

Cuestiones y problemas resueltos de Ingeniería Térmica

**Gabriela Bracho León | Francisco José Arnau Martínez
Santiago A. Molina Alcaide | Vicente Dolz Ruiz**

Cuestiones y problemas resueltos de Ingeniería Térmica

Gabriela Bracho León
Santiago A. Molina Alcaide

Francisco José Arnau Martínez
Vicente Dolz Ruiz



Universitat Politècnica de València

Colección *Académica* http://tiny.cc/edUPV_aca

Para referenciar esta publicación utilice la siguiente cita:

Bracho León, Gabriela; Arnau Martínez, Francisco José; Molina Alcaide, Santiago A.; Dolz Ruiz; Vicente (2023). *Cuestiones y problemas resueltos de Ingeniería Térmica*. Valencia: edUPV

© Gabriela Bracho León
Francisco José Arnau Martínez
Santiago A. Molina Alcaide
Vicente Dolz Ruiz

© 2023, edUPV
Venta: www.lalibreria.upv.es / Ref.: 0340_10_01_01

ISBN: 978-84-1396-143-9

Depósito Legal: V-1153-2023

Imprime: Byprint Percom, S. L.

Si el lector detecta algún error en el libro o bien quiere contactar con los autores, puede enviar un correo a edicion@editorial.upv.es

edUPV se compromete con la ecoimpresión y utiliza papeles de proveedores que cumplen con los estándares de sostenibilidad medioambiental
<https://editorialupv.webs.upv.es/compromiso-medioambiental/>

La Editorial UPV autoriza la reproducción, traducción y difusión parcial de la presente publicación con fines científicos, educativos y de investigación que no sean comerciales ni de lucro, siempre que se identifique y se reconozca debidamente a la Editorial UPV, la publicación y los autores. La autorización para reproducir, difundir o traducir el presente estudio, o compilar o crear obras derivadas del mismo en cualquier forma, con fines comerciales/lucrativos o sin ánimo de lucro, deberá solicitarse por escrito al correo edicion@editorial.upv.es

Impreso en España

Prólogo

Este libro presenta una colección de cuestiones y problemas resueltos cuidadosamente seleccionados por los autores, relacionados con los aspectos fundamentales de los mecanismos de transmisión de calor. Tiene como objetivo, por un lado, reforzar los conceptos de los alumnos en las carreras de Ingeniería y, por otro, mostrar la aplicación práctica de dichos conceptos.

El libro está estructurado en cinco capítulos. En los primeros dos capítulos se plantean problemas referidos a los mecanismos básicos de transmisión de calor: conducción y convección en el primero y radiación en el segundo. El capítulo tres se centra en intercambiadores de calor y el cuarto en problemas de aplicación a ciclos frigoríficos. Finalmente, el último capítulo se focaliza en problemas de aplicación general, incluyendo algunos de conducción de calor en transitorios térmicos.

El libro que tengo la satisfacción de prologar es fruto de la motivación docente de cuatro profesores del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos que he dirigido durante los últimos cuatro años, y constituye un aporte más a las publicaciones docentes que lleva a cargo el Departamento. Confío en que sea de utilidad para toda la comunidad universitaria y en particular para nuestros estudiantes de Ingeniería.

Vicente Macián Martínez
Catedrático de Universidad
Departamento de Máquinas y Motores Térmicos
Universitat Politècnica de València

Introducción

La Ingeniería Térmica se dedica a estudiar los distintos mecanismos de transferencia de calor presentes en numerosas aplicaciones industriales y en la vida cotidiana, así como el análisis de intercambiadores de calor y de sistemas de producción de frío. Como ingenieros, es importante comprender los mecanismos físicos de los diferentes modos de transferencia de calor, así como aprender a usar las ecuaciones que cuantifican la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo. Actualmente la ingeniería trata de resolver problemas asociados con la producción y conversión de energía, donde la transferencia de calor es un tema crucial para abordar una amplia gama de desafíos tecnológicos y ambientales. El objetivo de este texto es presentar una colección de ejercicios donde se resuelven cuestiones y problemas relacionados con los modos de transferencia de calor, mediante el desarrollo de expresiones para calcular los flujos de calor y potencias térmicas, entre otros.

El libro que se presenta está basado en la experiencia profesional y docente de los autores en asignaturas de Ingeniería Térmica, Termodinámica, Mecánica de Fluidos y Máquinas Térmicas impartidas en varios campos de la ingeniería como son las titulaciones de Ingeniería Mecánica, Ingeniería Aeroespacial, Ingeniería Industrial e Ingeniería Electrónica Industrial y Automática de la Universitat Politècnica de València y se ha redactado con la intención de que sea útil en cualquier otro curso relacionado con esta ciencia. El texto presenta una serie de casos prácticos que surgen en la industria y que su resolución requiere de la aplicación de los fundamentos de la transmisión de calor. Se incluyen ejemplos y problemas que motiven a los alumnos con aplicaciones interesantes, pero cuyas soluciones se basen firmemente en principios funda-

mentales. Las resoluciones de las cuestiones planteadas siguen una metodología rigurosa y sistemática, de tal manera que el texto sirva como un recurso valioso y cotidiano para estudiantes e ingenieros en ejercicio a lo largo de sus carreras.

Para facilitar el seguimiento del libro, este se estructura en bloques temáticos. Cada bloque presenta una batería de cuestiones y problemas que van aumentando su complejidad progresivamente, para favorecer el proceso de aprendizaje. En el primer bloque se estudiarán las tres formas de transmisión de calor: conducción, convección y radiación. En el segundo bloque, se profundizará en los intercambiadores de calor, tanto desde un punto de vista de análisis como desde el dimensionamiento de los mismos. En el último bloque se presentarán las máquinas de refrigeración, centrándose en el análisis energético de las máquinas frigoríficas por compresión de un vapor.

Cada Bloque se divide en capítulos donde el primer capítulo contiene cuestiones y problemas de la **transmisión de calor por conducción y convección** en diferentes geometrías, tanto pared plana, así como en conductos de sección transversal circular, típicos de tuberías y cableado. El segundo capítulo se centra en la **transmisión de calor por radiación**, con diversas aplicaciones industriales, desde un colector solar y el efecto de la radiación en el calentamiento de un horno, hasta la pérdida de calor por radiación en un turbogrupo para automoción. El tercer capítulo se basa en el planteamiento y resolución de problemas relacionados con **intercambiadores de calor** utilizando diferentes métodos como el de la Diferencia de Temperaturas Media Logarítmica (DTML) y el de la Eficiencia - Número de Unidades de Transferencia (NTU). En el capítulo 4 se resuelven ejemplos de **máquinas frigoríficas y de bomba de calor**, de ciclos reales simples, dobles, compuestos y con diferentes fluidos refrigerantes. El quinto y último capítulo presenta **aplicaciones reales** donde se presentan problemas transitorios, donde la variación de temperatura cambia con el tiempo, así como otros ejemplos que aplican simultáneamente dos o más conceptos que se resolvieron de manera más aislada en los bloques anteriores.

La combinación de los bloques dan como resultado un texto compuesto por una colección de cuestiones y problemas, que refuerzan desde un punto de vista práctico los conceptos relacionados con el estudio de la ingeniería térmica y de la termodinámica.

Índice general

Prólogo	iii
Introducción	v
Índice general	vii
Tabla de símbolos	ix
1 Transmisión de calor por conducción y por convección	1
1.1 Pérdidas de calor en conductos de calefacción	1
1.2 Pérdidas de calor en una casa de campo	4
1.3 La placa plana y sus condiciones de contorno	6
1.4 Pérdidas de calor en el conducto de un evaporador	10
1.5 Conducción de calor en un cable eléctrico	13
1.6 Convección de calor a partir de la fuerza aerodinámica en el ala de un UAV	18
1.7 Oleoducto del canal de la Mancha	21
2 Transmisión de calor por radiación	25
2.1 Tuaregs por el desierto	25
2.2 Colector solar	32
2.3 Calentamiento de los coches al sol	39
2.4 Calentamiento de un horno	44
2.5 Funcionamiento de una vitrocerámica	47
2.6 Radiación en la playa	55
2.7 Radiación en un turbogruppo	58

3	Intercambiadores de calor	69
3.1	Método DTML	69
3.2	Método de la ε - NTU	74
3.3	Dimensionamiento aplicando los dos métodos	79
3.4	Evaporador de una máquina de refrigeración	84
3.5	Refrigerador de aceite	89
3.6	Calentador de agua	97
3.7	Intercambiador de flujo cruzado con aletas	103
3.8	Condensador de agua	113
4	Refrigeración y bombas de calor	121
4.1	Ciclo de refrigeración real	121
4.2	Nevera y congelador con un solo compresor	126
4.3	Sistema de doble compresión	131
4.4	Refrigeración mediante ciclo compuesto	137
4.5	Refrigeración con amoníaco	143
4.6	Máquina frigorífica	149
4.7	Ciclo de refrigeración de un avión	153
5	Aplicaciones	159
5.1	Transitorio suponiendo resistencia interna despreciable	159
5.2	Convección natural y radiación	168
5.3	Cocción de un solomillo	173
5.4	Chip con disipador	179
5.5	Calefacción del despacho en una fábrica	187
5.6	Transitorio suponiendo resistencia interna despreciable	193
5.7	El secadero de baldosas	201
	Bibliografía	211

Tabla de símbolos

Latinos

A	Área	m^2
C	Capacidad calorífica	W/K
c_p	Calor específico a presión constante	$J/(kg\ K)$
c_v	Calor específico a volumen constante	$J/(kg\ K)$
D	Diámetro	m
E	Potencia emisiva	W/m^2
F	Factor de corrección en intercambiadores	--
	Fuerza	N
f	Factor de fricción	--
g	Aceleración de la gravedad	m/s^2
G	Radiación incidente	W/m^2
h	Entalpía específica	J/kg
	Coefficiente de película	$W/(m^2\ K)$
h_{vap}	Calor latente de vaporización	J/kg
J	Radiosidad	W/m^2
k	Conductividad térmica	$W/(m\ K)$
L	Longitud	m
m	Masa	kg
\dot{m}	Gasto másico	kg/s
p	Presión	bar, Pa
P	Perímetro	m
Q	Calor	J
q''	Flujo de calor	J/m^2

\dot{Q}	Potencia calorífica	W
\dot{q}''	Potencia calorífica por unidad de área	W/m ²
r	Radio	m
R	Constante particular del gas	J/(kg K)
t	Tiempo	s
T	Temperatura	°C, K
u	Energía interna específica	J/kg
	Velocidad	m/s
V	Volumen	m ³
\dot{V}	Gasto volumétrico	m ³ /s
v	Volumen específico	m ³ /kg

Griegos

α	Difusividad térmica	m ² /s
	Absortividad	--
β	Coefficiente de dilatación	1/K
ε	Eficiencia de un intercambiador	--
	Emisividad	--
η	Rendimiento	--
ρ	Densidad	kg/m ³
μ	Viscosidad dinámica	kg/(m s)
ν	Viscosidad cinemática	m ² /s
σ	Constante de Stefan-Boltzmann (5.67 · 10 ⁻⁸)	W/(m ² K ⁴)

Números adimensionales

Bi	Número de Biot
Gr	Número de Grashof
Nu	Número de Nusselt
Pr	Número de Prandtl
Ra	Número de Rayleigh
Re	Número de Reynolds

Subíndices y superíndices

<i>atm</i>	Atmosférico
<i>c</i>	Caliente, compresor
<i>cc</i>	Contra corriente
<i>ex</i>	Exterior
<i>en</i>	Entrada
<i>f</i>	Frío
<i>in</i>	Interior

<i>l</i>	Líquido
<i>m</i>	media
<i>sa</i>	Salida
<i>v</i>	Vapor
<i>t</i>	Transversal, tubo, turbina
<i>tot</i>	Total

Siglas

DTML	Diferencia de temperaturas media logarítmica	°C, K
COP	Coefficiente de rendimiento	
NTU	Número de unidades de Transferencia	

Capítulo 1

Transmisión de calor por conducción y por convección

1.1 Pérdidas de calor en conductos de calefacción

Un conducto de calefacción de $l = 10$ m de largo y sección cuadrada de lado $a = 20$ cm es instalado en un falso techo de un edificio de viviendas. El aire caliente entra en el conducto a $p_{en} = 1$ bar y $T_{en} = 70$ °C y con una velocidad promedio de $u = 2$ m/s. A la salida del conducto, antes del difusor del techo, se mide una temperatura de $T_{sa} = 45$ °C. Considerando despreciables las pérdidas de presión en el conducto. Se pide:

1. Las pérdidas de calor en el conducto.
2. El coste por hora de esta pérdida de calor. Considerando que la casa está calefactada por una caldera de gas natural que tiene un rendimiento del $\eta = 85$ % y que el coste del gas natural es de 0.06 €/kWh.

Propiedades

Se asumirán condiciones estacionarias en el problema y el aire como gas ideal. La constante del aire R se supondrá de $287 \text{ J}/(\text{kg K})$. Las condiciones del aire serán evaluadas a la temperatura promedio es decir $(70+45)/2= 57.5^\circ\text{C}$ a esta temperatura, se puede obtener que el $c_p = 1.008 \text{ kJ}/(\text{kg K})$. Nótese que el calor específico es una magnitud física que se define como la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia para elevar su temperatura en una unidad. Así, en unidades del Sistema Internacional, el calor específico se expresa en $\text{kJ}/(\text{kg K})$ y estas serán las unidades utilizadas en este libro. Sin embargo, en algunos casos esta magnitud viene expresada en $\text{kJ}/(\text{kg }^\circ\text{C})$, ya que en este caso, al ser una magnitud definida a partir de un incremento de temperaturas es equivalente referirse a $^\circ\text{C}$ o K .

Solución:

Apartado 1

Considerando condiciones estacionarias, el calor transmitido a través de las paredes del conducto se puede estimar como:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$$

Donde \dot{m} es el flujo másico de aire y ΔT es la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del conducto. Así, para poder calcular el calor transmitido, se debe determinar previamente el flujo másico como:

$$\dot{m} = \rho \cdot u \cdot A$$

Donde ρ sería la densidad promedio y u la velocidad promedio del flujo de aire que circula por la sección del conducto A . Considerando condiciones a la entrada del conducto se tiene:

$$\rho = \frac{p}{R \cdot T} = \frac{100\,000}{287 \cdot (70 + 273)} = 1.016 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$A = a^2 = 0.2^2 = 0.04 \text{ m}^2$$

Con lo cual, el flujo másico se puede calcular como:

$$\dot{m} = 1.016 \cdot 2 \cdot 0.04 = 0.0813 \text{ kg/s}$$

y el calor transmitido por las paredes del conducto, será:

$$\dot{Q} = 0.0813 \cdot 1.008 \cdot (70 - 45) = 2.049 \text{ kW}$$

Apartado 2

El coste por hora de la energía perdida por transmisión de calor es:

$$\frac{\dot{Q} \cdot \text{coste}}{\eta} = \frac{2.049 \cdot 0.06}{0.85} = 0.145 \text{ €/h}$$

Esto significa que se pierden algo más de 14 céntimos por hora debido a las pérdidas de calor en las conducciones. Considerando que la calefacción funciona 14 horas al día durante 120 días al año, se puede obtener la estimación del coste de las pérdidas de calor anuales de 244€. Parte de estas pérdidas podrían ahorrarse mejorando el aislamiento del conducto.

1.2 Pérdidas de calor en una casa de campo

Una casa de campo de madera calefactada eléctricamente tiene una planta rectangular de 8 m por 10 m. La casa tiene un techo plano de 20 cm de espesor y cuatro paredes, que conforman la fachada exterior de la casa, con alturas de 2.5 m y espesores de 30 cm. Tanto el techo como las paredes han sido contruidos con madera de roble de conductividad térmica $k = 0.16 \text{ W}/(\text{m K})$. Considerando despreciables las pérdidas de calor por el suelo, que la temperatura en las superficies interiores de las paredes y techo de la casa es de $T_{in} = 17^\circ\text{C}$ y la temperatura de las superficies exteriores es de $T_{ex} = 2^\circ\text{C}$. Se pide calcular, durante el período nocturno de 11 h:

1. Las pérdidas de calor a la atmósfera durante la noche.
2. El coste económico de esta pérdida de calor. Considerando que el coste de la electricidad es de 0.07 €/kWh .

Propiedades

Se asumirán condiciones estacionarias en el problema, con lo cual el valor de la conductividad térmica se puede asumir constante y de valor $k = 0.16 \text{ W}/(\text{m K})$.

Solución:

Apartado 1

Todo el calor será transmitido a través del techo y paredes por conducción, siendo:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{pa} + \dot{Q}_{te} = k \cdot A_{pa} \frac{T_{in} - T_{ex}}{e_{pa}} + k \cdot A_{te} \frac{T_{in} - T_{ex}}{e_{te}}$$

Donde el subíndice *pa* denota condiciones de pared, el subíndice *te* denota condiciones de techo, A es el área por la que se transmite el calor y e es el espesor de techo y paredes. Sustituyendo valores, se puede obtener:

$$\dot{Q} = 0.16 \cdot (2 \cdot 8 + 2 \cdot 10) \cdot 2.5 \frac{17 - 2}{0.3} + 0.16 \cdot (8 \cdot 10) \frac{17 - 2}{0.2} = 1680 \text{ W}$$

Apartado 2

La energía perdida durante el período nocturno se puede calcular como:

$$Q = \dot{Q} \cdot \Delta t = 1680 \cdot 11 = 18\,480 \text{ Wh} = 18.48 \text{ kWh}$$

Con lo cual, el coste de la energía perdida por transmisión de calor durante el período nocturno es:

$$Q \cdot \text{coste} = 18.48 \cdot 0.07 = 1.29 \text{ €}$$

Esto significa que se pierden algo más de un euro por noche. Mejorar el aislamiento térmico de paredes y techo o disminuir la temperatura de la calefacción durante la noche serían dos acciones que reducirían este coste.

1.3 La placa plana y sus condiciones de contorno

Obtener la distribución de temperaturas en una placa plana de anchura y longitud infinitas, de espesor e y conductividad térmica k . Considerando las siguientes condiciones de contorno:

1. Flujo de calor entrante por la cara a de la placa conocido (\dot{q}_a) y temperatura de la placa en la cara a conocida (T_a).
2. Flujo de calor entrante por la cara a de la placa conocido (\dot{q}_a) y temperatura de la placa en la cara b conocida (T_b).
3. Temperatura de la placa en la cara a conocida (T_a) y temperatura de la placa en la cara b conocida (T_b).
4. Flujo de calor entrante por la cara a de la placa conocido (\dot{q}_a) y flujo de calor saliente por la cara b de la placa conocido (\dot{q}_b)

Propiedades

Se asumirán condiciones estacionarias en el problema y que el flujo de calor es unidimensional. Se considerará el valor de la conductividad térmica como constante y que no existe generación de calor dentro de la placa. En este problema, se considerará el eje x de coordenadas como perpendicular a la superficie de la placa y con su origen en la cara a de ésta.

Solución:

Apartado 1

La ecuación de la conducción de calor para el caso de flujo de calor unidimensional, con conductividad térmica constante y sin generación de calor en una placa plana, se puede expresar como:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0$$

Integrando esta ecuación, se puede obtener:

$$\frac{dT}{dx} = C_1$$

Donde C_1 es una constante de integración. Integrando de nuevo esta ecuación, se puede obtener la ecuación de la distribución de temperaturas dentro de la placa:

$$T(x) = C_1 \cdot x + C_2$$

Donde C_2 es otra constante de integración. Así, en el caso de la condición de contorno de flujo de calor entrante por la cara a ($x=0$) de la placa conocido (\dot{q}_a), se tiene:

$$\frac{dT}{dx} = C_1 \quad \text{como} \quad -k \frac{dT(0)}{dx} = \dot{q}_a \quad \Rightarrow \quad \dot{q}_a = -k \cdot C_1 \quad \Rightarrow \quad C_1 = -\frac{\dot{q}_a}{k}$$

y en el caso de temperatura de la placa en la cara a ($x=0$) conocida (T_a), se tiene:

$$T(x) = C_1 \cdot x + C_2 \quad \text{como} \quad T(0) = T_a \quad \Rightarrow \quad T_a = C_1 \cdot 0 + C_2 \quad \Rightarrow \quad C_2 = T_a$$

Sustituyendo valores, se obtiene la ecuación de la distribución de temperaturas en la placa.

$$T(x) = -\frac{\dot{q}_a}{k} \cdot x + T_a$$

Apartado 2

En este caso, para la condición de contorno de flujo de calor entrante por la cara a ($x=0$) de la placa conocido (\dot{q}_a), se llega a la misma conclusión que en el apartado anterior:

$$\frac{dT}{dx} = C_1 \quad \text{como} \quad -k \frac{dT(0)}{dx} = \dot{q}_a \quad \Rightarrow \quad \dot{q}_a = -k \cdot C_1 \quad \Rightarrow \quad C_1 = -\frac{\dot{q}_a}{k}$$

y en el caso de temperatura de la placa en la cara b ($x=e$) conocida (T_b), se tiene:

$$T(x) = C_1 \cdot x + C_2 \quad \text{como} \quad T(e) = T_b \quad \Rightarrow \quad T_b = C_1 \cdot e + C_2 \quad \Rightarrow \quad C_2 = T_b - C_1 \cdot e$$

$$\text{como } C_1 = -\frac{\dot{q}_a}{k} \Rightarrow C_2 = T_b + \frac{\dot{q}_a \cdot e}{k}$$

Sustituyendo valores, se obtiene la ecuación de la distribución de temperaturas en la placa.

$$T(x) = -\frac{\dot{q}_a}{k} \cdot x + T_b + \frac{\dot{q}_a \cdot e}{k}$$

Apartado 3

Como se calculó anteriormente para la condición de contorno de temperatura de la placa en la cara a ($x=0$) conocida (T_a), se tiene:

$$T(x) = C_1 \cdot x + C_2 \quad \text{como } T(0) = T_a \Rightarrow T_a = C_1 \cdot 0 + C_2 \Rightarrow C_2 = T_a$$

y en el caso de temperatura de la placa en la cara b ($x=e$) conocida (T_b), e imponiendo la condición de contorno anterior ($C_2 = T_a$) se tiene:

$$T(x) = C_1 \cdot x + C_2 \quad \text{como } T(e) = T_b \quad \text{y } C_2 = T_a \Rightarrow T_b = C_1 \cdot e + T_a \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C_1 = \frac{T_b - T_a}{e}$$

Sustituyendo valores, se obtiene la ecuación de la distribución de temperaturas en la placa.

$$T(x) = \frac{T_b - T_a}{e} \cdot x + T_a$$

Apartado 4

En este caso, para la condición de contorno de flujo de calor entrante por la cara a ($x=0$) de la placa conocido (\dot{q}_a), se llega a la misma conclusión que en los apartados anteriores:

$$\frac{dT}{dx} = C_1 \quad \text{como} \quad -k \frac{dT(0)}{dx} = \dot{q}_a \quad \Rightarrow \quad \dot{q}_a = -k \cdot C_1 \quad \Rightarrow \quad C_1 = -\frac{\dot{q}_a}{k}$$

y en el caso de flujo de calor saliente por la cara b de la placa conocido (\dot{q}_b), se tiene:

$$\frac{dT}{dx} = C_1 \quad \text{como} \quad -k \frac{dT(e)}{dx} = \dot{q}_b \quad \Rightarrow \quad \dot{q}_b = -k \cdot C_1 \quad \Rightarrow \quad C_1 = -\frac{\dot{q}_b}{k}$$

En este caso como la constante C_1 no puede tener dos valores diferentes solo existe solución si $\dot{q}_a = \dot{q}_b$. Esta conclusión es lógica, ya que al no tener generación de calor en la placa y estar en un flujo de calor estacionario, todo el flujo de calor que entra por la cara a debe salir por la cara b . Así, en el caso de considerar el flujo de calor constante en toda la placa ($\dot{q} = \dot{q}_a = \dot{q}_b$), se obtiene:

$$T(x) = -\frac{\dot{q}}{k} \cdot x + C_2$$

Obteniendo una ecuación con infinitas soluciones, ya que C_2 puede tener cualquier valor. Para poder fijar cuanto vale este valor se debería establecer la temperatura en algún punto de la pared, como sucedía en los casos anteriores del problema.

**Para seguir leyendo, inicie el
proceso de compra, click aquí**