

Módulo 3

Producción de calor

Parte del paquete educativo SHaKE sobre sistemas de calefacción y refrigeración urbanos

EJERCICIOS PRÁCTICOS Y CASOS PRÁCTICOS

Actividades de aprendizaje aplicado sobre tecnologías de producción de calor en la calefacción urbana

Instituciones responsables: UJI y BME
Erasmus+ KA220-HED: Asociaciones de cooperación en la educación superior
Versión: 1.1
Fecha: mayo de 2026

<https://www.shakeproject-dhc.eu/>



En primer lugar se presentan los ejercicios, seguidos de las soluciones correspondientes al final de la sección. Solo se resuelven los problemas que requieren una respuesta cuantitativa o analítica.

Sección 1. Aprovechamiento del calor residual y bombas de calor

Todos los ejercicios son obligatorios

Ejercicio 1. Clasifica las siguientes corrientes de calor residual según su nivel de temperatura y su origen:

- a) Gases de escape a 550 °C procedentes de un horno de cemento
- b) Agua de refrigeración procedente de un enfriador industrial a 35 °C
- c) Gases de escape de un centro de datos a 60 °C
- d) Gases de combustión de una caldera a 200 °C

Indica la tecnología de recuperación adecuada para cada uno.

Ejercicio 2. Selección de un intercambiador de calor

Dado un proceso industrial que libera 4 000 kg/h de aire caliente a 180 °C, diseñe un intercambiador de calor aire-aire adecuado para precalentar el aire entrante de 20 °C a 120 °C. Suponga que el calor específico del aire es de 1,005 kJ/kg·K y que la eficiencia es del 85 %.

Calcule:

- a) La tasa de transferencia de calor necesaria ($\dot{Q}$)
- b) Las temperaturas de entrada y salida
- c) El tipo de intercambiador recomendado y su justificación

Ejercicio 3. Cálculo del COP de una bomba de calor

Una bomba de calor extrae calor de un flujo de residuos a 35 °C y suministra calor a un proceso a 65 °C. Supón que se aplica el COP ideal de Carnot.

Calcula:

- a) El COP de Carnot para la calefacción
- b) Si el COP real es el 60 % del valor de Carnot, ¿cuál es el COP real?
- c) ¿Cuánta potencia eléctrica se necesita para suministrar 20 kW de calefacción?

Ejercicio 4. Eficiencia del ciclo de Rankine

Se utiliza un ciclo de Rankine de vapor para recuperar el calor residual de los gases de combustión a 450 °C. El vapor entra en la turbina a 40 bar y 400 °C y se condensa a 0,1 bar.

Calcula:

- a) La eficiencia térmica del ciclo (Rankine ideal)
- b) Compáralo con un sistema que utilice un ciclo ORC con una temperatura de fuente inferior, de 150 °C.
- c) Explica en qué casos es preferible el ciclo ORC.



Ejercicio 5. Integración de una bomba de calor

Diseña un esquema de conexión (dibújalo y descríballo) para integrar una bomba de calor con una fuente de calor residual industrial utilizando una configuración indirecta con un depósito de almacenamiento. Explica:

- a) Las ventajas de este diseño
- b) La estrategia de control para la variación de la oferta y la demanda de calor

Sección 2. Cogeneración (CHP)

Ejercicio 1. Cálculo de la eficiencia de la cogeneración

Una unidad de cogeneración produce 500 kW de electricidad y 800 kW de energía térmica. El consumo de combustible es de 1750 kW.

Calcula:

- a) La eficiencia eléctrica
- b) la eficiencia térmica
- c) La eficiencia global
- d) La relación calor-electricidad (C/E)

Ejercicio 2. Factor de carga y horas de funcionamiento

Un sistema de cogeneración tiene una potencia instalada de 1,2 MW de electricidad y funciona 6 800 horas al año.

Calcula:

- a) La generación anual de electricidad
- b) El factor de carga
- c) Compara el rendimiento con el de una central similar que funciona 4.000 horas al año.

Ejercicio 3. Dimensionamiento de un sistema de cogeneración

Se le ha encargado dimensionar un sistema de cogeneración para un hospital que requiere una carga base de 800 kW térmicos y 400 kW eléctricos.

Calcula:

- a) El tamaño recomendado de la unidad de cogeneración
- c) Si es más adecuado un ciclo de cabeza o de cola
- d) Proponer sistemas de respaldo para la demanda térmica máxima en invierno

Ejercicio 4. Análisis del ciclo termodinámico

Dibuja un esquema simplificado de una planta de cogeneración de ciclo de cabeza que utilice una turbina de gas. Indica:



- a) Motor primario
- b) Generador de vapor de recuperación de calor (HRSG)
- c) Generador
- d) Intercambiador de calor a la red de calefacción urbana
- e) Calcula el rendimiento teórico máximo suponiendo que:

Eficiencia de la turbina = 38 %

Eficiencia de recuperación térmica del HRSG = 45 %

Ejercicio 5. Integración en la red de calefacción urbana

Dada una red de calefacción urbana (DHN) que abastece a un distrito con una demanda térmica máxima de 4 MW y una demanda media de 2,5 MW, diseñe una solución basada en la cogeneración:

- a) Determina la capacidad adecuada
- b) Determine si debe incluirse almacenamiento térmico
- c) Esboce la integración con la red de calefacción urbana y describa las estrategias de control para el funcionamiento a carga parcial

Sección 3. Aspectos económicos y medioambientales

Ejercicio 1. Cálculo del LCOH

Calcule el coste nivelado de la calor (LCOH) para un sistema con:

- 1. Inversión inicial: 400 000 €
- 2. Gastos anuales de funcionamiento y mantenimiento: 15 000 €
- 3. Coste anual de combustible: 20 000 €
- 4. Producción de calor anual: 1 500 MWh
- 5. Vida útil: 20 años
- 6. Tasa de descuento: 5 %

Utiliza la fórmula del módulo y expresa el resultado en €/MWh.

Ejercicio 2. Comparación de emisiones de gases de efecto invernadero

Compara las emisiones de CO₂ de:

- a) Un sistema de cogeneración de gas natural que produce 1 000 MWh de calor y 600 MWh de electricidad al año (factor de emisión del gas natural: 0,202 kg de CO₂/kWh)
- b) Un sistema de bomba de calor (COP = 3,5) alimentado con electricidad de la red (factor de emisión de la red: 0,110 kg de CO₂/kWh)

Calcula:



1. Las emisiones totales de CO₂ de ambos sistemas
2. ¿Qué sistema es más respetuoso con el medio ambiente?

Ejercicio 3. Periodo de amortización

La instalación de una nueva bomba de calor supone un ahorro anual de 25 000 € en comparación con la caldera de gas anterior. La inversión total es de 135 000 €.

Calcula:

- a) El periodo de amortización simple
- b) El retorno de la inversión (ROI) si los costes de mantenimiento anuales son de 2.000 €

Ejercicio 4. Evaluación del impacto medioambiental a lo largo del ciclo de vida

Compara el impacto medioambiental (cualitativo) a lo largo del ciclo de vida de los siguientes sistemas:

- a) Cogeneración con gas natural
- b) Bomba de calor geotérmica
- c) Caldera de biomasa

Utiliza criterios como:

1. Emisiones de gases de efecto invernadero
2. Contaminantes atmosféricos
3. Consumo de agua
4. Impacto en el mantenimiento y el funcionamiento

Ejercicio 5. Análisis de escenarios políticos

Supongamos que el impuesto sobre el carbono aumenta de 40 a 100 euros por tonelada de CO₂. Analiza el impacto en:

- a) Los sistemas de cogeneración de gas natural
- b) Las bombas de calor eléctricas (COP = 4,0)

Supongamos que la intensidad de carbono actual de la electricidad es de 100 g de CO₂/kWh, y la del gas, de 202 g de CO₂/kWh.

Comenta cómo afecta esto a la competitividad económica de cada sistema.



Casos prácticos

Selecciona solo una sección de tu elección para realizar el trabajo (es obligatorio realizar un caso práctico)

1. Aprovechamiento del calor residual y bombas de calor

Título del caso práctico: Singapur – Sistema de refrigeración urbana del distrito industrial de Ang Mo Kio

Clima: tropical-húmedo

Referencia del proyecto: SP Group y STMicroelectronics, Ang Mo Kio TechnoPark

Tarea:

1. Descripción general del sistema: Investigar el sistema de refrigeración urbana del TechnoPark de STMicroelectronics (que entrará en funcionamiento en 2025) y su integración con las cargas industriales y comerciales.
2. Modos de funcionamiento: Describir cómo se utilizan las enfriadoras centrales y cómo se equilibran las cargas de refrigeración entre los edificios.
3. Análisis de eficiencia: Calcular el ahorro anual de electricidad (~20 %) y la reducción de emisiones de carbono (~120 000 toneladas de CO₂ al año).
4. Integración industrial: Examinar cómo se reutilizan las superficies liberadas en las azoteas (p. ej., paneles solares, reducción de PFC).
5. Factores climáticos: Analizar los efectos de la humedad tropical en el dimensionamiento del sistema, su funcionamiento y la disipación de calor.

Entrega:

Un informe de entre 4 y 6 páginas con un análisis del perfil de carga, un resumen de costes y beneficios y un diagrama esquemático.

2. Cogeneración (CHP)

Título del estudio de caso: Riad, Arabia Saudí – Proyecto piloto de refrigeración por absorción impulsada por energía solar

Clima: Cálido-árido

Referencia del proyecto: Enfriador de absorción solar de LiBr de 10 MW simulado para Riad con colectores solares al vacío

Encargo:

1. Descripción del diseño: Detallar la arquitectura: campo solar térmico, almacenamiento de agua caliente, enfriador de absorción LiBr/H₂O, red de agua refrigerada.
2. Rendimiento térmico: Simular o calcular la fracción solar (~86 %) y la potencia de refrigeración del sistema durante los meses de mayor calor del verano.



3. COP y comparación: Comparar el COP de la absorción con el de los enfriadores eléctricos; analizar las ventajas en escenarios sin conexión a la red o con limitaciones de suministro eléctrico.
4. Uso del agua y del suelo: Evaluar el consumo de agua y la huella de suelo en un contexto árido.
5. Estrategias de resiliencia: Evaluar la incorporación de almacenamiento de energía térmica o elementos de refrigeración pasiva.

Resultado:

Informe técnico detallado que incluya un diagrama P-T, los parámetros de dimensionamiento del sistema y el balance entre la energía solar y la energía consumida.

3. Aspectos económicos y medioambientales de las redes de calefacción urbana con producción de calor

Título del estudio de caso: Islas Baleares, España – Refrigeración urbana potenciada con energía solar térmica

Clima: mediterráneo

Referencia del proyecto: Caso de Moia-Pol et al. sobre la integración de la energía solar térmica en sistemas de calefacción urbana con biomasa

Encargo:

1. Contexto del sistema: Describir una planta híbrida de calefacción y refrigeración urbana (DHC) que utilice energía solar térmica, una caldera de biomasa, un enfriador de absorción y una red de agua refrigerada.
2. Modos de funcionamiento: Explica cómo el calor solar impulsa el enfriador de absorción en las temporadas intermedias y cómo los enfriadores eléctricos cubren las cargas máximas en verano.
3. Energía y emisiones: Calcula la proporción de energía solar, el ahorro de combustible y la reducción de CO₂ utilizando los valores facilitados o balances simplificados de masa y energía.
4. Análisis estacional: Analizar el rendimiento a lo largo de las estaciones: calefacción en invierno frente a refrigeración en verano.
5. Tecnologías complementarias: Proponer medidas de bajo consumo energético (por ejemplo, sombreado dinámico, almacenamiento térmico) adecuadas para las condiciones climáticas de las Islas Baleares.

Entregable:

Informe técnico con gráficos de rendimiento estacional, tendencias del COP, integración esquemática y estimación del balance de carbono.



Soluciones sugeridas para los ejercicios

Sección 1. Aprovechamiento del calor residual y bombas de calor

Ejercicio 1.

- a) Alto (proceso industrial), ciclo de Rankine
- b) Bajo (equipos de servicios públicos), bomba de calor de fuente de agua
- c) Baja (infraestructura informática), bomba de calor con fuente de agua
- d) (servicios de combustión), economizador

Ejercicio 2.

- a) 111,66 kW
- b) 20 °C y 120 °C
- c) Recomendación: intercambiador de calor aire-aire de placas con aletas o una unidad de carcasa y tubos de contracorriente con tubos aletados.

Justificación: El aire tiene una conductividad térmica y una capacidad calorífica por unidad de volumen muy bajas. Las aletas son necesarias para aumentar la superficie y potenciar el bajo coeficiente de transferencia de calor por convección en aplicaciones de gas a gas. La configuración de contracorriente favorece una alta eficiencia ($\epsilon = 0,85$).

Ejercicio 3.

- a) 11,27
- b) 6,76
- c) 2,96 kW

Ejercicio 4.

- a) 35,3 %
- b) Un ciclo ORC que funciona con una temperatura de fuente inferior a 150 °C utiliza fluidos de trabajo orgánicos (por ejemplo, refrigerantes o hidrocarburos) con puntos de ebullición más bajos que el agua. Su rendimiento térmico es menor, normalmente en torno al 10 %-15 %.
- c) Se prefiere el ciclo ORC a los ciclos de vapor estándar cuando la temperatura de la fuente de calor residual es baja o media (<200 °C), ya que el agua requeriría un vacío o produciría vapor de densidad extremadamente baja, lo que exigiría equipos enormes y poco rentables. Los sistemas ORC también funcionan de forma segura a presiones más bajas y evitan la erosión de los álabes de la turbina causada por las gotas de humedad.

Ejercicio 5.

- a) Desacoplamiento: Desacopla la disponibilidad de calor residual de los tiempos de funcionamiento de la bomba de calor.



Reducción de picos: El depósito de almacenamiento actúa como amortiguador térmico, atenuando los picos de temperatura o las fluctuaciones del caudal másico del proceso industrial, lo que garantiza un funcionamiento estable de la bomba de calor.

Dimensionamiento de los componentes: Permite reducir el tamaño del compresor de la bomba de calor, ya que este puede funcionar de forma continua a cargas medias en lugar de tener que adaptarse a picos térmicos transitorios.

b) Un variador de frecuencia (VFD) en los circuitos de la bomba controla el caudal de fluido en función del perfil de temperatura del depósito tampón. Si disminuye el suministro de calor residual industrial, la bomba de calor reduce su capacidad o recurre a la energía almacenada en el depósito. Si la temperatura del depósito de almacenamiento alcanza un umbral mínimo crítico, se activa un bypass o una fuente de calor auxiliar de respaldo.

Sección 2. Cogeneración (CHP)

Ejercicio 1.

- a) 28,57 %
- b) 45,71 %
- c) 74,28 %
- d) 1,6

Ejercicio 2. Factor de carga y horas de funcionamiento

- a) 8 169 MWh/año
- b) 77,62 %
- c) Factor de carga del 45,66 % frente al 77,62 %. La central de 6 800 horas distribuye sus elevados costes de capital fijo entre casi el doble de producción energética, lo que se traduce en un retorno de la inversión (ROI) mucho más rápido y una mayor viabilidad económica.

Ejercicio 3.

- a) 600 kW_e/800 kW_{th}
- c) Altura de caída
- d) Una caldera de gas natural para cargas máximas, acoplada a un depósito de agua de almacenamiento de energía térmica sensible para aprovechar los excedentes térmicos fuera de las horas punta.

Ejercicio 4.

65,9 %

Ejercicio 5. Integración en la red de calefacción urbana

- a) Dimensionar la planta de cogeneración para que se ajuste a la demanda térmica media de 2,5 MW_{th}. Esto garantiza una alta utilización de la capacidad y horas de funcionamiento continuas, dejando que los 1,5 MW restantes de demanda máxima sean cubiertos por calderas de gas.



b) Sí, debe incluirse el almacenamiento térmico. Esto permite que la central de cogeneración funcione a plena carga durante los periodos de baja demanda térmica (almacenando el exceso de agua caliente), en lugar de reducir la potencia y pasar a un funcionamiento a carga parcial, que resulta ineficiente.

c) Integración: Conectar la central de cogeneración en configuración en serie/paralelo como fuente principal de carga base en la línea de retorno de la red de calefacción urbana, con las calderas de punta situadas aguas abajo en la línea de suministro.

Estrategias de control: Para caídas de carga menores, utilizar la recarga del almacenamiento térmico. Si la demanda cae por debajo del paso de modulación mínimo del motor (normalmente el 50 % de la capacidad nominal), cambiar a ciclos intermitentes de encendido/apagado o pasar por completo al modo de descarga del almacenamiento térmico.

Sección 3. Aspectos económicos y medioambientales

Ejercicio 1.

44,73 €/MWh

Ejercicio 2. Comparación de emisiones de GEI

404 000 kgCO₂ , 31 428 kgCO₂ Bomba de calor

Ejercicio 3. Periodo de amortización

5,4 años

17,04 %

Ejercicio 4. Evaluación del impacto del ciclo de vida

Tecnología	Emisiones de gases de efecto invernadero	Contaminantes atmosféricos (NOx, SOx, PM)	Consumo de agua	Riesgos de mantenimiento y funcionamiento
a) Cogeneración a gas	Medio-alto (combustibles fósiles, CO ₂ local).	Emisiones locales medias (NOx).	Mínimo.	Se requieren revisiones mecánicas periódicas del motor.
b) Bomba de calor geotérmica	Bajo (depende de la composición de la red eléctrica).	Nulas en el punto de uso.	Insignificante (circuito cerrado).	Bajo mantenimiento, riesgo de fugas de refrigerante.
c) Caldera de biomasa	Neutro en carbono (biogénico), pero con elevadas emisiones logísticas.	Altos niveles locales de partículas (PM) y NOx.	Mínimo.	Elevado; requiere gestión de las cenizas y del almacenamiento de combustible.

Ejercicio 5. Análisis de escenarios políticos

a) Aumenta el coste operativo del combustible en más de 12 €/MWh



b) Aumento del coste operativo del combustible superior a 1,5 €/MWh

El aumento del impuesto sobre el carbono altera el panorama financiero a favor de la bomba de calor eléctrica. La penalización aplicada a la combustión de gas natural es ocho veces mayor por unidad de calor suministrada en comparación con la bomba de calor, lo que acelera la eliminación gradual de las unidades de cogeneración alimentadas con combustibles fósiles en favor de las redes térmicas electrificadas.