



# OPTIMIZACIÓN TERMODINÁMICA DE MÁQUINAS TÉRMICAS

Pedro Curto-Risso, Alejandro Medina

Septiembre 2024

<https://diarium.usal.es/termodinamica/>



## ESQUEMA

- 1 DISEÑO DE SISTEMAS TÉRMICOS
- 2 DISEÑO POSIBLE, ÓPTIMO O APROXIMADAMENTE ÓPTIMO
- 3 MINIMIZACIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENTROPÍA
- 4 TERMODINÁMICA DE TIEMPOS FINITOS (TTF)
- 5 TIPOS DE SISTEMAS ANALIZABLES
- 6 ESQUEMA DEL CURSO



## ESQUEMA

- 1 DISEÑO DE SISTEMAS TÉRMICOS
- 2 DISEÑO POSIBLE, ÓPTIMO O APROXIMADAMENTE ÓPTIMO
- 3 MINIMIZACIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENTROPÍA
- 4 TERMODINÁMICA DE TIEMPOS FINITOS (TTF)
- 5 TIPOS DE SISTEMAS ANALIZABLES
- 6 ESQUEMA DEL CURSO



## DISEÑO DE SISTEMAS

- Los ingenieros no sólo deben conocer las bases científicas de su campo de trabajo, si no que deben ser capaces de **analizar y diseñar componentes y sistemas**.
- Deben ser capaces de **sintetizar un conjunto de componentes para generar un sistema**, que verifique determinadas condiciones **económicas, de eficiencia, de seguridad, de fiabilidad, de impacto ambiental, ...**
- En este curso nos ocuparemos del análisis y diseño de **sistemas térmicos**, aquéllos que interaccionan térmicamente con sus alrededores y que pueden producir un trabajo.



## SISTEMAS TÉRMICOS

- Las interacciones en los sistemas térmicos pueden incluir transferencias de calor, flujos de materia, procesos mecánicos, reacciones químicas. . .
- Aparecen en todo tipo de industrias: generación de energía eléctrica, procesado químico, sistemas de climatización. . .
- Están compuestos de compresores, bombas, turbinas, intercambiadores de calor, reactores químicos y muchos otros dispositivos.
- Estos componentes están interconectados formando redes asociadas a fluidos de trabajo, que usualmente son gases o líquidos.



## COMPONENTES Y SISTEMAS

- El diseño de sistemas térmicos tiene dos ramas: **diseño de componentes y diseño de sistemas**.
- En este curso nos vamos a ocupar esencialmente de la **evaluación y diseño de sistemas**.
- Dado un cierto conjunto de componentes con ciertas características, **evaluaremos la eficiencia, potencia...** del sistema conjunto y buscaremos métodos para optimizar esos parámetros con ciertos **criterios**: **mejor rendimiento, máxima potencia, mínima generación de polución térmica, ...**



## EFICIENCIA Y MEDIO AMBIENTE

- En los países desarrollados la **eficiencia en el uso de combustibles fósiles** y **las energías renovables** se han desarrollado mucho en las últimas décadas, pero todavía hay mucho camino por recorrer.
- En la industria, la energía es uno de los principales costes de operación, la mejora de la **competitividad** pasa por un **uso más eficiente de los recursos energéticos**.
- Pero también es básico **analizar y minimizar los residuos producidos: cantidad, composición química y polución térmica...** La mejora de la competitividad a medio y largo plazo también pasa por análisis de este tipo.
- Desde el **punto de vista termodinámico** la relación entre plantas más eficientes con una óptima utilización de las fuentes de energía y un menor impacto ambiental está ligada a conceptos como el **Segundo Principio de la Termodinámica y la Exergía**.



## ESQUEMA

- 1 DISEÑO DE SISTEMAS TÉRMICOS
- 2 DISEÑO POSIBLE, ÓPTIMO O APROXIMADAMENTE ÓPTIMO
- 3 MINIMIZACIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENTROPÍA
- 4 TERMODINÁMICA DE TIEMPOS FINITOS (TTF)
- 5 TIPOS DE SISTEMAS ANALIZABLES
- 6 ESQUEMA DEL CURSO





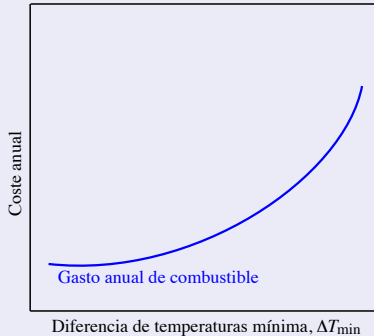
## DISEÑO POSIBLE, ÓPTIMO O APROXIMADAMENTE ÓPTIMO

- Un punto básico en el diseño de un sistema es **expresar cuál es su objetivo y hacerlo de forma cuantitativa**. Es decir, formular sus **especificaciones de diseño**.
- Un **diseño posible** es aquel que reúne todas esas especificaciones.
- De todos los diseños posibles **el óptimo es el mejor** en cuanto a su coste, tamaño, peso, fiabilidad, mantenimiento, ...
- Pero debido a la complejidad de los sistemas y a las incertidumbres en la información que se tiene de ellos, generalmente el óptimo es difícil de determinar. En cambio sí es posible aceptar **diseños aproximadamente óptimos**.  
Analicemos un ejemplo sencillo.



## INTERCAMBIADOR DE CALOR REAL

### COSTE DE COMBUSTIBLE

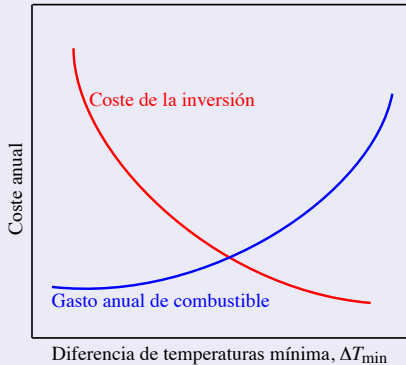


*Ingeniería Termodinámica:* la diferencia de temperaturas mínima,  $\Delta T_{\min}$ , entre las dos corrientes es una medida de la no-idealidad del intercambiador. Esta fuente de irreversibilidad penaliza el consumo de combustible. El coste energético anual es una función monótona creciente con  $\Delta T_{\min}$ .



## INTERCAMBIADOR DE CALOR REAL

### COSTE DE LA INVERSIÓN

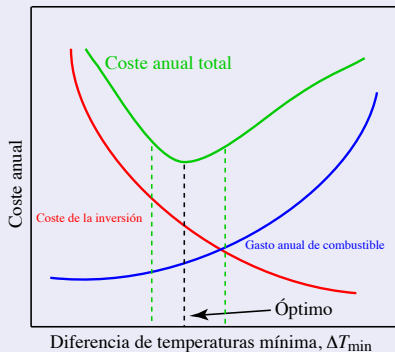


*Transferencia de calor:* para que la diferencia de temperaturas mínima,  $\Delta T_{\min}$ , sea pequeña se necesita un área de transferencia grande para transferir la misma energía. Esto eleva el coste del intercambiador. Luego el coste de la inversión es una función monótona decreciente con  $\Delta T_{\min}$ .



## INTERCAMBIADOR DE CALOR REAL

### COSTE ANUAL TOTAL



El coste anual total es la suma de la amortización de la inversión y el coste energético. Es una función de tipo parabólico con un mínimo. Si el sistema fuese sólo el propio intercambiador el **diseño óptimo** pasaría por ese mínimo, pero el sistema puede tener varios componentes y un **diseño aproximadamente óptimo** puede ser aceptable.



## COMPONENTES Y SISTEMAS

- El diseño de un sistema real suele ser mucho más complejo que este ejemplo: los costes no se pueden predecir con tanta precisión, en vez de curvas son **bandas con una cierta barra de error**.
- El coste de operación depende de los precios del combustible.
- El coste de los materiales de construcción también fluctúa.
- Y además los elementos de un sistema están interconectados. **Una rebaja de las irreversibilidades del intercambiador puede repercutir negativamente en otros elementos del sistema o en el sistema global.**
- **Una optimización individual de los componentes de un sistema no asegura un óptimo para el sistema global.**



## OPTIMIZACIÓN TERMODINÁMICA

- Los avances más significativos en el diseño de un sistema pasan por la **capacidad de elegir entre diversas configuraciones**, más que por mejorar una configuración dada.
- Aplicar un **procedimiento matemático de optimización** siempre implica un balance entre varios objetivos, que en principio se pueden elegir libremente.
- Pero este tipo de optimizaciones, aunque sean rigurosas, **sólo permiten elegir entre un abanico de posibilidades, no entre todas las posibles.**



## ESQUEMA

- 1 DISEÑO DE SISTEMAS TÉRMICOS
- 2 DISEÑO POSIBLE, ÓPTIMO O APROXIMADAMENTE ÓPTIMO
- 3 MINIMIZACIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENTROPÍA
- 4 TERMODINÁMICA DE TIEMPOS FINITOS (TTF)
- 5 TIPOS DE SISTEMAS ANALIZABLES
- 6 ESQUEMA DEL CURSO



## MINIMIZACIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENTROPÍA

- La *Minimización de la Generación de Entropía* es un método de optimización de sistemas reales en los que hay procesos irreversibles asociados a transferencias de calor y de masa y flujos de fluidos.
- En gran medida estas irreversibilidades están asociadas a que los procesos tienen lugar en sistemas con un tamaño finito y en un tiempo finito.
- Se trata de analizar las irreversibilidades que afectan a cualquier sistema real, analizar la generación de entropía y minimizarla.
- La *Termodinámica de Tiempos Finitos* es un campo dentro de la optimización termodinámica con una forma de proceder propia.





## ESQUEMA

- 1 DISEÑO DE SISTEMAS TÉRMICOS
- 2 DISEÑO POSIBLE, ÓPTIMO O APROXIMADAMENTE ÓPTIMO
- 3 MINIMIZACIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENTROPÍA
- 4 TERMODINÁMICA DE TIEMPOS FINITOS (TTF)
- 5 TIPOS DE SISTEMAS ANALIZABLES
- 6 ESQUEMA DEL CURSO



## TERMODINÁMICA DE TIEMPOS FINITOS (TTF)

### METODOLOGÍA

- **Modelizar** las ligaduras espacio-temporales asociadas a las diferentes **fuentes de irreversibilidad** mediante un conjunto (reducido) de parámetros.
- Elegir un conjunto de **parámetros y variables** con los que trabajar: de **diseño y de operación**.
- Analizar la **sensibilidad** del sistema a esas variables. Señalar las más significativas.
- **Optimizar una (o varias!) funciones objetivo** con respecto de las variables del problema.
- Seleccionar los **estados óptimos** del dispositivo que sean más adecuados respecto de la optimización planteada.



## ESQUEMA

- 1 DISEÑO DE SISTEMAS TÉRMICOS
- 2 DISEÑO POSIBLE, ÓPTIMO O APROXIMADAMENTE ÓPTIMO
- 3 MINIMIZACIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENTROPÍA
- 4 TERMODINÁMICA DE TIEMPOS FINITOS (TTF)
- 5 TIPOS DE SISTEMAS ANALIZABLES
- 6 ESQUEMA DEL CURSO



## 1 Sistemas macroscópicos

Motores térmicos, frigoríficos y bombas

Ciclos termodinámicos: Carnot, Otto y Diesel, Brayton, Rankine, Stirling. . .

Aplicaciones en generación de energía eléctrica en **plantas de gas, de vapor, nucleares, energía solar. . .**

## 2 Sistemas mesoscópicos

Sistemas *brownianos*, rectificadores mecánicos y eléctricos (*Ratchets de Feynman y Sokolov*), motores moleculares.

**Músculos, fotosíntesis. . .**

## 3 Sistemas microscópicos

Motores y frigoríficos cuánticos, *quantum dots*. . .

**Encriptación cuántica. . .**



## ESQUEMA

- 1 DISEÑO DE SISTEMAS TÉRMICOS
- 2 DISEÑO POSIBLE, ÓPTIMO O APROXIMADAMENTE ÓPTIMO
- 3 MINIMIZACIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENTROPÍA
- 4 TERMODINÁMICA DE TIEMPOS FINITOS (TTF)
- 5 TIPOS DE SISTEMAS ANALIZABLES
- 6 ESQUEMA DEL CURSO



- 1 Segundo Principio de la Termodinámica y reversibilidad
- 2 Motores tipo Carnot endorreversibles e irreversibles. Criterios de optimización
- 3 Optimización de turbinas de gas tipo Brayton
- 4 Termodinámica de Tiempos Finitos aplicada a ciclos tipo Otto
- 5 Simulación cuasi-dimensional de un motor tipo Otto
- 6 Aplicaciones en energía solar térmica
- 7 Almacenamiento térmico de energía



## BIBLIOGRAFÍA

- A. Bejan, *Entropy Generation Minimization*, CRC Press (2013).
- A. Bejan, G. Tsatsaronis y M. Moran, *Thermal Design and Optimization*, Wiley (1996).
- S. Sieniutycz y P. Salamon, Eds., *Finite-Time Thermodynamics and Thermoeconomics*, Taylor and Francis, New York (1990).
- M.J. Moran, H.N. Shapiro, D.D. Boettner, and M.B. Bailey, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, Wiley (2020).



FIN