

ÍNDICE

<i>Prólogo</i>	17
Tema 1. INTRODUCCIÓN Y CONCEPTOS BÁSICOS EN TRANSMISIÓN DE CALOR	21
1. Introducción	23
2. Conceptos básicos en transmisión de calor	24
3. Mecanismos de transmisión de calor	26
3.1. Transmisión de calor por conducción	26
3.1.1. Ley de Fourier	26
3.1.2. Conductividad térmica	28
3.2. Transmisión de calor por convección	28
3.2.1. Ley de enfriamiento de Newton	28
3.2.2. Coeficiente de transmisión de calor por convección o coeficiente de película	29
3.3. Transmisión de calor por radiación	30
3.3.1. Ley de Stefan-Boltzmann	30
3.3.2. Intercambio de calor por radiación entre una superficie gris pequeña y otra superficie mucho más grande que la envuelve	31
4. Propiedades térmicas de los materiales	33
4.1. Conductividad térmica	33
4.1.1. Conductividad térmica de los materiales homogéneos	34
4.1.2. Conductividad térmica aparente de los materiales no homogéneos	38
4.2. Calor específico	38
4.3. Difusividad térmica	40
4.4. Coeficiente de dilatación térmica (sólo líquidos y gases)	40
4.5. Viscosidad (sólo líquidos y gases)	41

5.	Ecuación general de la conducción del calor	44
5.1.	Ecuación general de la conducción del calor en coordenadas cartesianas	45
5.1.1.	Particularización para medios homogéneos e isotrópos: ecuación de Fourier-Biot	47
5.1.2.	Particularización para medios homogéneos e isotrópos y condiciones de estado estacionario: ecuación de Poisson	47
5.1.3.	Particularización para medios homogéneos e isotrópos, sin generación de energía: ecuación de difusión	48
5.1.4.	Particularización para medios homogéneos e isotrópos, condiciones de estado estacionario y sin generación de energía	48
5.2.	Ecuación general de la conducción del calor en coordenadas cilíndricas	49
5.3.	Ecuación general de la conducción del calor en coordenadas esféricas	50
6.	Ejercicios de autocomprobación	51
7.	Solución a los ejercicios de autocomprobación	52
Tema 2. TRANSMISIÓN DE CALOR POR CONDUCCIÓN		55
1.	Introducción	57
2.	Conducción de calor a través de una pared plana	58
2.1.	Pared plana simple con temperaturas superficiales dadas	58
2.1.1.	Distribución de temperaturas	59
2.1.2.	Flujo de calor	60
2.2.	Pared plana compuesta bañada por fluidos a temperaturas conocidas	61
2.3.	Coeficiente global de transmisión de calor	63
3.	Conducción de calor a través de una pared cilíndrica	63
3.1.	Pared cilíndrica simple con temperaturas superficiales dadas ...	64
3.1.1.	Distribución de temperaturas	64
3.1.2.	Flujo de calor	65
3.2.	Pared cilíndrica compuesta bañada por fluidos a temperaturas dadas	66
3.3.	Coeficiente global de transmisión de calor	68

4.	Conducción del calor en superficies extendidas: aletas	68
4.1.	Clasificación de las aletas	69
4.2.	Ecuación general de transmisión de calor en una aleta	71
4.3.	Aleta anular de perfil rectangular uniforme	73
4.3.1.	Solución a la ecuación general: distribución de temperaturas y flujo de calor	73
4.3.2.	Efectividad de la aleta anular de perfil rectangular	75
4.3.3.	Gráficos para el cálculo de la eficiencia de la aleta anular de perfil rectangular	76
4.3.4.	Flujo de calor no despreciable en el extremo	77
4.4.	Coeficiente global de transmisión de calor en tubos aleteados y aletas del tipo de aletas anulares de perfil rectangular uniforme ..	78
5.	Ejercicios de autocomprobación	81
6.	Solución a los ejercicios de autocomprobación	83
7.	Anexo 1: Valores seleccionados de las funciones modificadas de Bessel de primera y segunda especie, órdenes cero y uno	89
8.	Anexo 2: Efectividad de la aleta anular	91
 <i>Tema 3. TRANSMISIÓN DE CALOR POR CONVECCIÓN</i>		93
1.	Introducción	95
2.	Conceptos básicos en transmisión de calor por convección	95
2.1.	Capa límite de velocidad y capa límite térmica	97
2.2.	Convección libre y convección forzada	98
2.3.	Flujo laminar y flujo turbulento	99
3.	Ecuaciones para la transferencia de calor por convección	100
3.1.	Deducción de las ecuaciones diferenciales para la transferencia de calor por convección	100
3.1.1.	Ecuación de conservación de masa	101
3.1.2.	Ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento	103
3.1.3.	Ecuación de conservación de la energía	106
3.1.4.	Ecuación de estado térmico	108
3.2.	Ecuaciones y números adimensionales para la transmisión de calor por convección	108
3.2.1.	Número de Reynolds	110
3.2.2.	Número de Grashof	111
3.2.3.	Número de Eckert	111

3.2.4.	Número de Prandtl	112
3.2.5.	Número de Rayleigh	113
4.	Correlaciones para la convección forzada en régimen laminar y turbulento	113
4.1.	Convección forzada en el interior de tuberías y tubos cilíndricos ...	114
4.1.1.	Flujo laminar	115
4.1.2.	Flujo turbulento	116
4.2.	Convección forzada, flujo externo que incide perpendicularmente a un conducto circular	119
4.3.	Convección forzada, flujo externo paralelo a superficies planas	121
4.3.1.	Flujo laminar	121
4.3.2.	Flujo turbulento	122
5.	Correlaciones para la convección libre en régimen laminar y turbulento ..	122
5.1.	Convección libre alrededor de superficies planas/cilindros verticales	123
5.1.1.	Flujo laminar	124
5.1.2.	Flujo turbulento	125
5.2.	Convección libre alrededor de placas horizontales	125
5.2.1.	Placa caliente por la cara superior/placa fría por la cara inferior	126
5.2.2.	Placa caliente por la cara inferior/placa fría por la cara superior	127
5.3.	Convección libre alrededor de cilindros horizontales largos ...	128
6.	Ejercicios de autocomprobación	129
7.	Solución a los ejercicios de autocomprobación	131

Tema 4. TRANSMISIÓN DE CALOR EN LOS CAMBIOS DE ESTADO: CONDENSACIÓN Y EBULLICIÓN 137

1.	Introducción	139
2.	Conceptos básicos de transmisión de calor en la condensación y en la ebullición	140
2.1.	Ecuaciones y números adimensionales utilizados en la condensación y ebullición	140
2.1.1.	Número de Nusselt	141
2.1.2.	Número de Prandtl	141
2.1.3.	Número de Jakob	142
2.1.4.	Número de Bond	142

2.2.	Modos de condensación: condensación por gotas y condensación en película	143
2.3.	Modos de ebullición: ebullición en estanque o en alberca y ebullición en convección forzada	144
3.	Correlaciones para la transferencia de calor en la condensación en película	145
3.1.	Condensación en película sobre placas verticales y cilindros verticales	145
3.1.1.	Definiciones previas en la condensación en película sobre placas verticales/cilindros verticales	145
3.1.2.	Régimen laminar	150
3.1.3.	Régimen turbulento	152
3.2.	Condensación en película sobre placa horizontal	153
3.3.	Condensación en película en el exterior de esferas y cilindros horizontales	154
4.	Correlaciones para la transferencia de calor en la ebullición en estanque o de alberca	156
4.1.	Regímenes de la ebullición en estanque	157
4.1.	Flujo de calor en la zona de ebullición nucleada	160
4.2.	Flujo calorífico máximo (crítico)	162
4.3.	Flujo de calor en la zona de ebullición en película	163
5.	Ejercicios de autocomprobación	165
6.	Solución a los ejercicios de autocomprobación	167
Tema 5. CÁLCULO Y DISEÑO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR		175
1.	Introducción	177
2.	Tipos de intercambiadores de calor	177
2.1.	Intercambiadores de calor de superficie	180
2.1.1.	Intercambiador de calor de flujos paralelos	180
2.1.2.	Intercambiador de calor de flujos cruzados	184
3.	Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor	186
3.1.	Cálculo del coeficiente global teórico de transferencia de calor .	186
3.2.	Cálculo del coeficiente global real de transferencia de calor ...	189
4.	Análisis de un intercambiador de calor con el método de la diferencia media de temperaturas (<i>LMTD method</i>)	190
4.1.	Diferencia de temperaturas logarítmico media en un cambiador de flujo paralelo en equicorriente	192
4.2.	Diferencia de temperaturas logarítmico media en un cambiador de flujo paralelo en contracorriente	194

4.3.	Diferencia de temperatura media en cambiadores multipaso y de flujos cruzados	196
4.4.	Diferencia de temperatura media en condiciones especiales de operación	202
4.5.	Metodología de cálculo de un intercambiador de calor con el método de la diferencia media de temperaturas (<i>LMTD method</i>) ..	203
4.6.	Metodología LMTD para el caso de que uno de los fluidos experimente un cambio de estado	211
5.	Análisis de un intercambiador de calor con el método de la efectividad-número de unidades de transmisión ($\epsilon - NTU$ method)	214
5.1.	Parámetros adimensionales utilizados en el método del número de unidades de transmisión	215
5.2.	Metodología de cálculo en el método del número de unidades de transmisión	223
6.	Ejercicios de autocomprobación	224
7.	Solución a los ejercicios de autocomprobación	233
Tema 6. MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS. GENERALIDADES		235
1.	Introducción	237
2.	Concepto de máquina térmica	238
2.1.	Clasificación de las máquinas de fluido	238
2.2.	Distinción entre máquina hidráulica y máquina térmica	239
2.3.	Clasificación de las máquinas térmicas	240
3.	Motores térmicos de combustión interna y de combustión externa. Distinción entre máquina térmica y motor térmico	241
4.	Rendimiento de los motores térmicos	247
4.1.	Rendimiento del ciclo y rendimiento de la instalación	247
4.2.	Rendimiento exergético	248
5.	Cogeneración	249
6.	Campos de aplicación de los motores térmicos	251
Tema 7. GENERALIDADES DE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS		259
1.	Componentes y procesos básicos de un motor de combustión interna alternativo	262

2.	Clasificación de los MCIA	265
2.1.	Según el proceso de combustión	265
2.2.	Según el modo de realizar el ciclo	267
2.3.	Según el tipo de refrigeración	272
2.4.	Según la presión de admisión	273
2.5.	Según el número y disposición de cilindros	273
3.	Evolución del fluido de trabajo durante el funcionamiento del motor. Diagrama $p-\alpha$ y diagrama del indicador	274
3.1.	Diagrama $p-\alpha$	274
3.2.	Diagrama del indicador	276
4.	Prestaciones y curvas características del motor	278
5.	Ciclos de aire equivalente	292
5.1.	Ciclo de aire equivalente de volumen constante	292
5.2.	Ciclo de aire equivalente de presión limitada	300
Tema 8. TURBINAS DE GAS		317
1.	Introducción	319
2.	Tipos de instalaciones	320
3.	Análisis termodinámico de los ciclos de aire ideales	327
3.1.	Ciclo Brayton ideal de aire simple	327
3.2.	Ciclo Brayton ideal de aire regenerativo	330
3.3.	Ciclo ideal compuesto	333
4.	Elección de los parámetros que definen del ciclo termodinámico de una turbina de gas	336
4.1.	Ciclo simple	338
4.2.	Ciclo simple regenerativo	345
4.3.	Ciclo compuesto	350
4.4.	Ciclo compuesto regenerativo	359
5.	Comportamiento de las turbinas de gas en el punto de diseño	360
Tema 9. INSTALACIONES DE POTENCIA BASADAS EN TURBINAS DE VAPOR Y PLANTAS DE CICLO COMBINADO GAS-VAPOR		363
1.	Componentes principales de las instalaciones de potencia basadas en turbinas de vapor	366

2.	Influencia de los parámetros termodinámicos de las centrales de ciclo de vapor	380
2.1.	Influencia de la presión del vapor a la entrada de la turbina ...	380
2.2.	Influencia de la temperatura del vapor vivo	382
2.3.	Influencia de la presión de condensación	383
3.	Ciclos de vapor utilizados en grandes centrales de vapor	384
3.1.	Ciclos de vapor con recalentamiento intermedio	384
3.2.	Ciclos de vapor regenerativos	386
4.	Turbinas de vapor en usos industriales	396
4.1.	Cogeneración con plantas de ciclo de vapor	397
4.1.1.	Turbinas con toma intermedia	397
4.1.2.	Turbinas de contrapresión	398
5.	Definición y clasificación de las calderas	399
5.1.	Calderas de tubos de humo o pirotubulares	401
5.2.	Calderas de tubos de agua o acuotubulares	403
5.3.	Procesos que tienen lugar en las calderas	406
5.3.1.	Proceso de combustión	406
5.3.2.	Mecanismos de transferencia de calor entre el gas y el agua	407
5.4.	Diseño de calderas y generadores de vapor	408
5.4.1.	Parámetros y fundamentos del diseño de las calderas	408
5.4.2.	Balance de energía	411
5.4.3.	Otras consideraciones y especificaciones de los diseños	412
6.	Plantas de ciclo combinado de turbinas de gas y de vapor	417
6.1.	Definición y clasificación de los ciclos combinados	417
6.2.	Esquema general de una planta de ciclo combinado de turbina de gas y de vapor	421
6.3.	Características de las turbinas de gas	422
6.4.	Caldera de recuperación de calor	425
6.5.	Características del ciclo de vapor	430

Tema 10. CONCEPTOS BÁSICOS GENERALES SOBRE TURBOMÁQUINAS TÉRMICAS

1.	Ecuación fundamental de las turbomáquinas	452
2.	Análisis del intercambio energético que tiene lugar en las turbomáquinas	458
3.	Estructura de las turbomáquinas térmicas	461

4.	Clasificación de las turbomáquinas térmicas	462
5.	Aplicación de las ecuaciones y conceptos anteriores a turbinas y compresores. Tipos de escalonamientos	466
5.1.	Turbomáquinas térmicas axiales	466
5.1.1.	Turbinas axiales de reacción	468
5.1.2..	Turbinas axiales de acción	471
5.1.3.	Turbocompresores axiales	473
5.2.	Turbomáquinas radiales	479
5.2.1.	Turbinas centrípetas	480
5.2.2.	Turbocompresores centrífugos	480
6.	Criterios que se utilizan para definir el rendimiento de las turbomáquinas térmicas	484
7	Origen de las pérdidas en las turbomáquinas	487
8.	Potencia interna y potencia efectiva	488
9.	Campos de aplicación de las turbinas axiales y de las turbinas centrípetas	489
10.	Comparación entre compresores axiales, centrífugos y volumétricos ...	489
<i>Anexo.</i>	PROCESOS EN FLUIDOS COMPRESIBLES	491
A.1.	Introducción.....	493
A.2.	Procesos termodinámicos de importancia en el estudio de las máquinas y los motores térmicos	495
A.3.	Principios y ecuaciones que rigen el comportamiento de los flujos compresibles	498
A.3.1.	Principio de conservación de la masa	499
A.3.2.	Primer Principio de la Termodinámica	499
A.3.3.	Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento .	501
A.3.4.	Segundo Principio de la Termodinámica	502
A.3.5.	Exergía y balance energético	503
A.3.6.	Ecuaciones de Gibbs	506
A.3.7.	Ecuaciones calóricas	507
A.3.8.	Trabajo intercambiado con el entorno	508
A.4.	El Factor de Carnot. Rendimiento máximo de los motores térmicos	513
A.5.	Expansión y compresión en conductos, toberas y difusores	516
A.5.1.	Efecto de la compresibilidad	516
A.5.2.	Forma del conducto en toberas y difusores	517

A.5.3. Evaluación de las pérdidas en toberas y difusores	519
A.5.3.1. Comparación de los casos de expansión y compresión	520
A.5.3.2. Coeficientes para evaluar la fricción en toberas y difusores	523
BIBLIOGRAFÍA	525

Tema 1

Introducción y conceptos básicos en transmisión de calor

María José Montes Pita

Universidad Nacional de Educación a Distancia

1. Introducción.
2. Conceptos básicos en transmisión de calor.
3. Mecanismos de transmisión de calor.
 - 3.1. Transmisión de calor por conducción.
 - 3.1.1. Ley de Fourier.
 - 3.1.2. Conductividad térmica.
 - 3.2. Transmisión de calor por convección.
 - 3.2.1. Ley de enfriamiento de Newton.
 - 3.2.2. Coeficiente de transmisión de calor por convección o coeficiente de película.
 - 3.3. Transmisión de calor por radiación.
 - 3.3.1. Ley de Stefan-Boltzmann.
 - 3.3.2. Intercambio de calor por radiación entre una superficie gris pequeña y otra superficie mucho más grande que la envuelve.
4. Propiedades térmicas de los materiales.
 - 4.1. Conductividad térmica.
 - 4.1.1. Conductividad térmica de los materiales homogéneos.
 - 4.1.2. Conductividad térmica aparente de los materiales no homogéneos.
 - 4.2. Calor específico.
 - 4.3. Difusividad térmica.

- 4.4. Coeficiente de dilatación térmica (sólo líquidos y gases).
- 4.5. Viscosidad (sólo líquidos y gases).
- 5. Ecuación general de la conducción del calor.
 - 5.1. Ecuación general de la conducción del calor en coordenadas cartesianas.
 - 5.1.1. Particularización para medios homogéneos e isotrópicos: ecuación de Fourier-Biot.
 - 5.1.2. Particularización para medios homogéneos e isotrópicos y condiciones de estado estacionario: ecuación de Poisson.
 - 5.1.3. Particularización para medios homogéneos e isotrópicos, sin generación de energía: ecuación de difusión.
 - 5.1.4. Particularización para medios homogéneos e isotrópicos, condiciones de estado estacionario y sin generación de energía.
 - 5.2. Ecuación general de la conducción del calor en coordenadas cilíndricas.
 - 5.3. Ecuación general de la conducción del calor en coordenadas esféricas.
- 6. Ejercicios de autocomprobación.
- 7. Solución a los ejercicios de autocomprobación.

1. INTRODUCCIÓN

La termodinámica enseña que la energía se puede transferir entre un sistema y su entorno en forma de calor o de trabajo. Para que exista una transmisión de calor entre dos sistemas ha de existir una diferencia de temperatura entre ambos, cesando dicha transmisión cuando se alcanza el equilibrio térmico.

El primer principio de la termodinámica permite cuantificar la cantidad de energía que se transmite de un sistema a otro. Y el segundo principio establece que la transmisión de calor se produce en el sentido de las temperaturas decrecientes.

Sin embargo, la termodinámica estudia los estados inicial y final del proceso durante el que ocurre la interacción, y no el proceso en sí. El objetivo de este capítulo y de los siguientes es ampliar el análisis termodinámico a través del estudio de los modos y de la velocidad de la transferencia de calor.

La transferencia de calor tiene un papel muy importante en la industria, desde los procesos asociados a la generación de energía térmica (combustión fósil, fusión y fisión nuclear, calderas de biomasa, hornos solares, etc.) hasta todos los procesos para su aprovechamiento o transformación en otro tipo de energía, pasando por el diseño de intercambiadores de calor, condensadores, calderas, turbinas, etc.

En este capítulo se da una visión general de los tres modos de transmisión de calor que existen: conducción, convección y radiación. Posteriormente se explican las propiedades térmicas más importantes de los materiales. Y se finaliza con una introducción al siguiente capítulo, que es la obtención de la ecuación general de la conducción del calor.

Palabras clave: calor, temperatura, conducción, convección, radiación, conductividad térmica, coeficiente de película, calor específico, difusividad térmica, coeficiente de dilatación térmica.

2. CONCEPTOS BÁSICOS EN TRANSMISIÓN DE CALOR

1. El contenido energético de un sistema (Q , E ó U) es la cantidad de energía que tiene el sistema.

Para este curso, se empleará como notación del contenido energético la letra Q (aunque a veces también pueda aparecer la letra E o la letra U).

Las unidades empleadas para el contenido energético son: julio (J) en el Sistema Internacional (SI); caloría (cal) en el Sistema Técnico (ST). La relación entre ambas unidades es la siguiente:

$$1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J} \leftrightarrow 1 \text{ J} = 0.2388 \text{ cal}$$

También es habitual emplear como unidad de energía el kWh, siendo:

$$1 \text{ kWh} = 3\,600\,000 \text{ J}$$

2. La velocidad de transferencia de calor o calor es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas entre distintas partes de un sistema, entre dos sistemas o entre un sistema y su entorno.

La notación empleada para designar el calor es: $\dot{Q}$.

Las unidades empleadas para el calor son unidades de energía/tiempo: vatios ($W = J/s$) en el SI; kcal/h en el ST. La relación entre ambas unidades es la siguiente:

$$1 \text{ kcal/h} = 4180 \text{ J} / 3600 \text{ s} = 1.16 \text{ W}$$

Los **modos** de producirse la transmisión de calor son:

- **Conducción:** mecanismo de transferencia de energía en el interior de un sistema o entre dos sistemas, que tiene lugar por el intercambio de energía cinética entre las partículas que lo(s) constituyen.
- **Convección:** mecanismo de transferencia calorífica que tiene lugar en el seno de un fluido, debido fundamentalmente a los movimientos de masa del mismo.
- **Radiación:** proceso de emisión de la energía interna de un sistema por medio de ondas electromagnéticas (o fotones).

Sobre estos modos de transmisión de calor se hablará en el siguiente apartado.

3. Flujo de calor: es la energía transmitida por unidad de tiempo y por unidad de longitud, superficie o volumen.

En general, la notación empleada para designar el flujo de calor es:

A veces se puede hacer distinción entre:

$\dot{q}' (W/m)$: flujo de calor por unidad de longitud.

$\dot{q}'' (W/m^2)$: flujo de calor por unidad de superficie.

$\dot{q}''' (W/m^3)$: flujo de calor por unidad de volumen.

Pero en general, para este curso se empleará indistintamente, indicando si está referido a unidad de longitud, superficie o volumen.

4. La temperatura en los distintos puntos de un sistema: es una función de la posición del punto considerado y del tiempo, función que puede ser representada mediante un campo escalar de la forma:

$$t = t(\vec{r}, \tau)$$

donde:

$\vec{r}$ (m): vector de posición en un punto genérico del sistema

t (°C): temperatura

τ (s): tiempo

La isoterma es el lugar geométrico de los puntos del sistema que poseen una misma temperatura, t_0 , en un instante determinado, τ_0 .

Notas varias:

- En general, para este curso, el tiempo se designará con la letra τ . La temperatura en la escala Celsius (°C) se designará con una t minúscula. Y la temperatura absoluta (K) se designará con T mayúscula.
- Se aconseja trabajar siempre en el SI de unidades.
- Al trabajar con radiación térmica, las temperaturas son temperaturas absolutas y van en kelvin (K).

3. MECANISMOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR

Como se ha visto en el apartado anterior, existen tres modos de transmisión de calor, que son:

- Conducción
- Convección
- Radiación

A continuación, se definen y enumeran las características principales de cada modo de transmisión de energía. Es posible cuantificar los procesos de transmisión de calor mediante ecuaciones o modelos, que sirven para calcular la energía que se transfiere por unidad de tiempo. Como se verá, cada modo de transmisión de calor tiene asociadas sus propias leyes que permiten cuantificar el fenómeno que se está estudiando.

3.1. Transmisión de calor por conducción

La conducción es el mecanismo de transferencia de energía térmica entre dos sistemas mediante intercambio de energía cinética por choques moleculares, movimiento de electrones libres o vibración de la red cristalina.

La conducción se caracteriza porque se da dentro de los límites de un cuerpo o en la separación entre dos cuerpos. Y porque no se registra desplazamiento apreciable de la materia que lo constituye.

3.1.1. Ley de Fourier

La ley de Fourier es una ley empírica que se utiliza para cuantificar la transmisión de calor por conducción: *El flujo de calor por unidad de superficie, que se transmite por conducción desde un punto P de un material, es directamente proporcional al gradiente de temperatura en dicho punto P, en la dirección de la normal, n:*

$$\dot{q} \left(W/m^2 \right) \propto \frac{dt}{dn} \rightarrow \dot{q} \left(W/m^2 \right) = -k \cdot \frac{dt}{dn} \quad (1.1)$$

El signo menos indica que el flujo de calor va de la zona de más temperatura a la zona de menos temperatura.

La constante de proporcionalidad entre el flujo de calor y el gradiente de temperaturas se denomina **conductividad térmica** y depende directamente del tipo de material a través del cual se produce la transmisión de calor. De acuerdo con la ecuación (1.1), la conductividad térmica tiene las siguientes unidades: W/m/°C.

En el apartado 4.1 se estudiará con más detalle la conductividad térmica. Existen valores tabulados de conductividad térmica, algunos de los cuales aparecen en el libro de tablas que se va a utilizar para este curso.

Se observa en la ecuación (1.1) que el flujo de calor está referido al gradiente de temperaturas en la dirección del vector normal. El flujo de calor también se puede escribir en forma vectorial, adoptando la ecuación de Fourier la siguiente expresión alternativa:

$$\vec{q} = -k \cdot \nabla t \quad (1.2)$$

Siendo ∇ : el operador nabla tridimensional

t : el campo escalar de temperaturas.

En coordenadas cartesianas:

$$\vec{q} = -k \cdot \nabla t(x, y, z) = -k \cdot \left(\vec{i} \cdot \frac{\partial t}{\partial x} + \vec{j} \cdot \frac{\partial t}{\partial y} + \vec{k} \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \right) \quad (1.3)$$

Y por componentes:

$$\vec{q} = (\vec{i} \cdot \dot{q}_x + \vec{j} \cdot \dot{q}_y + \vec{k} \cdot \dot{q}_z) \quad (1.3 \text{ bis})$$

donde:

$$\begin{aligned} \dot{q}_x &= -k \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \\ \dot{q}_y &= -k \cdot \frac{\partial t}{\partial y} \\ \dot{q}_z &= -k \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \end{aligned} \quad (1.3 \text{ bis})$$

Esta ley se desarrollará en el apartado 5 al hablar de la ecuación general de la transmisión de calor por conducción.

3.1.2. Conductividad térmica

La conductividad térmica es una propiedad física del material que expresa «la mayor o menor facilidad que posee un medio para transmitir el calor por conducción».

En medios homogéneos e isótropos, la densidad de flujo de calor y el gradiente de temperatura son vectores colineales, en cada punto del medio y en cada instante, por lo que la conductividad térmica es una magnitud escalar.

Se hablará más detalladamente de la conductividad térmica en el apartado 4 de este capítulo.

3.2. Transmisión de calor por convección

La convección es el mecanismo de transferencia de calor que tiene lugar en el seno de un fluido, debido a la difusión de energía, tanto por el movimiento molecular aleatorio, como sobre todo por el movimiento global de masa del fluido.

Características de la transmisión de calor por convección:

1. El proceso real de transmisión de energía es la conducción, pero la energía se desplaza de un punto a otro por el desplazamiento macroscópico del mismo fluido.
2. Consiste en un transporte simultáneo de masa y de energía, que precisa de la existencia de un medio fluido. No hay convección en sólidos, sólo en líquidos y gases.
3. Los procesos de convección se suelen basar en correlaciones empíricas que se estudiarán en los capítulos 3 y 4 del presente curso.

3.2.1. Ley de enfriamiento de Newton

La ley de enfriamiento de Newton es una ley empírica que se refiere a la convección entre la superficie de un sólido y el fluido que la rodea: *El flujo de calor por unidad de superficie que se transmite por convección entre una superficie y un*

fluido a distinta temperatura, es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas entre la superficie y el fluido:

$$\dot{q} \left(\text{W/m}^2 \right) \propto (t_s - t_f) \rightarrow \dot{q} \left(\text{W/m}^2 \right) = h \cdot (t_s - t_f) \quad (1.4)$$

3.2.2. Coeficiente de transmisión de calor por convección o coeficiente de película

La constante de proporcionalidad entre el flujo de calor y la diferencia de temperaturas se denomina coeficiente de transmisión de calor por convección o coeficiente de película. De acuerdo con la ecuación (1.4), el coeficiente de película tiene las siguientes unidades: $\text{W/m}^2/^{\circ}\text{C}$.

El coeficiente de transmisión de calor por convección no depende sólo del material de la pared, sino que también depende de:

- Composición del fluido.
- Geometría de la superficie del sólido.
- Hidrodinámica del movimiento del fluido a lo largo de la superficie.

Precisamente por esta razón, los valores del coeficiente de película no están tabulados, sino que se determinan a partir de correlaciones empíricas, algunas de las cuales se verán en los capítulos 3 y 4.

Como se verá en el capítulo 3, la convección puede ser:

- Forzada: cuando el movimiento del fluido es inducido por cualquier medio mecánico (bombas, ventiladores, etc).
- Libre o natural: cuando el movimiento del fluido se produce por las diferencias de densidad creadas por las diferencias de temperatura que existen en la masa del fluido.

Ambos tipos de convección pueden ser en régimen laminar o en régimen turbulento.

Los procesos de condensación y ebullición también se consideran procesos convectivos en los que coexiste el movimiento del fluido con un intercambio de calor latente.

En la tabla 1.1 aparecen algunos valores orientativos del coeficiente de película.

Tabla 1.1. Valores típicos del coeficiente de transmisión de calor por convección

Situación	h (W/m ² °C)
Convección libre	
Gases	2 - 25
Líquidos	50 - 1000
Convección forzada	
Gases	10 - 500
Líquidos	50 - 20 000
Convección con cambio de fase	
Agua en ebullición	2 500 - 25 000
Vapor en condensación	5 000 - 100 000

3.3. Transmisión de calor por radiación

La transmisión de calor por radiación se produce por la emisión de energía de la materia que se encuentra a una temperatura finita. Esta energía es transportada por ondas electromagnéticas (o alternativamente, fotones). Mientras que la transmisión de energía por conducción o convección requiere de un medio material, la radiación no lo precisa, e incluso, se transmite mejor en el vacío.

Existen varias leyes que rigen la transmisión de calor por radiación. Para el presente curso, sólo se va a estudiar la ley de Stefan-Boltzmann.

3.3.1. Ley de Stefan-Boltzmann

Se denomina potencia emisiva superficial (W/m²) a la energía liberada por unidad de área y de tiempo por una superficie.

La ley de Stefan-Boltzmann establece que *la potencia emisiva de una superficie es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta de dicha superficie. El límite superior de potencia emisiva lo establece el cuerpo negro. El flujo de calor emitido por cualquier superficie real es menor que el del cuerpo negro a dicha temperatura.*

$$E \left(\text{W/m}^2 \right) \propto T_s^4 \rightarrow \begin{cases} E_b(\text{cuerpo negro}) = \sigma \cdot T_s^4 \\ E(\text{superficie real}) = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \end{cases} \quad (1.5)$$

En la expresión anterior:

E_b (W/m^2): es la potencia emisiva del cuerpo negro.

E (W/m^2): es la potencia emisiva de una superficie real.

T (K): es la temperatura absoluta, en kelvin.

σ es la constante de Stefan-Boltzmann: $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$

ε es una propiedad radiativa de la superficie, denominada emisividad, que proporciona una medida de la eficiencia con que una superficie emite energía en relación a un cuerpo negro:

$$0 \leq \varepsilon \leq 1$$

La ley de Stefan Boltzmann se propuso basándose en pruebas experimentales. Más tarde se demostró que dicha ley podía deducirse de las leyes de la termodinámica y que, por tanto, no es empírica, como las leyes de Fourier y la ley de enfriamiento de Newton.

3.3.2. Intercambio de calor por radiación entre una superficie gris pequeña y otra superficie mucho más grande que la envuelve

Se conoce con el nombre de irradiación G a la radiación que incide sobre un cuerpo. Si se trata de un cuerpo negro, toda la radiación que incide es absorbida por el mismo. En el caso de cuerpos grises, sólo una parte de la radiación incidente es absorbida por el material, de tal forma que:

$$G_{abs} = \alpha \cdot G \quad (1.6)$$

α es una propiedad radiativa de la superficie, denominada absorptividad, que evalúa la fracción de energía que es absorbida por la misma, en relación con la absorbida por el cuerpo negro:

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

Un caso especial de intercambio de calor por radiación sucede cuando se tiene una superficie gris pequeña a una temperatura T_1 dentro de otra superficie mucho más grande que la envuelve, a una temperatura distinta, T_2 .

En el caso de superficies grises, se tiene que: $\alpha = \varepsilon$.

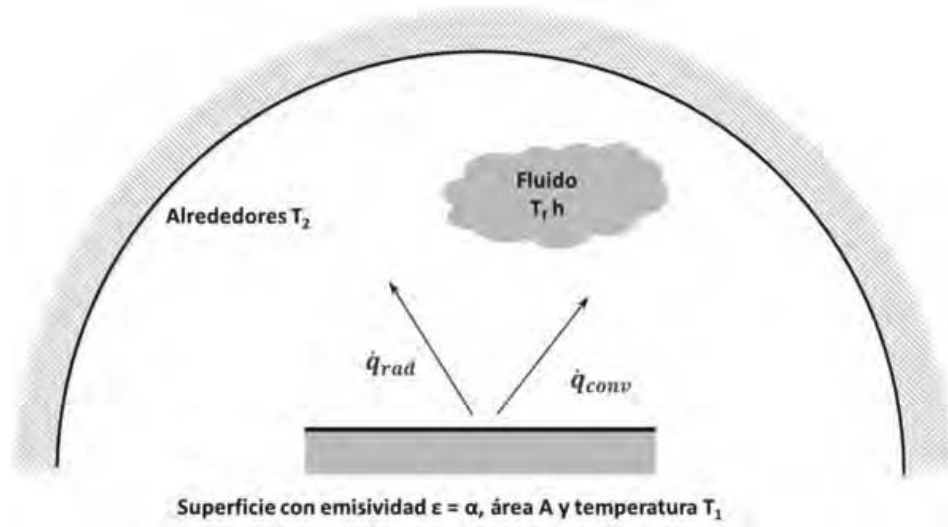


Figura 1.1. Intercambio de calor por radiación entre una superficie y sus alrededores.

La velocidad neta de transferencia de calor por radiación desde la superficie gris es, en este caso:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = \varepsilon \cdot E_b(T_1) - \alpha \cdot G = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.7)$$

Se recuerda que T_1 y T_2 son temperaturas absolutas y tienen que venir expresadas en kelvin.

En algunas ocasiones conviene expresar la ecuación anterior como si fuera un intercambio de calor por convección, con un coeficiente de transferencia de calor equivalente:

$$\dot{q} = h_r \cdot (T_1 - T_2) \quad (1.8)$$

La expresión de dicho coeficiente de transferencia de calor por radiación equivalente se deduce igualando las expresiones (1.7) y (1.8):

$$h_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1^2 + T_2^2) \cdot (T_1 + T_2) \quad (1.9)$$

En caso de que la superficie también intercambie calor por convección con el fluido que la envuelve, a temperatura T_f , se tiene:

$$\dot{q} = \dot{q}_{conv} + \dot{q}_{rad} = h \cdot (T_1 - T_f) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.10)$$

Donde h ($W/m^2/^\circ C$) es el coeficiente de transmisión de calor por convección.

La diferencia de temperaturas correspondiente a la transmisión de calor por convección podría venir expresada en kelvin o en $^\circ C$ pero, para que todas las temperaturas de la expresión (1.10) estén en las mismas unidades, se opta por la escala absoluta.

Un ejemplo muy habitual en el que se emplea con frecuencia la ecuación (1.10) es el de un colector de placa plana que se encuentra expuesto al ambiente. En estos casos, se suele dar como dato la temperatura ambiente, que sirve para calcular el calor intercambiado por convección. El calor intercambiado por radiación se calcula suponiendo una temperatura de cielo equivalente; esta temperatura se estima como una temperatura entre $10^\circ C$ y $12^\circ C$ por debajo de la temperatura ambiente.

4. PROPIEDADES TÉRMICAS DE LOS MATERIALES

4.1. Conductividad térmica

De acuerdo con lo ya visto en el apartado 3.1.2, la conductividad térmica es una propiedad física del material que indica la facilidad que tiene dicho material para transmitir calor por conducción, es decir, por movimiento molecular.

Las unidades de la conductividad se pueden deducir a partir de la ecuación de Fourier (ecuación 1.1):

$$\dot{Q} = -k \cdot A \cdot \frac{dt}{dn} \rightarrow k = \frac{-\dot{Q}/A}{dt/dn} \rightarrow [k] = \frac{W}{m \cdot K} \text{ ó } \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \quad (1.1. \text{ bis})$$

Se puede emplear indistintamente, en este caso, el K o el $^\circ C$, ya que está referido a una diferencia de temperatura, y la diferencia de temperaturas es igual expresada en $^\circ C$ o en K , al ser ambos de igual tamaño.

La conductividad térmica depende de:

- La homogeneidad del material.
- Fase en la que se encuentra: sólido, líquido o gas.
- Estructura microscópica del material.

- Composición química.
- Temperatura y presión.

El estudio que se va a hacer a continuación analiza cada uno de los factores anteriormente citados, pero distinguiendo entre materiales homogéneos y no homogéneos. En los primeros la conductividad queda definida por un valor único en todo el material, para unas condiciones dadas; en los segundos, la conductividad es anisótropa o no se puede medir de forma sencilla, por lo que se habla de conductividad térmica aparente.

4.1.1. Conductividad térmica de los materiales homogéneos

De acuerdo con la **fase en la que se encuentra el material**, puede afirmarse que la conductividad de los sólidos es mayor que la de los líquidos y, a su vez, ésta es mayor que la de los gases. Esto se debe a que las moléculas de las sustancias sólidas están más próximas entre sí que en un líquido y, a su vez, más próximas en un líquido que en un gas.

$$k_{\text{sólido}} > k_{\text{líquido}} > k_{\text{gas}}$$

Se va a estudiar a continuación el comportamiento de la conductividad térmica para cada una de las fases.

a. Conductividad térmica de los sólidos homogéneos

La conductividad térmica de los **sólidos homogéneos** suele variar exclusivamente con la temperatura y no con la presión. La variación con la temperatura es aproximadamente lineal, y la conductividad suele aumentar con ella:

$$k = k_0 \cdot (1 + b \cdot t) \quad (1.11)$$

k_0 es la conductividad térmica a temperatura igual a 0 °C y b es una constante.

Dentro de los sólidos homogéneos, se van a estudiar:

- **Metales puros:** Son los sólidos de mayor conductividad, debido a que:
 - Los choques moleculares son frecuentes, al ser sólidos.
 - Son sólidos de estructura cristalina, por lo que existe un movimiento vibratorio de la red en el sentido de las temperaturas decrecientes, que supone una transmisión de calor adicional.

- Por ser una estructura cristalina metálica, los electrones de valencia tienen libertad de movimiento, migrando en la dirección de las temperaturas decrecientes. Esto explica la proporcionalidad que se observa entre la conductividad térmica y eléctrica de los metales puros.

Los factores que afectan más a la conductividad de los metales son los cambios de fase, la composición química y la temperatura, aunque el factor que ejerce mayor influencia es la temperatura. En general, la conductividad térmica de los metales puros disminuye con la temperatura, pero la presencia de impurezas puede alterar esta tendencia.

— **Aleaciones:** La presencia de elementos aleados dificulta normalmente el movimiento vibratorio de la red cristalina, y el movimiento de los electrones, por lo que la conductividad de las aleaciones suele ser menor que la de las sustancias puras.

En la figura 1.2 se ha representado la conductividad térmica del cobre en estado puro y del cobre aleado. Se observa que a mayor porcentaje de material aleado, la conductividad térmica es menor. Se observa también que en las aleaciones, la conductividad térmica aumenta con la temperatura, al contrario de lo que sucede en el metal puro.

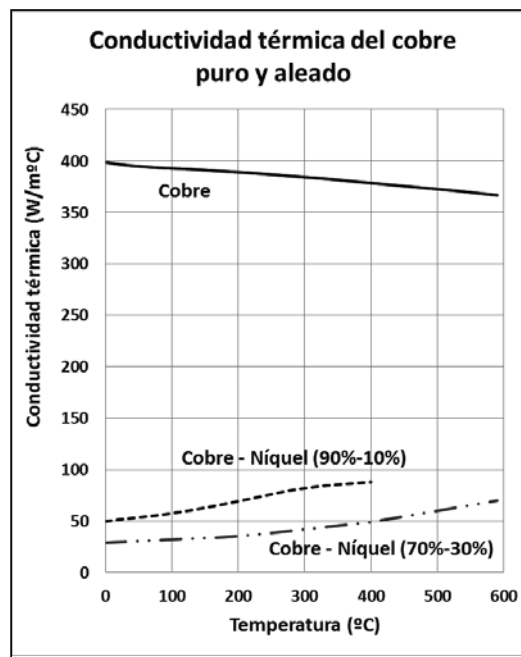


Figura 1.2. Efecto de la temperatura y la composición sobre la conductividad térmica del cobre puro y aleado.

- **Sólidos no metálicos con estructura cristalina:** El efecto fundamental que aumenta la transmisión de calor es el de vibración de la red cristalina (no tienen electrones libres).

Hay casos en los que la red cristalina es tan perfecta que la conductividad térmica es enorme, como es el caso del diamante: $2000 - 2500 \text{ W/m/}^\circ\text{C}$.

- **Sólidos amorfos:** En este caso, la disposición irregular de las moléculas disminuye la transmisión de energía por choques moleculares. La conductividad térmica es del mismo orden que los líquidos.

b. Conductividad térmica de los líquidos homogéneos

La conductividad térmica de los líquidos es prácticamente independiente de la presión, como en el caso de los sólidos, sobre todo si no se aproxima a la presión crítica. Por ello, sólo se estudia la variación con la temperatura. En general, la conductividad de los líquidos disminuye cuando aumenta la temperatura, salvo las siguientes excepciones: agua, glicol y glicerina que, como puede verse en la figura 1.3, presentan un máximo a una determinada temperatura.

En la figura 1.3 se ha representado la influencia de la temperatura sobre la conductividad térmica de algunos líquidos saturados. Se estudia el estado saturado debido a la unicidad de dicho estado.

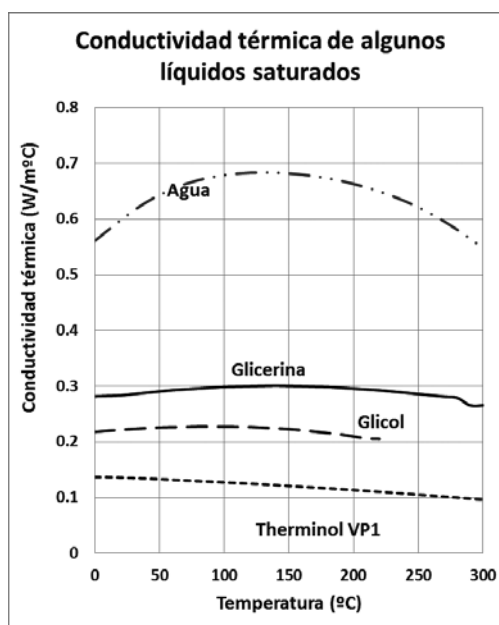


Figura 1.3. Conductividad térmica de algunos líquidos saturados.

c. Conductividad térmica de los gases homogéneos

La conductividad térmica de los gases homogéneos se analiza mediante la teoría cinética de los gases, según la cual la conductividad es directamente proporcional a:

- n : número de partículas por unidad de volumen.
- c : velocidad molecular media.
- λ : camino libre medio recorrido por una molécula antes de que choque con otra.

$$k \propto n \cdot c \cdot \lambda \quad (1.12)$$

De acuerdo con la anterior expresión, se tiene que:

- Influencia de la temperatura: La conductividad aumenta al aumentar la temperatura porque aumenta la velocidad media de las moléculas.
- Influencia del peso molecular: La conductividad aumenta al disminuir el peso molecular porque aumenta la velocidad media de las moléculas y el camino libre medio recorrido por las mismas.
- Influencia de la presión: La conductividad es prácticamente independiente de la presión, ya que ésta produce efectos contrapuestos sobre el número de partículas por unidad de volumen y sobre el recorrido libre medio de las partículas, por lo que ambas tendencias se neutralizan.

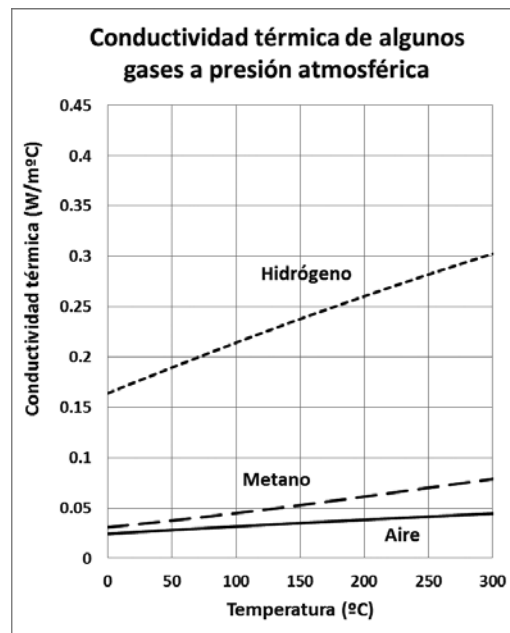


Figura 1.4. Influencia de la temperatura sobre la conductividad térmica de algunos gases a presión atmosférica.

En la figura 1.4 se muestra la influencia de la temperatura sobre la conductividad térmica de diferentes gases, a la presión atmosférica. Estos valores se pueden utilizar a otras presiones. **La excepción es el vapor de agua**, que tiene un comportamiento irregular y muestra gran dependencia de la presión y la temperatura sobre la conductividad térmica.

4.1.2. Conductividad térmica aparente de los materiales no homogéneos

En el caso de materiales no homogéneos, la conductividad térmica no es uniforme en todo el volumen para unas condiciones dadas. La conductividad puede presentar una variación anisótropa como consecuencia de una preferencia direccional debido a la estructura fibrosa del material (como es el caso de la madera y el asbesto). La conductividad también puede no ser medible, bien por la estructura porosa (lana de vidrio, corcho), o bien debido a que la estructura está compuesta de diferentes sustancias (hormigón, piedra, ladrillo, etc); en estos casos se habla de «conductividad térmica aparente».

Ejemplos de materiales no homogéneos son los materiales aislantes, los materiales de construcción y los materiales refractarios.

En los materiales aislantes la conductividad térmica disminuye al aumentar la temperatura, aunque existe una temperatura límite en la que los efectos convectivos y radiativos en los poros del material aislante aumentan la transmisión de calor a través del material.

En los materiales refractarios, en general, la conductividad térmica aumenta con la temperatura, ya que suelen tener estructuras predominantemente cristalinas. Existen excepciones, como el ladrillo de magnesia que, como un metal puro, presenta una disminución de la conductividad con el aumento de temperatura.

4.2. Calor específico

El calor específico es la cantidad de energía que hay que aportar a 1 kg de una sustancia para aumentar su temperatura 1 grado.

$$c = \frac{1}{m} \cdot \frac{dQ}{dt} \quad (1.13)$$