Apuntes

Temas Avanzados de Ingeniería Térmica

Advanced Thermal Engineering

Máster Universitario en Ingeniería de la Energía

ETSI Minas y Energía

Hugo Torres Orejudo

Noviembre 2026

Elaborado con IA a partir del material de la asignatura. Material no oficial.

Versión v1.0

Índice general

1 Energía térmica: contexto y perspectivas **2**

2 Sistemas de muy alta temperatura *(Ultra-High Temperature Systems)* **2**
2.1 Materiales . . . 3
2.2 Retos de diseño . . . 3

3 Centrales térmicas avanzadas **3**
3.1 Ciclos . . . 3
3.2 Captura y almacenamiento de CO_2 *(CCS/CCUS)* . . . 4

4 Combustión y reducción de su impacto **4**
4.1 Fundamentos . . . 4
4.2 Emisiones . . . 5
4.3 Aplicaciones industriales . . . 5

5 Producción de calor y frío. Vectores energéticos **5**

6 Cómo se evalúa **5**

Resumen

Resumen en español de los bloques de la asignatura, que se imparte en inglés: contexto de la energía térmica, sistemas de muy alta temperatura, centrales térmicas avanzadas con captura de CO_2 y combustión con sus emisiones. Los términos originales van en cursiva entre paréntesis para enlazar con el material de clase y con los proyectos. Los ejercicios resueltos están en un documento aparte.

1 Energía térmica: contexto y perspectivas

La mayor parte de la energía final que usa la sociedad acaba siendo calor o pasa por él: calefacción y refrigeración, calor de proceso industrial, generación eléctrica con máquinas térmicas y transporte. Un **sistema térmico** es un conjunto de componentes acoplados (intercambiadores, turbomáquinas, cámaras de combustión, almacenamientos) con un comportamiento conjunto; se analiza con balances de masa, energía y exergía en un volumen de control.

- **Primer principio**: $\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}\,(h + \frac{c^2}{2} + gz)_{sal} - \sum \dot{m}\,(h + \frac{c^2}{2} + gz)_{ent}$.
- **Segundo principio**: límite de Carnot $\eta_C = 1 - T_f/T_c$. Subir la temperatura del foco caliente es la vía principal para mejorar los ciclos: de ahí el interés por los sistemas de muy alta temperatura.
- **Exergía**: trabajo máximo obtenible respecto al ambiente. Las destrucciones de exergía (combustión, transmisión de calor con salto grande de temperatura, mezcla) señalan dónde mejorar.

Tendencias: electrificación del calor (bombas de calor), calor renovable (solar térmica, biomasa, geotermia), almacenamiento térmico, recuperación de calor residual y vectores energéticos (hidrógeno, e-fuels) para lo que no se puede electrificar.

2 Sistemas de muy alta temperatura *(Ultra-High Temperature Systems)*

Aplicaciones: turbinas de gas avanzadas, ciclos de potencia de alta temperatura (incluidos los de CO_2 supercrítico), receptores solares de torre, almacenamiento térmico a alta temperatura, aeroespacial y procesos industriales (acero, cemento, vidrio).

2.1 Materiales

Familia	Ventajas	Inconvenientes
Superaleaciones (Ni, Co)	Estabilidad hasta unos 1000 °C, resistencia a oxidación y corrosión, resistencia mecánica, fabricables	Caras, densas, sensibles a ciertos medios corrosivos
Metales refractarios (W, Mo)	Punto de fusión altísimo (W a 3422 °C), resistentes a la deformación	Frágiles a temperatura ambiente, se oxidan rápido en aire caliente
Cerámicas avanzadas (SiC, ZrO_2)	Muy alta temperatura, resistencia a corrosión y desgaste	Frágiles, difíciles de fabricar y unir con metales

2.2 Retos de diseño

Intercambiadores de calor compactos y fiables, sellado, dilatación térmica, fluencia *(creep)*, fatiga térmica, recubrimientos de barrera térmica y refrigeración de componentes. La transmisión de calor por radiación ($\propto T^4$) pasa a dominar.

3 Centrales térmicas avanzadas

3.1 Ciclos

Fórmulas clave

Brayton ideal: $\eta = 1 - r_p^{-(k-1)/k}$ Rankine: $\eta = \dfrac{W_{turb} - W_{bomba}}{Q_{caldera}}$

Ciclo combinado: $\eta_{CC} = \eta_{TG} + \eta_{TV}\,(1 - \eta_{TG})$ Heat rate $= 3600/\eta$ (kJ/kWh)

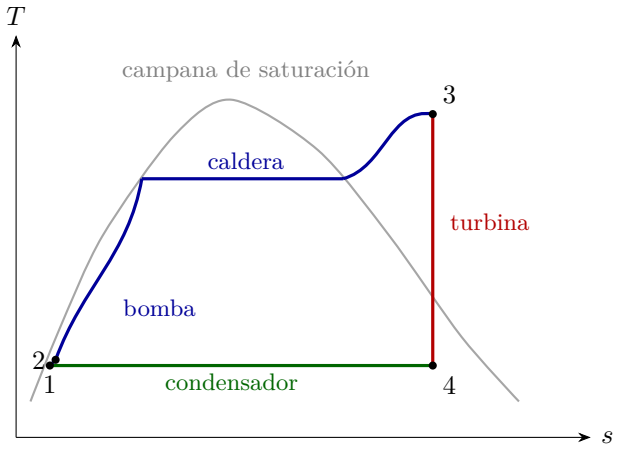


Figura 1. Ciclo Rankine con sobrecalentamiento en el diagrama T–s. 1–2: bomba. 2–3: caldera (calentamiento, evaporación y sobrecalentamiento). 3–4: expansión en la turbina. 4–1: condensación.

Mejoras: mayor temperatura de entrada a turbina, recalentamiento, regeneración, presiones supercríticas y ultrasupercríticas en vapor, calderas de recuperación con varios niveles de

presión en el combinado (rendimientos por encima del 60 %). Herramientas de simulación de ciclos permiten optimizar parámetros.

3.2 Captura y almacenamiento de CO_2 *(CCS/CCUS)*

- **Postcombustión**: absorción química del CO_2 de los humos (aminas). Aplicable a centrales existentes; el consumo de vapor para regenerar el disolvente es la principal penalización.
- **Precombustión**: gasificación o reformado a gas de síntesis, desplazamiento a $CO_2 + H_2$ y separación del CO_2 antes de quemar.
- **Oxicombustión**: combustión con oxígeno puro y recirculación de humos; los humos son casi CO_2 y agua. La penalización está en separar el oxígeno del aire.

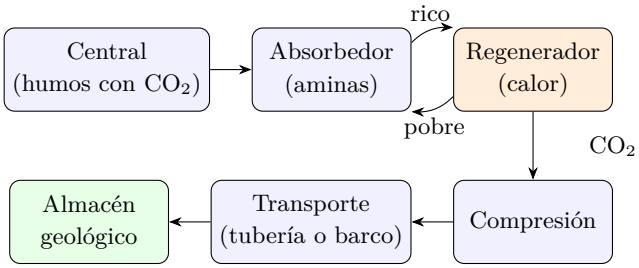


Figura 2. Captura de CO_2 en postcombustión. El disolvente absorbe el CO_2 de los humos y se regenera con calor (la mayor penalización energética). Después el CO_2 se comprime, se transporta y se almacena.

Después: compresión, transporte por tubería o barco y almacenamiento en formaciones geológicas profundas (acuíferos salinos, yacimientos agotados) o uso *(utilization)*. La penalización energética típica es de 7–12 puntos de rendimiento, de modo que el **CO_2 evitado** es menor que el **capturado**.

4 Combustión y reducción de su impacto

4.1 Fundamentos

Para que haya combustión hacen falta combustible, oxígeno suficiente, energía de ignición, temperatura y tiempo de residencia, y buena mezcla. La reacción global es el resultado neto de cientos de reacciones elementales (el metano implica unas 50 especies y más de 300 reacciones).

Fórmulas clave

Estequiometría de C_xH_y: $C_xH_y + a\,(O_2 + 3{,}76\,N_2) \rightarrow x\,CO_2 + \frac{y}{2}\,H_2O + 3{,}76\,a\,N_2$, con $a = x + y/4$

Exceso de aire e: O_2 aportado $= (1+e)\,a$; dosado $\phi = \dfrac{(F/A)}{(F/A)_{est}} = \dfrac{1}{1+e}$

Temperatura adiabática (sin disociación): $PCI = \sum n_i\,\bar{c}_{p,i}\,(T_{ad} - T_0)$

Poder calorífico: superior (PCS, con el agua condensada) e inferior (PCI, con el agua en vapor). Límites de inflamabilidad: entre ellos la mezcla puede arder. Combustibles líquidos se

atomizan (gotas más pequeñas se evaporan antes); los sólidos se pulverizan y desvolatilizan, y el residuo carbonoso arde en superficie.

4.2 Emisiones

- **CO_2**: proporcional al carbono del combustible; solo se reduce con eficiencia, cambio de combustible o captura.
- **CO e inquemados**: mezcla pobre en oxígeno o tiempo insuficiente.
- **NO_x**: sobre todo térmico (temperatura alta, oxígeno y tiempo). Se reduce con quemadores de bajo NO_x, combustión por etapas, recirculación de humos, premezcla pobre y, al final, SCR o SNCR (reducción con amoniaco o urea).
- **SO_x**: del azufre del combustible. Desulfuración de humos (caliza) o combustibles limpios.
- **Partículas**: filtros de mangas y electrofiltros.

> **Idea clave**
>
> Casi todas las medidas contra el NO_x bajan la temperatura de llama o el oxígeno disponible, lo que tiende a subir el CO y los inquemados: el diseño busca el punto que cumple ambos límites.

4.3 Aplicaciones industriales

Calderas, hornos, secaderos, turbinas y motores. Tendencia: sustitución por hidrógeno o biocombustibles en quemadores adaptados, electrificación cuando sea posible y recuperación del calor de humos.

5 Producción de calor y frío. Vectores energéticos

Bombas de calor (COP de calefacción $= Q_c/W$), máquinas de absorción accionadas por calor, redes de calor y frío, y almacenamiento térmico. Vectores: hidrógeno (electrólisis o reformado con captura), amoniaco, metanol y combustibles sintéticos; se comparan por densidad energética, rendimiento de la cadena y coste.

6 Cómo se evalúa

Cuatro proyectos obligatorios (15 % cada uno, nota mínima 3): diseño de un sistema térmico avanzado, combustión y su impacto ambiental, producción de calor y frío y vectores energéticos. Presentación opcional (15 %) y participación en clase (25 %) o examen en la evaluación global.