Ejercicios resueltos

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

Problema 1. Combustión de metano con exceso de aire 2
Problema 2. Rendimiento de un ciclo combinado y emisiones específicas 3
Problema 3. Penalización de la captura de CO_2 3
Problema 4. Límite de Carnot y temperatura de foco 3

Tabla de resultados **4**

Resumen

Cuatro problemas originales de órdenes de magnitud sobre combustión, ciclos y captura de CO_2. Las temperaturas adiabáticas se calculan con calores específicos medios y sin disociación, la aproximación habitual para una primera estimación. Cifras calculadas con Python.

Problema 1. Combustión de metano con exceso de aire

Enunciado

Se quema metano con un 15 % de exceso de aire. Calcula la relación aire/combustible másica, la composición de los humos (húmeda y el O_2 y CO_2 en base seca) y la temperatura adiabática de llama con reactivos a 25 °C. Datos: $PCI = 802{,}3\,\text{kJ/mol}$; $\bar{c}_p$ (kJ/mol·K): CO_2 0,0565, H_2O 0,0455, O_2 0,0365, N_2 0,0345.

Reacción por mol de CH_4 ($a = 2$, aportado $2 \cdot 1{,}15 = 2{,}3$ mol de O_2):

$$CH_4 + 2{,}3\,(O_2 + 3{,}76\,N_2) \rightarrow CO_2 + 2\,H_2O + 0{,}3\,O_2 + 8{,}648\,N_2$$

Relación aire/combustible:

$$(A/F) = \frac{2{,}3\,(32 + 3{,}76 \cdot 28{,}01)}{16{,}04} = \boxed{19{,}7} \qquad (A/F)_{est} = 17{,}1$$

Humos: 11,95 mol por mol de metano.

$$\text{húmedos: } CO_2\ 8{,}4\,\%\quad H_2O\ 16{,}7\,\%\quad O_2\ 2{,}5\,\%\quad N_2\ 72{,}4\,\%$$

$$\text{secos: } O_2 = \boxed{3{,}0\,\%} \qquad CO_2 = 10{,}1\,\%$$

El O_2 en base seca es lo que mide un analizador de humos: un 3 % corresponde a un exceso de aire del 15 %.

Temperatura adiabática:

$$\sum n_i \bar{c}_{p,i} = 1 \cdot 0{,}0565 + 2 \cdot 0{,}0455 + 0{,}3 \cdot 0{,}0365 + 8{,}648 \cdot 0{,}0345 = 0{,}4568\,\text{kJ/K}$$

$$T_{ad} = 298 + \frac{802{,}3}{0{,}4568} = \boxed{2054\,\text{K}\ (1781\,^\circ\text{C})}$$

Con disociación el valor real sería algo menor. Más exceso de aire baja la temperatura (y el NO_x térmico) pero aumenta las pérdidas por humos.

Problema 2. Rendimiento de un ciclo combinado y emisiones específicas

Enunciado

Una turbina de gas tiene un rendimiento del 38 % y el ciclo de vapor aprovecha el calor de escape con un rendimiento del 36 %. Calcula el rendimiento del combinado y las emisiones por kWh eléctrico quemando metano. Compáralo con el límite de Carnot entre 1500 °C y 25 °C.

$$\eta_{CC} = 0{,}38 + 0{,}36\,(1 - 0{,}38) = \boxed{60{,}3\,\%}$$

$$f_{CO_2,t} = \frac{44}{802{,}3}\cdot 3{,}6 = 0{,}197\,\mathrm{kg/kWh_t} \qquad f_{CO_2,e} = \frac{0{,}197}{0{,}603} = \boxed{0{,}327\,\mathrm{kg/kWh_e}}$$

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{298}{1773} = 83{,}2\,\%$$

Un ciclo Brayton ideal con relación de presiones 18 y $k = 1{,}4$ tendría $1 - 18^{-0{,}286} = 56{,}2\,\%$; combinarlo con vapor es la forma de acercarse al límite termodinámico.

Problema 3. Penalización de la captura de CO_2

Enunciado

Al combinado anterior se le añade captura postcombustión que retiene el 90 % del CO_2 y le cuesta 8 puntos de rendimiento. Calcula el CO_2 producido, capturado, emitido y evitado por kWh eléctrico y el aumento de consumo de combustible.

$$\eta = 60{,}3 - 8 = 52{,}3\,\% \qquad \text{producido} = \frac{0{,}197}{0{,}523} = 0{,}377\,\mathrm{kg/kWh_e}$$

$$\text{capturado} = 0{,}9\cdot 0{,}377 = 0{,}340\,\mathrm{kg/kWh_e} \qquad \text{emitido} = 0{,}038\,\mathrm{kg/kWh_e}$$

$$\text{evitado} = 0{,}327 - 0{,}038 = \underline{0{,}290\,\mathrm{kg/kWh_e}}\ (88{,}5\,\%) \qquad \Delta F = \frac{0{,}603}{0{,}523} - 1 = \boxed{15{,}3\,\%}$$

Se evita menos de lo que se captura porque hay que quemar un 15 % más de gas para producir el mismo kWh.

Problema 4. Límite de Carnot y temperatura de foco

Enunciado

Compara el rendimiento de Carnot con foco frío a 25 °C para un foco caliente a 600 °C (vapor ultrasupercrítico) y a 1500 °C (entrada a turbina de gas moderna). ¿Qué implica para los sistemas de muy alta temperatura?

$$\eta_C(600) = 1 - \frac{298}{873} = \underline{65{,}9\,\%} \qquad \eta_C(1500) = 1 - \frac{298}{1773} = \underline{83{,}2\,\%}$$

Subir el foco caliente amplía el techo termodinámico, pero exige materiales (superaleaciones refrigeradas, recubrimientos, cerámicas) que aguanten esas temperaturas, que es el problema central de los sistemas de muy alta temperatura.

Tabla de resultados

Problema	Bloque	Resultado principal
1	Combustión	$A/F = 19{,}7$; O_2 seco 3,0 %; $T_{ad} \approx 2054$ K
2	Ciclos	$\eta_{CC} = 60{,}3\,\%$; 0,327 kg CO_2/kWh$_e$
3	Captura	Evitado 0,290 kg/kWh$_e$; +15,3 % de combustible
4	UHTS	Carnot 65,9 % a 600 °C y 83,2 % a 1500 °C