

1.- Simulación numérica de los ciclos combinados

El objetivo del tema es conocer los modelos matemáticos que permiten el estudio y, sobretudo, la simulación de las plantas de ciclo combinado. El tema se ha de estudiar siguiendo primordialmente el texto base. Consta de tres partes o apartados:

- 3.1 Simulación de los ciclos combinados en el punto de diseño
- 3.2 Simulación de los ciclos combinados a cargas parciales
- 3.3 Introducción a la simulación de transitorios (no está en el texto base y se describirá muy brevemente en la presente guía)

Los objetivos que deberá alcanzar el alumno tras el estudio del tema son:

- Conocer y aplicar los modelos de simulación cada uno de los componentes del ciclo combinado en su punto nominal
- Conocer y aplicar los modelos de simulación de los distintos componentes del ciclo combinado a cargas parciales
- Comprender el acoplamiento turbina-compresor de una turbina de gas.
- Entender conceptualmente los balances exergéticos y saber plantear las ecuaciones que permiten su cálculo
- Distinguir entre el concepto de simulación a carga parcial y simulación de transitorios.

3.1 Simulación de los ciclos combinados en el punto de diseño

Ha de estudiarse siguiendo el texto base (3.1 y 3.2).

La simulación de un sistema térmico (en este caso del ciclo combinado) en su punto nominal consiste en hallar las prestaciones del sistema y todas las variables del sistema cuando éste funciona en su punto nominal o punto de diseño. Es decir, se trata de conocer las ecuaciones que permiten hallar el trabajo, la potencia, el rendimiento así como la presión, la temperatura, la entalpía y la entropía en cada uno de los puntos característicos del sistema. Como datos del problema se conocerán los parámetros de diseño de los distintos elementos de la planta (estudiados en el capítulo 2), que son las especificaciones de diseño de la central.

A grandes rasgos, este proceso de cálculo se basa en plantear el Primer Principio de la Termodinámica (balance de energía) para sistemas abiertos y en régimen permanente a cada uno de los elementos que integran la planta. Las ecuaciones así planteadas junto con los parámetros de diseño conformarán un sistema de ecuaciones con el que se podrán calcular las variables de estado (p, T, h y s) en cada uno de los puntos representativos de la planta. Una vez obtenidas dichas variables, se procederá a calcular los trabajos, las potencias y el rendimiento de la planta.

En forma general, la ecuación del Primer Principio es la siguiente:

$$\Delta \dot{U} = \sum_{\text{entradas}} h_{\text{ent}} \cdot \dot{m}_{\text{ent}} - \sum_{\text{salidas}} h_{\text{sal}} \cdot \dot{m}_{\text{sal}} + \dot{Q} - \dot{W} (=0 \text{ si el régimen es permanente})$$

En ocasiones, sólo el balance de energía no es suficiente y hay que echar mano de una serie de definiciones o parámetros adicionales que completen los modelos.

El apartado concluye con el planteamiento del Segundo Principio de la Termodinámica, en forma de balance de exergía, a cada uno de los componentes de la central, con el fin de calcular la exergía de flujo de cada una de las corrientes así como calcular las irreversibilidades.

El Segundo Principio se puede enunciar de diversas formas, cada una con su formulación correspondiente. En la asignatura tomaremos los balances de entropía y de exergía:

Balance de entropía:

$$\Delta \dot{S} = \sum_{\text{entradas}} s_{\text{ent}} \cdot \dot{m}_{\text{ent}} - \sum_{\text{salidas}} s_{\text{sal}} \cdot \dot{m}_{\text{sal}} + \dot{J}_S + \dot{\sigma} (=0 \text{ si el régimen es permanente})$$

siendo $dJ_S = \frac{dQ}{T}$ el flujo entrópico calorífico (calor aportado al sistema partido por la temperatura a la que se aporta) y σ la generación entrópica (asociada a las irreversibilidades del sistema).

Balance de exergía:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{B} &= \sum_{\text{entradas}} e_{\text{ent}} \cdot \dot{m}_{\text{ent}} - \sum_{\text{salidas}} e_{\text{sal}} \cdot \dot{m}_{\text{sal}} + (\dot{Q} - T_0 \cdot \dot{J}_S) - \dot{W} - \dot{I} = \\ &= \sum_{\text{entradas}} e_{\text{ent}} \cdot \dot{m}_{\text{ent}} - \sum_{\text{salidas}} e_{\text{sal}} \cdot \dot{m}_{\text{sal}} + \dot{Q} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) - \dot{W} - \dot{I} (=0 \text{ si el régimen es permanente}) \end{aligned}$$

donde $I = T_0 \cdot \sigma$ es la destrucción exergética (asociada a las irreversibilidades)

3.2 Simulación de los ciclos combinados a cargas parciales

Se estudiará por los apartados 3.3, 3.4 y 3.5 del texto base.

Los modelos expuestos en el apartado 3.1 requieren de los parámetros de diseño para el cálculo de las incógnitas. Sin embargo, el funcionamiento en el punto nominal sólo se da en determinadas ocasiones, ya que, debido a la variación de las condiciones ambientales por un lado y a la variación de la demanda de energía por otro, el funcionamiento real de la planta se aleja en mayor o en menor medida del punto de diseño.

Así pues, se considera la operación a carga parcial a cualquier punto de funcionamiento en régimen estacionario que sea diferente del punto nominal, bien por distinta demanda de potencia o bien porque las condiciones ambientales no son las supuestas en el punto nominal.

Como a cargas parciales no hay parámetros o especificaciones de diseño, el balance de energía solo no permite calcular cada una de las variables de los componentes (existen más incógnitas que ecuaciones ya que no se conocen los parámetros de diseño). Estos grados de libertad que tiene el modelo se constriñen añadiendo ecuaciones relacionadas con el diseño físico de cada uno de los componentes.

En el punto nominal se conocen unos parámetros de diseño que, junto con los balances de energía, permiten calcular cada uno de los puntos y variables de la planta. Una vez conocidas las variables de los componentes de la central, el fabricante deberá dimensionar físicamente los componentes que satisfagan los valores que toman dichas variable, lo que supone una caracterización de cada componente. Este diseño físico introduce nuevas ecuaciones (distintas en cada componente) que, si bien no son necesarias en el punto nominal, sí lo son a cargas parciales debido a que no se pueden emplear los parámetros de diseño.

3.3 Introducción a la simulación de transitorios

Se estudiará por este documento.

Hasta el momento, sólo se han presentado modelos estacionarios que predicen el comportamiento de la central tanto en el punto de funcionamiento nominal como a cargas parciales o en condiciones fuera de diseño. Pero ambas situaciones son estacionarias.

La simulación de transitorios es un tercer paso en la simulación de sistemas térmicos que proporciona la evolución temporal entre unos estados estacionarios y otros, así como en situaciones de arranque o parada de la central.

Una vez que se cuenta con un modelo de simulación de transitorios, no es necesario un modelo de simulación a cargas parciales puesto que el régimen estacionario es un caso particular de los transitorios y el final de éstos; tras una perturbación que origina un transitorio se llegará a una situación estable en régimen permanente, que el modelo de transitorios debe ser capaz de reproducir.

Puede decirse, por tanto, que cuando, partiendo de una situación estable, tiene lugar un cambio en alguno de los parámetros operativos de la planta de potencia se produce durante un cierto tiempo una situación transitoria hasta alcanzar una nueva situación estacionaria o permanente. Este comportamiento transitorio

queda regido, otra vez, por los balances de energía –en este caso en régimen transitorio, los balances de masa –también en régimen transitorio– (ver ecuaciones de debajo) y las ecuaciones de diseño físico de los componentes. Además, al ser el régimen transitorio estarán involucradas las inercias de los componentes móviles (equilibrio de fuerzas o momentos y aceleraciones, ecuaciones de debajo), así como los sistemas electrónicos de regulación y control de la planta que actúan sobre los grados de libertad de la central (admisión de combustible, geometría variable del compresor, apertura válvulas, válvulas de derivación, bombas, etc.).

$$\Delta \dot{M} = \sum_{entradas} \dot{m}_{ent} - \sum_{salidas} \dot{m}_{sal}$$

$$\Delta \dot{U} = \sum_{entradas} h_{ent} \cdot \dot{m}_{ent} - \sum_{salidas} h_{sal} \cdot \dot{m}_{sal} + \dot{Q} - \dot{W}$$

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a}, \text{ o bien, } \sum (\vec{r} \times \vec{F}) = I_{eje} \cdot \omega$$

donde I_{eje} es el momento de inercia respecto al eje de giro.

La simulación de transitorios, por tanto, va ligada a la simulación de los sistemas de regulación y control del sistema de regulación. Dicho conjunto de modelos reproducirá la actuación de los diferentes bucles de control de la planta a través de los diversos controladores PID utilizados. La integración y la derivada de esta señal de error permiten respectivamente garantizar el alcance de modo estable del valor de consigna y la mejora de la dinámica de la variable controlada (principalmente disminución de sobreoscilaciones), ya sea la referencia una variable temporal preprogramada (por ejemplo una curva de variación de potencia) o bien un valor estacionario (por ejemplo, un determinado nivel del líquido en el calderín). Los objetivos de estudios de este tipo son, por una parte, cumplir las especificaciones de seguridad del sistema (actuación ante casos de emergencia), por otra parte, mejorar la dinámica de respuesta (actuaciones más rápidas ante cambios de referencia y minimización de los efectos de las perturbaciones) y, finalmente, aumentar la robustez del sistema de control.