T-s$).



la presión) El límite de la máxima temperatura de recalentamiento, viene dado por la resistencia del material (de la caldera u horno). En la práctica no supera los 580°C.

REFRIGERADORES – BOMBAS DE CALOR

Un ciclo termodinámico inverso busca lo contrario al ciclo termodinámico de obtención de trabajo. Se aporta trabajo externo al ciclo para conseguir que la transferencia de calor se produzca de la fuente más fría a la más caliente, al revés de como tendería a suceder naturalmente. Esta disposición se emplea en
-En refrigeración.
- Y en las máquinas de aire acondicionado (bombas de calor)

REFRIGERADORES

La refrigeración se emplea para extraer calor de un recinto, disipándolo en el ambiente. Se dice que hay refrigeración cuando la temperatura deseada es menor que la del ambiente. Este servicio es de gran importancia en la industria alimentaria, para la licuación de gases y para la condensación de vapores. La transferencia de calor de un medio de baja temperatura a uno de alta temperatura requiere de dispositivos especiales llamados *refrigeradores*; estos son dispositivos cíclicos *cuyo fluido de trabajo se denomina refrigerante*. Existen varias clases de procesos de refrigeración, pero por su difusión se destacan dos:

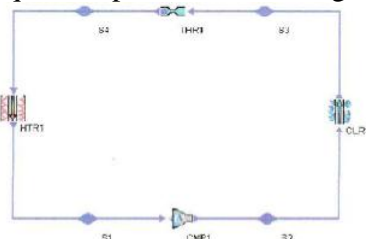
□ *Ciclo de refrigeración por compresión de vapor* (empleado con mayor frecuencia). En este caso se consume energía mecánica en un compresor que comprime al fluido de trabajo evaporado que viene del evaporador (cámara fría) de modo que el calor que tomó el fluido refrigerante en el evaporador pueda ser disipado a un nivel térmico superior en el condensador. Luego de ello, el fluido pasa a un expansor, que es una simple válvula (orificio capilar) de modo que el fluido condensado a alta presión que sale relativamente frío del condensador al expandirse se vaporiza, con lo que se enfría considerablemente ya que para ello requiere una gran cantidad de calor (dada por su calor latente de vaporización) que toma del recinto que esta refrigerando.

□ *Y la refrigeración por absorción*: El calor que toma el fluido refrigerante a baja temperatura y presión es cedido a temperatura intermedia y alta presión luego de haber evaporado de una solución por medio de un calentamiento. Se diferencia del anterior por no requerir energía mecánica y se puede usar cualquier fuente de calor que resulte económica.

Ambos tipos producen una región fría por evaporación de un fluido refrigerante a baja temperatura y presión.

Esto sólo puede ser posible si se hace un trabajo sobre el refrigerador. Por lo tanto, se ve que el refrigerador transfiere calor del cuerpo más frío (el contenido del refrigerador) a un cuerpo más caliente (el cuarto).

Un esquema típico es como el siguiente:



En este sistema el fluido refrigerante hace un ciclo en el cual pasa por:

- Un condensador, en donde se halla a alta presión a una temperatura tan baja como el fluido de enfriamiento pueda lograr. Generalmente el refrigerante es de tal naturaleza que a esta temperatura y presión se halla como líquido saturado.
- Este líquido saturado, al pasar por un estrangulamiento tiene lugar un enfriamiento y una vaporización parcial
- En el evaporador, se completa la evaporación total del fluido refrigerante produciendo con ello la refrigeración que se busca.
- Este vapor es luego comprimido en un proceso aproximadamente isoentrópico.

Aumenta así su temperatura y se halla en la condición de vapor sobrecalentado. Ingresando nuevamente al condensador para completar el ciclo.

La diferencia con un Ciclo de Carnot invertido, es que la evaporación no es isoentrópica, puesto que ocurre en una restricción en donde el proceso es isoentálpico, espontáneo y por ello fuertemente irreversible.

Las otras dificultades de este ciclo real, son las irreversibilidades debidas a procesos involucrados en las turbulencias, en la fricción, en la transferencia de calor con gradientes finitos de temperatura, etc.

No obstante, mientras mayor es la relación de compresión mayor es la eficacia del compresor. La eficiencia de un refrigerador se expresa en términos del *coeficiente de operación* ($COP_{\text{refrigerador}}$)

El objetivo de un refrigerador es extraer la mayor cantidad posible de calor de una fuente que está a baja temperatura gastando la mínima cantidad de trabajo posible.

De ese modo el COP de un refrigerador se expresa como:

$COP_{\text{refrigerador}} = \text{Cantidad de calor extraída de la fuente fría} / \text{Trabajo neto sobre el refrigerante}$

$$COP_{\text{refrigerador}} = Q_{\text{sale}} / W_{\text{neto}}$$

Observe que COPR puede ser mayor que la unidad.

En la práctica, los problemas de los refrigeradores, en particular aquéllos procesos que involucran licuefacción de gases, el lugar desde donde deben extraer calor no es una fuente fría sino una sustancia de masa finita cuya temperatura disminuye durante la refrigeración.

En tales casos es necesario calcular el trabajo mínimo necesario para lograr un mínimo de refrigeración con el objeto de calcular el costo de la planta.

BOMBAS DE CALOR BOMBAS DE CALOR

Otro dispositivo que transfiere calor de un medio de baja temperatura a otro de alta es la bomba de calor. El objetivo de una bomba de calor es mantener un espacio caliente a alta temperatura.

Lo cual consigue al absorber calor a una fuente de baja temperatura, y suministrándolo a un medio de alta temperatura.



**Biblioteca Calderas del Norte SA Steam
Boiler**
P.O. Box 66478
Mexico, Df
Tel: 01800-849-8459
Inspection and Insurance Co.
Nex: 0181-83218290
Internet: <http://www.calderasdelnorte.com>

La medida del rendimiento de una bomba de calor se expresa también en términos del $COP_{bomba\ de\ calor}$ definido como:

$$COP_{bomba\ de\ calor} = Q_{sale} / W_{neto}$$

Los acondicionadores de aire son básicamente refrigeradores cuyo espacio refrigerado es un cuarto o un edificio en lugar de un compartimiento de alimentos. Una unidad de acondicionamiento de aire tipo ventana, enfría un cuarto al absorber calor del aire que contiene y desechándolo en el exterior.