

1.- Fundamentos Termodinámicos y clasificación de los ciclos combinados

El objetivo principal del tema es la revisión y la puesta al día de los fundamentos termodinámicos en los que se sustentan las centrales de ciclo combinado. Los conceptos básicos que debería conocer el alumno una vez finalizado el estudio del tema son los siguientes:

- Qué es un ciclo combinado
- Qué tipos de ciclos combinados hay, cuál es el más comúnmente empleado y por qué
- Cuál es su principal ventaja del ciclo combinado con respecto a las centrales convencionales y por qué adquiere dicha ventaja
- Definiciones de potencia, trabajo y rendimiento aplicados a un ciclo combinado
- Repaso de los conceptos de exergía, exergía de flujo, contenido exergético del calor, pérdidas exergéticas, destrucción exergética y los diferentes tipos de pérdidas exergéticas existentes.

Asimismo es conveniente el repaso del Primer y Segundo Principio de la Termodinámica y su aplicación a los sistemas abiertos.

Los epígrafes en los que se divide el tema son tres:

- 1.1. Definición y clasificaciones
- 1.2. Termodinámica del ciclo combinado
- 1.3. Análisis exergético

Los puntos 1.1 y 1.2 se pueden estudiar con los epígrafes 2.1 y 2.2 del texto base. Se debe añadir la siguiente clasificación de ciclos combinados:

Ciclos combinados

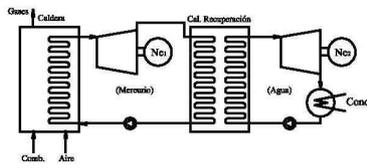
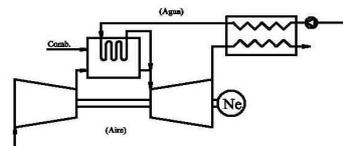
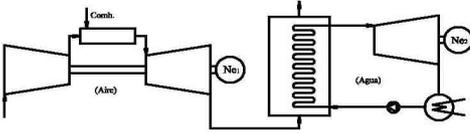
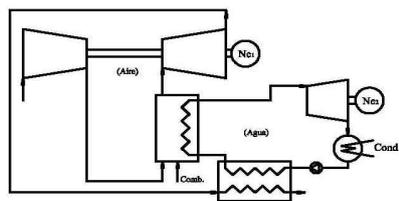
a) **Cerrado-cerrado:**
Se puede implementar con dos ciclos Rankine, el de alta temperatura con mercurio y el de baja con agua. No se usa por los problemas de coste y toxicidad del mercurio.

b) **Abierto-abierto:**
Implementado en la práctica con un ciclo *Cheng* (figura de al lado). No sigue el esquema al no existir un ciclo de alta temperatura y otro de baja. Se usa poco pero se obtienen rendimientos altos.

c) **Abierto-cerrado:**
c1) *Ciclo combinado de turbina de gas y de vapor.* Se obtienen rendimientos muy altos, siendo prácticamente el único en uso.

c2) *Ciclo combinado evolución de las calderas Velox (calderas presurizadas, $Ne_1=0$).*

d) **Ciclos triples:**
Tres ciclos en serie, por ejemplo, aire-agua-amoniaco. En desuso por el alto coste sin grandes mejoras en el rendimiento y por el empleo de amoniaco.

En cuanto al epígrafe 1.3, se deben repasar los conceptos en cualquier texto de Termodinámica. Los conceptos a repasar (se hace un breve apunte de qué es cada uno de ellos) son los siguientes:

- Concepto y cálculo de exergía en sistemas cerrados:

Exergía (B [J]) es el trabajo útil máximo que puede realizar un sistema cerrado contra el entorno por el hecho de estar en un estado térmico dado. Su expresión es:

$$B = (U - U_0) - T_0(S - S_0) + p_0(V - V_0)$$

Donde U [J/kg] es la energía interna del sistema, T [K] la temperatura, p [Pa] la presión, V [m³] el volumen y S [kJ/K] la entropía. El subíndice 0 hace referencia a las condiciones ambientales.

Su interés en la asignatura es puramente conceptual. No va a ser empleado.

- Concepto y cálculo de exergía de flujo de una corriente en sistemas abiertos

La exergía de flujo (e [kJ/kg]) es el máximo trabajo específico técnico que puede intercambiar un sistema abierto en régimen permanente por el hecho de que tenga una corriente de entrada con unas condiciones termodinámicas dadas. Su valor se obtiene de la siguiente expresión:

$$e = (h - T_0 s) - (h_0 - T_0 s)$$

En este caso, la entropía s es minúscula, indicando que sus unidades son [J/(kg·K)]. h [J/kg] es la entalpía de la corriente. La notación en minúscula se interpreta como una variable intensiva, por unidad de masa.

A lo largo de la asignatura se empleará la exergía de flujo en alguna ocasión. La idea básica es que una corriente, por el hecho de estar en unas condiciones dadas -con mayor estado térmico que el ambiente- es capaz de producir trabajo. Ese trabajo tiene un límite, cuyo valor es la exergía de dicha corriente. En los procesos reales, el trabajo que produce una corriente es menor que su exergía. El resto de exergía, como se ve en el balance, es exergía saliente y/o pérdidas exergéticas. Algunas de ellas se podrán aprovechar en otros procesos.

- Balances de exergía en sistemas cerrados y en sistemas abiertos

Sistemas cerrados:

$$\Delta B = B_2 - B_1 = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot dQ - (W - p_0 \cdot \Delta V) - I$$

Donde la integral es el contenido exergético del calor, $W - p_0 \Delta V$ es el trabajo útil realizado por el sistema e I es la destrucción exergética. Es decir, un sistema cerrado varía su exergía debido a que intercambia calor, intercambia trabajo o pierde exergía por irreversibilidades en los procesos (generalmente por rozamiento).

Sistemas abiertos estacionarios:

$$\sum_{entradas} e_{ent} \cdot \dot{m}_{ent} = \sum_{salidas} e_{sal} \cdot \dot{m}_{sal} - \dot{Q} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) + \dot{W} + \dot{I} \quad (\text{todos los términos en [W]})$$

Es decir, la exergía que entra al sistema es igual a la suma de la exergía saliente, el calor intercambiado (expresado como contenido exergético), la potencia mecánica producida y las pérdidas.

- Trabajo útil

Es el trabajo aprovechable producido contra el entorno. Se suele hacer la distinción entre trabajo de variación de volumen y trabajo técnico. El trabajo técnico es un trabajo producido o aportado al sistema que no lleva asociado una variación de volumen (por ejemplo, un eje rotando con un par de accionamiento, trabajo eléctrico o de otra naturaleza). El trabajo de variación de volumen es el debido a que el sistema aumenta o disminuye su volumen ($p \cdot dV$). Este trabajo contra el entorno es útil siempre y cuando la presión que ejerce la fuerza sea mayor a la atmosférica (en caso contrario, será incapaz de desarrollar una fuerza). El trabajo útil es, por tanto $dW_u = (p - p_0) \cdot dV$. El trabajo técnico, por su naturaleza, es siempre trabajo útil.

Al igual que el concepto de exergía, esta definición es útil a nivel conceptual, pero no se usará a lo largo de la asignatura.

- Contenido exergético del calor:

La transformación de calor en trabajo (fin último por el que tuvo origen la Termodinámica) no es posible en su totalidad; el propio funcionamiento de los motores térmicos imposibilita que todo el calor aportado por una fuente sea transformado en trabajo. Es inevitable que se ceda algo de calor al ambiente:

$$Q_{\text{aportado}} = W_{\text{producido}} + Q_{\text{cedido}}$$

Es decir, un motor térmico se nutre de una fuente de energía, transformando parte de esta energía en trabajo y cediendo otra parte al ambiente. Cuanto mayor sea la energía convertida en trabajo mayor será la eficiencia del motor. El rendimiento máximo del motor (de forma teórica) es el rendimiento de Carnot, que depende de las temperaturas de aporte y de cesión de calor.

En resumen, la transformación de calor en trabajo se aleja de ser un proceso totalmente eficiente. Por tanto, las magnitudes de calor, en términos exergéticos (producción máxima de trabajo), no es equivalente a las de trabajo, ya que no todo el calor se puede transformar en trabajo. El contenido exergético del calor,

$$d\dot{Q} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$$

es, precisamente, la cantidad máxima de energía que puede ser transformada en trabajo contra el entorno, por el hecho de suministrarse calor a una temperatura T .

- Destrucción exergética

La destrucción exergética (I) es la exergía perdida debido a las irreversibilidades (generalmente fricción); en los procesos reales, hay pérdidas de potencia debido a fuerzas de rozamiento o, genéricamente, a irreversibilidades, que siempre son contrarias a la producción de potencia.

Se suele calcular a partir de la expresión:

$$I = T_0 \cdot \sigma$$

donde σ es la generación de entropía (magnitud asociada a las irreversibilidades).

Para repasar estos conceptos conviene, además de la lectura del presente documento, emplear cualquier texto de Termodinámica o específicos en relación con la exergía. Se listan alguno de ellos:

Fundamentos de Termodinámica Técnica, M.J. Morán y H.N. Shapiro. 2ª edición. Editorial Reverté (2004). Capítulo 7.

Termodinámica. Wark, K. Richards, D. 6.a edición. McGraw-Hill (2001). Capítulo 9.

Termodinámica. Lacalle, J.M. et al. 2ª edición. Sec. Publicaciones UPM (1997). Capítulos 5.9, 5.10, 14.5.

The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. Kotas, T. J. Butterworths (1985). Capítulos 1.11, 2.2, 2.3, 2.6.

2.- Tecnología actual de las plantas de ciclo combinado

El tema se abordará desde la perspectiva del conocimiento básico de las diferentes tecnologías involucradas en los ciclos combinados, sin perder de vista que el objetivo de la asignatura es la simulación de este tipo de plantas. El tema se estudiará con el capítulo 2.2 del texto base.

El capítulo se centra, sobretodo, en enumerar y describir someramente qué tipo de componentes y configuraciones son empleadas, sin entrar en detalle en ninguno de ellos, así como describir los principales parámetros del diseño termodinámico. Dichos conceptos son los que el alumno deberá estudiar.

Los epígrafes son dos:

- 2.1. Tecnología de los principales componentes
- 2.2. Configuraciones y aplicaciones.