

Índice

Introducción. Evolución del concepto de calor y sus formas de transmisión.....	21
--	----

TRANSMISIÓN DE CALOR POR CONDUCCIÓN

Capítulo 1. Ley de Fourier. Ecuación general de la conducción del calor.....	53
1.1. Introducción.....	53
1.2. Concepto de gradiente de temperaturas.....	55
1.3. Ley de Fourier.....	56
1.3.1. Conductividad en gases.....	58
1.3.2. Conductividad en líquidos.....	59
1.3.3. Conductividad en sólidos.....	60
1.3.3.1. <i>Caso de metales</i>	60
1.3.3.2. <i>Aleaciones</i>	61
1.3.3.3. <i>Sólidos no conductores</i>	61
1.3.4. La ecuación de Fourier como ecuación de transporte.....	63

1.4. Ecuación general de la conducción del calor	64
1.4.1. Conducción con el entorno.....	65
1.4.2. Generación interna.....	66
1.4.3. Acumulación térmica.....	66
1.5. Condiciones de unicidad	69
1.5.1. Condiciones de contorno de primera especie denominadas de Dirichlet	70
1.5.2. Condiciones de contorno de segunda especie denominadas de Neumann	70
1.5.3. Condiciones de contorno de tercera especie.....	71
1.5.4. Condiciones de contorno de cuarta especie.....	71
Anexo 1.I. Ecuación general. Otras coordenadas	73
Anexo 1.II. Medida de la conductividad térmica	74
Capítulo 2. Transmisión de calor por conducción en régimen estacionario. Geometrías simples	77
2.1. Introducción	77
2.2. Conducción térmica a través de una placa infinita.....	79
2.2.1. Régimen permanente. Generación interna nula	79
2.2.2. Placa infinita. Con generación interna	81
2.2.3. Analogía eléctrica. Concepto de resistencia térmica.....	82
2.2.4. Conductividad variable con la temperatura.....	84
2.2.5. Muros multicapa.....	86
2.2.5.1. Coeficiente global de transmisión de calor.....	86
2.2.5.2. Capas de fluidos en reposo.....	88
2.2.5.3. Temperatura genérica	91
2.2.5.4. Espesor óptimo de aislamiento.....	91
2.2.5.5. Resistencia térmica de contacto	94
2.2.5.6. Resistencia en paralelo.....	96

2.3. Cilindros infinitos	97
2.3.1. Cilindro infinito sin generación interna y condiciones de contorno de primera especie	97
2.3.2. Asimilación de una pared cilíndrica a una placa infinita	99
2.3.3. Cilindro hueco infinito con generación interna	100
2.3.4. Cilindro macizo infinito con generación constante	101
2.3.5. Cilindro infinito. Analogía eléctrica	103
2.3.6. Cilindro infinito multicapa	103
2.3.6.1. <i>Coficiente global de transmisión de calor</i>	104
2.3.6.2. <i>Espesor crítico de aislamiento en tuberías</i>	105
2.3.6.3. <i>Resistencia debida a incrustaciones (Fouling)</i>	109
2.4. Régimen unidireccional estacionario en esferas	111
2.4.1. Esfera hueca sin generación interna	111
2.4.2. Esfera hueca con generación interna	113
2.4.3. Esfera maciza con generación interna	114
2.4.4. Analogía eléctrica en el caso de capas esféricas sin generación interna de calor	114
2.4.5. Esfera multicapa	115
Anexo 2.I. Resumen de expresiones	116
Capítulo 3. Superficies adicionales. Regimen unidireccional estacionario	117
3.1. Introducción	117
3.2. Tipos de superficies adicionales	119
3.3. Ecuación diferencial sobre una aleta genérica	119
3.4. Aleta recta de sección constante	121
3.4.1. Convección en el extremo	123
3.4.2. Convección nula en el extremo	124
3.4.3. Aletas de gran longitud	126

3.5. Espinas o agujas de sección constante	128
3.6. Aleta anular de espesor uniforme.....	129
3.7. Otros tipos de aletas	137
3.8. Eficiencia de aletas.....	140
3.8.1. Aleta recta de sección constante con convección despreciable en el extremo	141
3.8.2. Aleta anular de espesor uniforme, con convección despreciable en el extremo	141
3.8.3. Aleta de perfil triangular completa.....	142
3.9. Comparación entre aletas	143
3.9.1. Comparación entre aletas rectas	143
3.9.2. Comparación entre aletas tipo aguja	143
3.9.3. Comparación entre aletas anulares	144
3.10. Efectividad de una aleta	145
3.11. Conjunto aleteado.....	145
3.11. Configuración multialeta.....	147
Anexo 3.I. Funciones de Bessel.....	150
Capítulo 4. Régimen transitorio (variable con el tiempo).....	153
4.1. Introducción	153
4.2. Consideraciones de partida.....	160
4.3. Transitorio puro. Régimen cero-dimensional.....	161
4.4. Régimen transitorio unidireccional. Resolución analítica por el método de separación de variables.....	164
4.4.1. Cambio brusco de la temperatura superficial	166
4.4.2. Cambio brusco de la temperatura del fluido circundante.....	170
4.5. Régimen transitorio unidireccional. Soluciones aproximadas y su representación gráfica	173

4.6. Régimen variable multidireccional	180
Anexo 4.I. Gráficos de Heisler	185
Anexo 4.II. Resolución analítica régimen transitorio. Otros métodos	192
Anexo 4.III. Método de separación de variables aplicado a la transmisión de calor por conducción en régimen estacionario mutidireccional	203

TRANSMISIÓN DE CALOR POR CONVECCIÓN

Capítulo 5. Transmision de calor por conveccion. Conceptos fundamentales	213
5.1. Introducción	213
5.2. Generalidades sobre los diferentes modos de convección	216
5.3. Características de un fluido en movimiento.....	217
5.3.1. Continuidad.....	217
5.3.2. Compresibilidad.....	217
5.3.3. Viscosidad.....	218
5.4. Ecuaciones básicas en transmisión de calor por convección	219
5.4.1. Conservación de la materia.....	220
5.4.2. Conservación de la cantidad de movimiento. Ecuaciones de Navier-Stokes.....	220
5.4.3. Conservación de la energía. Balance energético	222
5.4.4. Condiciones de contorno	225
5.5. Fundamentos de la teoría de semejanza	225
5.5.1. Métodos de similitud. Números adimensionales.....	227
5.5.1.1. Ecuaciones adimensionales.....	227
5.5.1.2. Teorema “ π ” de Buckingham.....	230
5.5.1.3. Flujo turbulento.....	231

5.6. Capa límite	233
Anexo 5.I. Ecuaciones diferenciales para régimen turbulento	236
Anexo 5.II. Ecuaciones de la capa límite. Simplificaciones.....	239
Capítulo 6. La convección forzada sin cambio de estado	245
6.1. Introducción	245
6.2. Convección forzada externa	248
6.2.1. Flujo paralelo a superficies planas	248
6.2.1.1. Placa plan en ataque paralelo. Régimen laminar.....	251
6.2.1.1. Placa plan en ataque paralelo. Régimen turbulento.....	251
6.2.2. Cilindro en ataque frontal.....	252
6.2.3. Flujo perpendicular a cilindros no circulares	256
6.2.4. Flujo perpendicular a esferas.....	258
6.2.5. Haces de tubos en flujo normal	258
6.3. Convección forzada interna. Tubos de sección circular.....	262
6.3.1. Régimen laminar	263
6.3.1.1. Perfil de velocidades	264
6.3.1.2. Balance energético. Perfil de temperaturas.....	265
6.3.1.3. Régimen laminar ecuaciones de semejanza empíricas	270
6.3.2. Régimen turbulento	271
6.3.3. Convección forzada interna. Canalizaciones no circulares. Diámetro equivalente.....	277
Anexo 6.I. Resolución analítica para placa plana en ataque paralelo. Método integral de Pohlhausen y Von Karman	280
Anexo 6.II. Perfil de velocidades en tuberías de sección circular para régimen laminar	290

Capítulo 7. La convección natural	293
7.1. Introducción	293
7.2. La convección natural. Ecuaciones fundamentales.....	294
7.2.1. Cálculo del gradiente de presión.....	296
7.2.2. Ecuaciones adimensionales. Números adimensionales.....	297
7.3. Convección natural en un espacio ilimitado. Caso de placa vertical (régimen laminar).....	298
7.4. Expresiones de trabajo en convección natural	303
7.4.1. Placa vertical a temperatura constante.....	303
7.4.2. Placa vertical con flujo de calor constante	304
7.4.3. Placa inclinada	306
7.4.4. Placa horizontal.....	307
7.4.5. Cilindro vertical a temperatura constante	308
7.4.6. Cilindro inclinado	310
7.4.7. Cilindro horizontal a temperatura constante.....	311
7.4.8. Esfera	313
7.4.9. Célula cerrada rectangular, vertical y con paredes a distinta temperatura (colector solar plano).....	314
7.4.10. Convección natural en espacios limitados.....	315
7.5. Límites de transición de convección natural y forzada	316
Capítulo 8. La convección con cambio de estado	319
8.1. Introducción. Los cambios de estado	319
8.2. La condensación.....	321
8.2.1. Condensación externa en película de vapores puros. Teoría de Nusselt	322
8.2.2. Condensación sobre superficies inclinadas	327
8.2.3. Condensación sobre tubos horizontales.....	327

8.2.4.	Condensación sobre un haz horizontal de tubos	328
8.2.5.	Proceso real. Desviaciones a la teoría de Nusselt	330
8.2.5.1.	<i>Temperaturas consideradas</i>	330
8.2.5.2.	<i>Altas densidades del vapor</i>	330
8.2.5.3.	<i>Diferencia entre la transferencia térmica teórica y real</i>	330
8.2.5.4.	<i>Régimen turbulento</i>	331
8.2.5.5.	<i>Temperatura de pared variable</i>	333
8.2.5.6.	<i>Influencia del recalentamiento del vapor</i>	333
8.2.5.7.	<i>Influencia del estado de la superficie</i>	334
8.2.5.8.	<i>Influencia de la presencia de gases incondensables</i>	334
8.2.5.9.	<i>Influencia de la velocidad y dirección del flujo de vapor</i>	335
8.2.5.10.	<i>Influencia de la configuración de las superficies</i>	335
8.2.6.	Expresiones semiempíricas	336
8.2.7.	Condensación dentro de tubos.....	339
8.3.	La ebullición.....	345
8.3.1.	Ebullición en recipientes	347
8.3.1.1.	<i>Expresiones de trabajo en ebullición en recipientes para ebullición nucleada</i>	351
8.3.1.2.	<i>Expresiones de trabajo en ebullición en recipientes para ebullición pelicular</i>	356
8.3.2.	Ebullición con convección forzada. Flujos bifásicos	357

INTERCAMBIADORES DE CALOR

Capítulo 9.	Intercambiadores de calor. Recuperadores.	
	Nociones básicas.....	367
9.1.	Introducción	367
9.2.	Estudio de los intercambiadores de recuperación	369

9.3. Hipótesis de cálculo en recuperadores.....	371
9.4. Estudio de los recuperadores de flujo paralelo. Equi y contracorriente.....	371
9.4.1. Incremento de temperaturas logarítmico medio.....	373
9.4.2. Caso de una variación en el coeficiente global "U" con la temperatura.....	375
9.4.3. Estudio interno de funcionamiento.....	377
9.4.4. Comparación entre las disposiciones contra y equicorriente.....	379
9.4.4.1. Para el caso equicorriente.....	379
9.4.4.2. Para el caso en contracorriente.....	380
9.4.5. Dominio de utilización de los intercambiadores de flujo paralelo.....	382
9.5. Concepto de eficacia de un intercambiador de calor.....	383
9.6. Consideraciones sobre el cálculo de la diferencia de temperaturas logarítmica media.....	384
Anexo 9.I. Comparación de incrementos logarítmicos medios de temperatura en las disposiciones en equi y contracorriente.....	387
Capítulo 10. Intercambiadores complejos de recuperación.....	391
10.1. Introducción.....	391
10.2. Intercambiadores de carcasa-tubos.....	392
10.2.1. Componentes de los intercambiadores de carcasa-tubos.....	396
10.2.1.1. Baffles directores de flujo.....	396
10.2.1.2. Haz de tubos.....	400
10.2.1.3. Carcasa.....	407
10.2.1.4. Rangos de utilización.....	408
10.3. Intercambiadores de flujos cruzados.....	408
10.3.1. Los enfriadores de aire (Baterías).....	409
10.3.1.1. Bancos de tubos.....	415
10.3.1.2. Colectores.....	417

10.3.1.3. Accionamiento de ventiladores	419
10.3.1.4. Regulación del caudal de aire.....	420
10.3.1.5. Otras configuraciones.....	420
10.3.1.6. Rangos de utilización.....	421
10.3.2. Intercambiadores de placas y aletas (Plate Fin).....	421
10.4. Intercambiadores de placas.....	425
10.4.1. Intercambiadores de placa-juntas.....	425
10.4.2. Intercambiadores en ESPIRAL.....	434
10.4.3. Intercambiadores de carcasa-placas	437
Anexo 10.I. Normas tema (Tubular Exchanger Manufacturers Association) ..	440
Capítulo 11. Dimensionamiento térmico en intercambiadores de recuperación.....	443
11.1. Introducción	443
11.2. Métodos de dimensionamiento térmico	444
11.2.1. Método del factor de corrección "F"	444
11.2.2. Método del número de unidades de transferencia “ ϵ - NTU”	446
11.2.3. El método P-NTU.....	448
11.2.4. El método ψ -P	449
11.3. Diseño térmico básico de un intercambiador de carcasa-tubos.....	450
11.3.1. Diseño preliminar	451
11.3.1.1. Estimación del tamaño del equipo	451
11.3.1.2. Selección del canal de circulación de los fluidos.....	455
11.3.1.3. Estimación del número aproximado de tubos	456
11.3.1.4. Estimación del número de baffles deflectores y su separación	458
11.3.2. RATING. Cálculo de los coeficientes de convección por los lados de carcasa y tubos, contribución de la pared de los tubos y resistencias térmicas debidas a Fouling.....	459

11.3.2.1. Resistencia térmica debida a ensuciamiento (Fouling)	459
11.3.2.2. Coeficiente de convección por el lado de los tubos.....	460
11.3.2.3. Coeficiente de convección por el lado de la carcasa.....	461
11.3.3. Modificación de parámetros	470
11.3.3.1. Diseño insuficiente. Incremento de la potencia térmica.....	470
11.3.3.2. Diseño insuficiente. Reducción pérdidas de carga	470
11.4. Diseño térmico para enfriadores de aire.....	471
11.4.1. Estimación preliminar de la temperatura de salida del aire	471
11.4.2. Estimación preliminar del coeficiente global de transmisión de calor	472
11.4.3. Cálculo de la superficie exterior del conjunto aleteado	473
11.4.4. Cálculo de la superficie frontal del haz de tubos.....	474
11.4.5. Anchura de la unidad del haz de tubos.....	474
11.4.6. Número de tubos.....	475
11.4.7. Velocidad másica por el lado de los tubos	475
11.4.8. Número de Reynolds por el lado de los tubos.....	475
11.4.9. Coeficiente de convección interno	475
11.4.10. Velocidad frontal del aire	475
11.4.11. Coeficiente de convección del lado del aire.....	475
11.4.12. Cálculo del coeficiente global de transmisión de calor.....	476
11.4.13. Proceso iterativo	476
11.5. Proceso de dimensionamiento en intercambiadores de placas.....	477
11.5.1. Obtención de la temperatura de salida restante. Balance energético	478
11.5.2. Cálculo del incremento de temperaturas logarítmico medio.....	478
11.5.3. Número de unidades de transferencia	478
11.5.4. Coeficiente global de transmisión asociado a una placa.....	478
11.5.5. "PN" de la placa.....	478

11.5.6. Cálculo del número de canales por paso (n_c, n_f) para los dos fluidos, ajustando las dimensiones de las placas y las velocidades características.....	479
11.5.6.1. Número de pasos del fluido caliente.....	479
11.5.6.2. Número de pasos del segundo fluido.....	479
Anexo 11.I. Gráficas y expresiones del factor de corrección del incremento de temperatura en intercambiadores.....	480
Anexo 11.II. Gráficas y expresiones del método “ ϵ -NTU”.....	483
Anexo 11.III. Determinación del factor “ P ” en un intercambiador de un paso por carcasa y dos por tubos. Desarrollo de Underwood (1934).....	490

TRANSMISIÓN DE CALOR POR RADIACIÓN

Capítulo 12. Aspectos energéticos de la radiación térmica. Leyes fundamentales.....	495
12.1. Introducción.....	495
12.2. Ley de Prevost.....	496
12.3. Naturaleza de la radiación térmica. Ley de Planck.....	497
12.4. Propiedades radiantes de la materia. Definición del cuerpo negro.....	504
12.4.1. Absortividad o coeficiente de absorción.....	505
12.4.2. Reflectividad o coeficiente de reflexión.....	506
12.5. Ley de stefan Boltzman.....	509
12.6. Cuerpos grises. Ley de Kirchhoff.....	511
12.7. Leyes de Wien.....	513
12.8. Tablas de radiación.....	516
Anexo 12.I. La temografía infrarroja.....	517
Anexo 12.II. Tabla de radiación.....	540
Anexo 12.III. Valores de emisividad.....	541

Capítulo 13. Principios fundamentales en radiación. Aspecto direccional.....	543
13.1. Introducción. Intensidad de la radiación.....	543
13.2. Emitancia direccional y hemisférica.....	546
13.3. Factor de visión entre superficies.....	549
13.3.1. Factor de visión entre superficies elementales.....	549
13.3.2. Factor de visión entre una superficie elemental y otra finita.....	551
13.3.3. Factor de visión entre superficies finitas.....	551
13.3.4. Métodos de evaluación de factores de visión.....	552
13.3.4.1. Método analítico.....	552
13.3.4.2. Método gráfico. Integrador gráfico.....	553
13.3.4.3. Métodos numéricos.....	553
13.3.5. Propiedades de los factores de visión.....	554
13.3.5.1. Propiedad sumatorio.....	554
13.3.5.2. Reciprocidad entre factores de visión.....	555
13.3.5.3. Álgebra de factores de visión.....	555
13.3.5.4. Eliminación de superficies cóncavas.....	556
13.3.5.5. Técnica de Hottel.....	556
13.3.6. Factores de visión en un recinto cerrado.....	558
Anexo 13.I. El ángulo sólido.....	560
Anexo 13.II. Factores de visión.....	562
Capítulo 14. La radiación en medio no participante. Métodos de cálculo.....	569
14.1. Introducción.....	569
14.2. Radiosidad e irradiación.....	570
14.3. Hipótesis simplificadoras de cálculos.....	571
14.4. Métodos de cálculo.....	572

14.4.1.	Método de reflexión	572
14.4.1.1.	<i>Sistema formado por dos planos infinitos paralelos y negros</i>	572
14.4.1.2.	<i>Sistema formado por dos planos infinitos paralelos y grises</i>	573
14.4.2.	Método matricial o de Gebhart	577
14.4.2.1.	<i>Método matricial. Caso de planos infinitos paralelos y grises</i>	580
14.4.2.2.	<i>Método matricial. Caso de un recinto constituido por dos superficies negras conectadas por una re-radiante</i>	581
14.4.3.	Analogía eléctrica. Método Network	582
14.4.3.1.	<i>Método eléctrico. Caso de planos infinitos paralelos y grises</i>	585
14.4.3.2.	<i>Método eléctrico. Caso de dos superficies grises, una de ellas de superficie muy superior a la otra</i>	586
14.4.3.3.	<i>Método eléctrico. Caso de un recinto integrado por dos superficies negras y una tercera re-radiante</i>	586
14.4.4.	Consideraciones a los métodos de cálculo	588
14.5.	Linealización de la diferencia de temperaturas	589
Anexo 14.I.	Conversión estrella – triángulo	591
Capítulo 15.	Radiación en medio participante	593
15.1.	Introducción	593
15.2.	Ley de Beer	594
15.3.	Tratamiento de gases participantes como cuerpos grises	596
15.4.	Comportamiento real	598
15.4.1.	Longitud efectiva	599
15.4.2.	Emisividad global de gases participantes	603
15.4.3.	Emisividad de llamas luminosas	606
15.4.3.1.	<i>Llamas blancas o de cracking (partículas cuya dimensión es del orden de 0,3 micras)</i>	607
15.4.3.2.	<i>Llamas de partículas grandes (dimensión de varias decenas de micras)</i>	607
15.5.	Radiación en hornos y calderas	607

NOMENCLATURA BÁSICA

Símbolo	
Bi	Nº de Biot
C	Capacidad calorífica [W K ⁻¹]
c _p	Calor específico a presión constante [J kg ⁻¹ K ⁻¹]
D	Diámetro [m]
D _h	Diámetro hidráulico[m]
E	Emitancia [W m ⁻²]
e	Efusividad [J m ⁻² K ⁻¹ s ^{-½}]
Ef	Efectividad de una aleta
F	Factor de visión
Fo	Nº de Fourier
G	Irradiación [W m ⁻²]
Gr	Nº de Grashof
h	Coefficiente de película [W m ⁻² K ⁻¹]
J	Radiofidad [W m ⁻²]
k	Conductividad térmica [W m ⁻¹ K ⁻¹]
Nu	Nº de Nusselt
Pe	Nº de Peclet
Pr	Nº de Prandtl
Q	Calor [J]
q	Potencia transferida [W]
q''	Flujo de calor [W m ⁻²]
Ra	Nº de Rayleigh
Re	Nº de Reynolds
S	Superficie [m ²]
T	Temperatura [K]
t	Tiempo [s]
U	Coefficiente global [W m ⁻² K ⁻¹]
V	Volumen [m ³]
x,y,z	Coordenadas rectangulares [m]

Símbolo griego	
α	Difusividad térmica [m^2/s]; Absortividad
β	Coefficiente de dilatación volumétrica [K^{-1}]
δ	Espesor de capa límite
ε	Emisividad
η	Eficiencia
θ	Diferencia de temperaturas [K]
λ	Calor latente [J kg^{-1}], Longitud de onda [μm]
μ	Viscosidad dinámica [$\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$]
ν	Viscosidad cinemática [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]
ρ	Densidad [kg m^{-3}], Reflectividad
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
τ	Transmisividad
ω	Ángulo sólido [sr]
Ω	Temperatura adimensional

Introducción

Evolución del concepto de calor y sus formas de transmisión

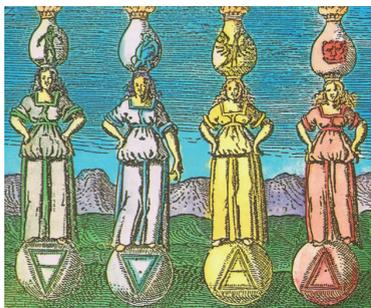
Los intentos por comprender el fenómeno de la generación y transmisión del calor han ocupado un lugar prominente en la historia de la ciencia. Evidentemente, este proceso se origina con los intentos de los primeros homínidos por entender y dominar el fuego y continúa en nuestros días con el estudio de la naturaleza microscópica del calor. En este intervalo de tiempo se han desarrollado diferentes teorías sobre el origen del calor y su transferencia, algunas de las cuales van a ser descritas a continuación.

1. Teorías mitológicas del calor

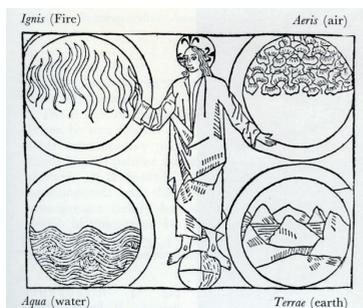
En civilizaciones antiguas se utilizó un sistema de arquetipos o “elementos clásicos” para explicar los diferentes patrones de la naturaleza. La palabra “elemento“, en este contexto, se refiere a declaraciones (por ejemplo; sólido/tierra, líquido/agua, gas/aire, plasma/fuego) o a fases de la materia (como en China, en la que se consideran cinco), más bien que a elementos químicos tal como se consideran actualmente.

Al prender fuego a un trozo de madera verde, y a medida que avanza la combustión, la savia del árbol (líquida, cómo el agua) burbujea y emana un vapor (gaseoso cómo el aire). Al final, cuando el fuego se ha apagado, lo que queda es ceniza (sólido, cómo la tierra). Este tipo de observaciones llevaron a muchas civilizaciones antiguas a la conclusión de que toda la materia estaba formada por cuatro constituyentes elementales: agua, fuego, aire y tierra.

En Grecia, los elementos clásicos (tierra, agua, aire, fuego, y a veces también “idea”) se introducen a partir de la época pre-socrática y persistieron en la época medieval y el renacimiento, influyendo de manera profunda en el pensamiento y cultura europeos.



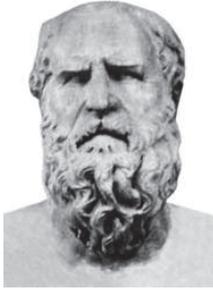
Elementos clásicos



Visión cristiana de los elementos clásicos

La primera mención que se tiene sobre esta teoría del calor se debe al filósofo griego Heraclito (535 - 475 antes de Cristo) que vivió en la ciudad de Efeso (Asia Menor). Este pensador sostenía que todo fluye, y que los tres principales elementos en la naturaleza son el fuego, la tierra y el agua, y de estos tres, el fuego, constituye el elemento central, capaz de controlar y modificar a los otros. Según Heraclito, el universo estaba en un continuo movimiento como resultado de la acción del fuego. Empedocles de Acragas (495 - 435 antes de Cristo), filósofo y científico griego, sostenía en su Tetrasomía o doctrina de los cuatro elementos, que toda la materia se componía de los cuatro elementos; tierra, aire, fuego y agua, los describe no solo como manifestaciones de sustancias materiales, sino como sustancias espirituales, y los asocia con dioses; así el aire era Zeus, la tierra Hera, el fuego Hades y el agua Nestis, Empédocles postuló esta idea como la Teoría de las cuatro raíces, a las que más tarde Aristóteles (384 – 322 antes de Cristo) llamaría elementos.

Sobre la importancia del fuego debe resaltarse que Hipócrates, el padre de la medicina, aseguraba, sobre el año 460 antes de Cristo, que el calor, encargado de la vida, procedía de un fuego interno localizado en el ventrículo izquierdo.



Heraclitus de Efeso



Empedeocles de Acragas

Posteriormente, en el siglo XI, el científico turco Ebü'l Reyhan Muhammed El-Biruni (973-1051) considera al movimiento y a la fricción asociada como el causante del calor, el cual a su vez genera el elemento fuego, asociando el frío en los polos a la ausencia de movimiento. Para El-Biruni el globo terráqueo estaba formado por los elementos tierra y agua, rodeados por todos lados por el elemento aire, la fricción producida por el movimiento del aire producía el fuego.



Reyhan Muhammed El-Biruni



Avicenna (Abd Allāh ibn Sīnā)

El filósofo y teólogo islámico Abd Allah Baydawi consideraba, en el siglo XIII, dos posibles causas en la generación del calor:

- Calor natural, producido por la rotura de un átomo de fuego.
- Por otro lado, el calor puede proceder de la fricción, tal como se comprueba experimentalmente.

Avicenna (Abd Allāh ibn Sīnā) dice, en su libro “Celi et Mundi “, que el calor es generado por el movimiento. Vemos que esta idea de calor-movimiento no es con mucho nueva y va a ser considerada por diferentes autores.

Hacia el año 1600 el filósofo y científico inglés Francis Bacon (1561 – 1626) proponía que la esencia del calor era movimiento y nada más que eso. Este aseveración fue secundada por el científico inglés Robert Hooke, para el que el calor se producía debido a la brusca agitación de la partes de un cuerpo.



Francis Bacon



Robert Hooke

A finales del siglo XVII, los antiguos elementos (agua, aire, tierra y fuego) empezaron a caer en desuso. Se conocían 14 elementos; los 9 metales utilizados desde la antigüedad (oro, plata, cobre, plomo, zinc, estaño, hierro, mercurio y antimonio), dos metales que habían sido descubiertos en el siglo anterior (el bismuto y el platino) y el fósforo que había sido descubierta por Henning Brand mientras intentaba transformar la orina en oro en 1669.

John Mayow (1645 – 1679) identificó el espíritu nitroaéreo (al que conocemos hoy como oxígeno) y explicó el funcionamiento de la combustión observando que se mantenía gracias a dicho espíritu. Observó también que la cal, restos de materia que dejaba la combustión, aumentaban de peso ya que los metales se oxidaban en la combustión, absorbiendo el espíritu nitroaéreo de la atmósfera.

En la misma época, el químico y físico irlandés Robert Boyle (1627 – 1691), definió el concepto de elemento químico como aquella sustancia que no podía ser descompuesta en otros. Además, estableció que esta descomposición debía ser puesta en práctica a través de un experimento, no siendo suficiente la mera deducción, algo que marcaría la forma de trabajar en el futuro. Sin embargo, aunque fue quien separó por primera vez la química de la alquimia, Boyle seguía influido por la esta última y estaba obsesionado con transformar los metales en oro. Cuando Boyle comenzó a realizar sus experimentos, todos ellos de una manera rigurosa, encontró que la base y principios existentes eran inadecuados para dar una explicación racional a sus observaciones.



John Mayow



Robert Boyle

Pese a la brillantez y corrección de las observaciones de Mayow y Boyle, la teoría que resultaría predominante fue otra, nacida de los trabajos de Johann Joachim Becher.

2. La teoría de la “terra pinguis” (oily earth)

En 1669, Johann Joachim Becher (1635 - 1682) profesor de Química en Maguncia, publica una obra revolucionaria, sólo apreciada posteriormente y que va a producir un colapso en la investigación sobre nuevos elementos químicos. En su obra "Actorum laboratorit chymici. Physica Subterraneae" se afirmaba que todos los minerales estaban compuestos de tres principios: TERRA PINGÜIS, TERRA MERCURIALIS y TERRA LÁPIDA, también llamados respectivamente TERRA COMBUSTIBLE, que debería encerrar el principio combustible o capacidad para arder, la TERRA FLUÍDA, con el principio líquido o capacidad para fundir, y la TERRA VITRESCIBLE o VITRIFICABLE, con el principio sólido responsable de su estructura. Todo combustible contenía TERRA PINGÜIS que se perdía al arder.



Johann Joachim Becher



Physica Subterraneae

Algunos extractos de su obra son:

- Los químicos son una extraña clase de mortales que, impelidos por un impulso casi maníaco, buscan su placer entre humos y vapores, hollín y llamas, venenos y miseria. Y aún así, entre estos males vivo tan placenteramente que antes moriría que cambiar de lugar con el rey de Persia.
- Una muestra que se quema o un metal que se calcina, expulsa toda la terra pinguis al arder y cuando la agota, se queda en forma de terra lápida más terra mercuarlis.”

Estas ideas no eran originales, ya en el año 780 Geber había expuesto que los metales estaban constituidos por dos exhalaciones: el HUMO DE TIERRA y el VAPOR ACUOSO. El HUMO DE TIERRA era fácilmente convertible en AZUFRE, y el vapor acuoso en MERCURIO. Solamente cuando la mezcla era perfecta se producía oro. Variando la proporción se obtenían los demás metales. Por eso en la transmutación de los metales se empleó tanto el azufre como el mercurio ya que se pensaba que el efecto dependía de su proporción. Igualmente a principios del siglo XVII, en 1609, Van Helmont ya había hablado de un principio inflamable, llamado GAS PINGÜE.

Georg Stahl, químico y médico de cámara del rey de Prusia, reedita la obra de Becher: "Physica subterranea", modificando ligeramente sus teorías, y en 1702 enuncia su teoría del FLOGISTO.

3. Teoría del Flogisto (De ~1660 a ~1790)

En realidad el nombre de Phlogistos no se debe a Georg Stahl, el cual lo denominó Verbrenliche Wesen (principio combustible), siendo sus seguidores los que cambiaron el nombre a Phlogistos, palabra derivada del griego que significa consumido por el fuego o inflamable. La teoría de Stahl se puede esquematizar como:

- Todo compuesto o sustancia que al calentarse fuertemente se transforme, debe poseer una materia inflamable en su composición llamada FLOGISTO ó FLOGISTON.
- Todo metal es por lo tanto una mezcla de FLOGISTO y CAL, el calor hace prender el flogisto quedando la cal, de tal forma que METAL + CALOR = FLOGISTO + CAL DEL METAL.
- Toda sustancia capaz de arder, posee FLOGISTO, que escapa con la llama en la combustión.
- Todos los metales contienen tanto más FLOGISTO cuando más fácilmente son transformables por la acción del calor.

- Las llamas se extinguen debido a que el aire llega a saturarse de flogisto. El carbón vegetal deja poco residuo después de la combustión, debido a que es prácticamente flogisto puro.

Evidentemente, según esta teoría, la mayoría de los elementos descubiertos hasta aquel entonces no eran tales sino combinaciones con FLOGISTO, que llegó a figurar como un nuevo elemento con su propio símbolo. El calor actuaría sobre esta mezcla de forma que juntamente con el aire ponía en movimiento las partículas de FLOGISTO que alcanzaban velocidades suficientes para poder separarse. Cuando los metalúrgicos primitivos obtenían un metal, lo que hacían era tratar la cal del metal con carbón, sustancia muy rica en FLOGISTO. El carbón cedía su FLOGISTO a la cal con lo que ésta desprendía el metal.

El flogisto todo lo explicaba y no entraba en conflicto con ninguna teoría filosófica, tal es así que Enmanuel Kant escribe en 1787, en la "Crítica de la razón pura": "...con la teoría del FLOGISTO de Stahl se hizo la luz para todos los investigadores de la naturaleza". Sin embargo no era lógico que algunos metales como el estaño y el plomo al ser calcinados y por lo tanto debiendo desprender FLOGISTO, aumentaran de peso, salvo que aquél tuviera peso negativo. Se llegó a explicar este hecho aduciendo que el FLOGISTO, al escapar dejaba una serie de huecos en los que era reemplazado por el aire.

El éxito y la notable rapidez con que se aceptó y desarrolló la teoría del FLOGISTO, se debió a la existencia, en el siglo XVII, de un gran vacío científico y un racionalismo en boga. Se necesitaba explicar una serie de hechos experimentales que aparentemente no se justificaban de otra manera. Sin embargo en función de dicho racionalismo pronto hicieron su aparición las primeras modificaciones.

En 1740, Hoffman explica la antigua metalurgia diciendo que el proceso en sí, no debería consistir en una cesión de FLOGISTO, sino en la eliminación de una sustancia especial que llamó SAL ACIDUM, nombre que será uno de los precursores del oxígeno. Joseph Priestley (1733-1804), descubridor del oxígeno escribió "I have discovered an air five or six times as good as common air". Contabilizó la cantidad de este "buen aire" como del 20% del aire atmosférico

El holandés Herman Boerhaver, profesor de Química de Leyden, en su obra "Elementa Chemica", alude a un seudoflogisto que llama PABULUM IGNIS (que nutre el fuego) y sospecha que en el aire existe un VITAE CIBUM (alimento de vida). Por esas mismas fechas Pott, escribe que "el FLOGISTO es una especie de azufre, ya que al quemar éste no queda cal, pues todo se inflama". Sin embargo la gran categoría y prestigio científico de los seguidores de la teoría, como los ingleses Henry Cavendish y Joseph Priestley, fue suficiente para que mantuviera su auge en todo el siglo XVIII (A Priestley se le llegó a apodar Doctor Flogisto).



G. Stahl



J. Priestley



H. Boerhaave



H.Cavendish

Los flogistas defendían que la combustión dependía únicamente de la capacidad para arder (cantidad de flogisto) y cuando el aire no podía contener más flogisto (se saturaba completamente), la llama se apagaba como se demostraba al encender una vela en un recipiente hermético.

El científico francés Lavoisier argumenta que cómo era posible que un compuesto perdiendo FLOGISTO pudiera aumentar de masa en la combustión. Lavoisier estudia la combustión del fósforo y del azufre en las que se produce un notable aumento de peso y sus conclusiones las presenta en la Academia de Ciencias de Francia. La idea fundamental era ésta: "La calcinación no es una pérdida de FLOGISTO, sino la ganancia de otro elemento y por lo tanto era lógico que aumentara su masa". Ese elemento nuevo va a ser el OXÍGENO, por eso su nacimiento supondrá la muerte del FLOGISTO.

Contemporáneo a los flogistas, en 1744 Mikhail Vasilievich Lomonosov publica un trabajo sobre las causas de calor y del frío, estableciendo que el calor es una forma de movimiento (otra vez el binomio calor-movimiento), y en 1748 formula las leyes de conservación de masa y energía.

4. Teoría del “fire air”

Carl Wilhelm Scheele (1742 – 1786) era un químico con una formación basada en la teoría dominante del phlogiston, de modo que cuando descubrió el oxígeno, le denominó “fire air” porque apoyaba la combustión, esta denominación es decididamente flogista, ya que él no creyó en que sus trabajos fueran a poner en cuestión dicha teoría.

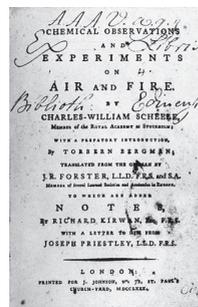
Scheele describió la existencia del oxígeno y del nitrógeno en su libro “Tratado químico en el aire y el fuego” de 1777, posterior a la publicación de los trabajos de Priestley y Lavoisier. En su libro, él también distinguió entre transmisión de calor por radiación, de las de convección o conducción.

La investigación de Scheele sobre el aire le permitió concluir que este era una mezcla de dos gases “aire del fuego (Feuerluft)” y “aire asqueroso (verdorbene

Luft)”, oxígeno y nitrógeno respectivamente. Scheele también descubrió un elemento llamado Molybdenum que ahora es el número 42 en la tabla periódica de los elementos.



Carl Wilhelm Scheele



5. Teoría del calórico (de ~1780 a ~1860)

La teoría calórica fue introducida por Antoine Laurent Lavoisier (1743 -1794). Lavoisier había descubierto la implicación del oxígeno en la combustión, en su “Réflexions sur la phlogistique” (1777) explicó que la teoría del phlogiston era contraria a los resultados experimentales, y propuso un “líquido sutil” llamado calórico como esencia del calor. Según esta teoría, la cantidad de esta sustancia es constante a través del universo, y fluye de los cuerpos calientes a los fríos. Puesto que el calor era una sustancia material en la teoría calórica, y por tanto no podría ni ser creada ni destruida, la conservación del calórico constituía la premisa central.



Antoine Lavoisier



S. Carnot



Incluso hacia 1780, algunos creyeron que el frío también era un fluido “frigoric”, así Pierre Prévost discutió que el frío fuera simplemente la carencia de calórico.

La introducción de la teoría calórica también fue influenciada por los experimentos de Black relacionados con las características térmicas de los materiales. La teoría calórica, coexistió con otra teoría, la cinética. Las dos teorías eran consideradas equivalentes en aquel entonces, pero la teoría calórica podía explicar la combustión y la calorimetría.

La teoría del calórico explicaba casos como el de enfriamiento de una taza de café en un ambiente más frío, suponiendo que el calórico fluye lentamente de las regiones densas en calórico (el café) a las menos densas (el aire ambiente). También fenómenos como el de calentamiento de aire, asumiendo que el calórico pasa al aire, etcétera.

Sadi Carnot desarrolló su principio del Ciclo de Carnot, vigente actualmente, sobre la base de la teoría del calórico. Asimismo, Laplace también trabajó en base a esta teoría. El renombrado "teorema de Carnot" expresaba que el trabajo máximo realizado por una máquina térmica es función de la cantidad de calórico y de las temperaturas del foco caliente y del frío entre los que trabajaba la máquina. El calor intercambiado entre los dos focos se aprovechaba para producir trabajo y la cantidad de calor que pasa de un foco al otro se mantiene constante. En este trabajo se llegaba a la conclusión de que no podía aprovecharse todo el calor de la fuente caliente para convertirlo en trabajo.

6. Teoría ondulatoria-vibratoria “wave theory of heat” (~1830 a 1860)

Esta teoría es un paso virtualmente olvidado entre la teoría del calórico y la teoría cinética. Según esta, el calor es la vibración de un fluido etéreo que ocupa todo el espacio y en el que se transmite el movimiento vibratorio de un átomo a otro.

Según André Marie Ampère (1775-1836) "Es claro que admitimos el fenómeno del calor es producido mediante vibraciones, es una contradicción atribuir al calor una fuerza repulsiva (teoría del calórico) en los átomos, lo que les impediría vibrar".

Herman von Helmholtz (1821-1894) escribió en 1845, "Recientemente, especialmente debido a la igualdad de las leyes de radiación de calor y luz, y por tanto deducimos una teoría ondulatoria del calor, como una teoría ondulatoria de la luz. Por lo tanto, la posibilidad de la teoría material (calórico) desaparece, y nos vemos forzados a considerar tanto al calor como a la luz como movimiento" (Wärme, physiologisch).

Entre 1842-1850 la teoría vibratoria da soporte al desarrollo de la termodinámica, en temas tales como la conservación de la energía o el equivalente mecánico del calor. Hacia finales del siglo XIX, la cuestión era ¿por qué el éter no recibe parte de la energía vibratoria participando en el equilibrio térmico?, esta cuestión desplazó el

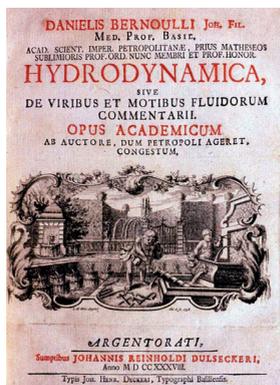
estudio a la teoría cinética, a pesar de que el interés por el intercambio térmico por radiación había mantenido viva a la teoría ondulatoria.

7. Teoría cinética del calor “termodinámica” (de ~1820 a la actualidad)

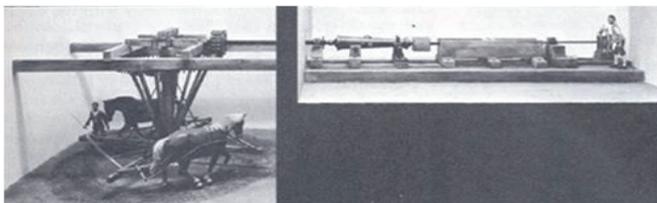
En 1738 Daniel Bernoulli publica “Hydrodynamica”, en la cual se sientan las bases de la teoría cinética de gases. En su trabajo Bernoulli argumenta que los gases están constituido por un gran número de moléculas moviéndose en todas direcciones, y que su impacto sobre las paredes del recinto causa la presión, además dice que lo que conocemos como calor es simplemente producto de de la energía cinética, es decir del movimiento. Esta teoría no fué aceptada de forma inmediata, debido a que no se había establecido el principio de de la conservación de la energía, y que los físicos no entendían que las colisiones entre moléculas fuesen perfectamente elásticas.

En 1798, Benjamin Thompson (Conde de Rumford) publica un informe "An Experimental Enquiry Concerning the Source of the Heat which is Excited by Friction" sobre su investigación experimental referente a la generación de calor por fricción durante la fabricación cañones en el arsenal de Munich en 1797. Rumford sumergió un cañón en agua, la cual durante el taladrado hervía continuamente de una manera que parecía inagotable, había encontrado que en el proceso no existía una pérdida de su capacidad de producir calor, y por lo tanto de pérdida de calórico. Sugirió que el calórico no podría ser una “sustancia conservada” aunque las incertidumbres experimentales en su experimento fueron discutidas extensamente. En su artículo, Rumford afirma que sus experimentos habían demostrado que el calor producido por la perforación era inagotable. Esta afirmación, como cabía esperar, le valió abundantes críticas en su tiempo, pues con ella extrapolaba al infinito experimentos de unas pocas horas. Más aún, uno de sus críticos le desafió a continuar sus experimentos hasta que el cañón se enfriara por completo antes de poder llegar a esa conclusión, sugerencia que Rumford pasó por alto. No cabe duda de que el experimento cuidadosamente realizado por Rumford puso de manifiesto una verdadera relación entre el calor y el trabajo mecánico. Sin embargo, su autor no nos da indicio alguno de haber pensado en esa vinculación sino en términos cualitativos.

Sus resultados no fueron considerados como una “amenaza” para la teoría calórica en ese momento, pues esta teoría era considerada equivalente a la alternativa teoría cinética. De hecho, a algunos de sus contemporáneos, los resultados les pareció que aumentaba la comprensión de la teoría calórica.



Hydrodynamica D. Bernoulli



Benjamin Thompson. Count Rumford

Rumford trató de medir el peso del calórico en diferentes experimentos con vistas a refutar esta teoría. Por último Rumford se lamenta que otros autores no aceptaban sus teorías, según las cuales el calor se transmitía en un líquido por medio de corrientes de convección.

A principios de los años 1840 Joule y Mayer establecen una relación cuantitativa de equivalencia entre el trabajo y el calor, y comienza a introducirse el concepto de energía diferenciándolo de fuerza y por tanto empieza a abandonarse el modelo del calórico.

El experimento de Rumford inspiró el trabajo de Prescott y otros hacia mediados del siglo XIX. En 1850, Rudolf Clausius publicó una demostración en que las dos teorías eran de hecho compatibles, mientras el principio de los “caloristas” de la conservación del calor fuera sustituido por el principio de conservación de la energía. Así, en su memoria publicada en Poggendorff's Annalen, Clausius analiza la relación entre el trabajo y el calor realizado sobre un sistema y cómo es necesario introducir el concepto de energía interna que será la que variará en estas interacciones mecánica y térmica entre este sistema y otro externo. Esta relación fue considerada como la primera ley mecánica del calor. Así pues, los resultados del estudio de Carnot se considerarán válidos pero modificando la hipótesis de la conservación del calórico por el principio de conservación de la energía total en un sistema aislado.

En cuanto a la teoría cinética del calor, esta supone una gran simplificación en cuanto al origen del calor, ya que considera al calor simplemente como una forma de energía cinética, siendo la energía cinética total de un movimiento aleatorio la de todos los átomos, así lo trata John Herapath en 1821 en su trabajo sobre teoría cinética de gases, según el cual el calor es movimiento, y no necesita de fuerzas

repulsivas entre los átomos. La temperatura mínima posible se consigue cuando todos los átomos poseen velocidad nula, así que su energía cinética también lo es y la temperatura es la del cero absoluto. La teoría cinética también permite una explicación simple de la naturaleza de la temperatura, considerándola como la cantidad de energía por molécula, mientras que el calor es la cantidad total de energía que poseen todas las moléculas.

Contribución de Boltzmann a la Termodinámica

En la segunda mitad del siglo XIX, los termodinámicos se encontraban divididos en dos grupos; los partidarios de la termodinámica general macroscópica que no participaba de la hipótesis atómica de la materia y los de la termodinámica atomística. Pero estas posiciones no eran irreconciliables, el propio Clausius adoptó hipótesis atomísticas según conviniera o no a su trabajo. Uno de los principales teóricos de la termodinámica atomística fue el físico austriaco Ludwig Boltzmann (1844-1906) que contribuyó al establecimiento de un campo específico que hoy recibe el nombre de Mecánica Estadística, así como al desarrollo del mecanismo de la transmisión de calor por radiación.

Boltzmann, en su trabajo “Sobre el significado mecánico del segundo principio del calor” publicado en 1886, desarrolla un nuevo método estadístico en procesos donde hay gran número de partículas mediante el que explica el concepto de entropía que había sido introducido por Clausius el año anterior.

James Clerk Maxwell, Ludwig Boltzmann y Josiah Willard Gibbs, entre otros, extendieron las ideas de la termodinámica clásica, mediante la nueva teoría molecular de los gases, al dominio de la actualmente denominada mecánica estadística. En termodinámica clásica se trata con el conjunto de un sistema, mientras que en mecánica estadística se reconoce el papel de los constituyentes más diminutos del sistema. Por ejemplo la temperatura, en un sistema define un macroestado, mientras que la energía cinética de cada partícula en el sistema define un microestado. La variable temperatura como macroestado se define como la media de las variables a nivel de microestado.

En el siglo XX, la termodinámica ha llegado a ser una disciplina dentro de la Física, la cual se ocupa del estudio de las propiedades generales de los sistemas en el equilibrio, así como de los procesos que tienen lugar mientras se alcanza dicho equilibrio.

8. El desarrollo de la transmisión del calor

La transmisión o transferencia de calor se define como el paso natural de energía térmica desde un cuerpo a mayor temperatura a otro de menos nivel térmico. Debido a que las fuentes de energía se encuentran repartidas por todas partes, el

calor se genera universalmente, y su transmisión es un fenómeno tan corriente como la “gravedad”, denominándose “Termodinámica” la disciplina que lo estudia. La Termodinámica constituye la rama que se ocupa de las aplicaciones del calor, es decir, de todo lo relativo a su producción o generación, transmisión, utilización o aprovechamiento, siendo la transmisión de calor la base principal sobre la que se apoya.

Desde el punto de vista termodinámico interesa, básicamente, la transferencia de energía global, hacia o desde un sistema (calor, trabajo, o cualquier otra forma). Por ejemplo en el estudio de ciclos se está interesado en la energía calorífica que va al sistema, el trabajo, y la eficiencia resultante. No importa el tiempo o diferencia de temperaturas requeridos para llevar a cabo la transferencia de energía. Por su parte, en transmisión de calor se plantean interrogantes tales como:

- ¿Cuál debe ser la diferencia de temperaturas para la transferir un determinado flujo de calor?.
- ¿En unas condiciones dadas cuanto tiempo se requiere para la transmisión de una energía determinada?.
- ¿Qué potencia se transmite en un sistema?.
- ¿Cuál debe ser la superficie de intercambio térmico a disponer para la absorción o cesión de una potencia calorífica?.
- ¿Cuál es el campo de temperaturas asociado a un sistema en unas condiciones conocidas?

Evidentemente, con estas premisas, el contacto con los procesos que envuelve la disciplina Termodinámica es universal y ha sido objeto de estudio desde muy antiguo, no obstante en este trabajo nos vamos a centrar en la evolución histórica de las leyes fundamentales, utilizadas hoy en día, para describir las vías de transmisión de calor. El estudio de los fenómenos de transmisión de calor, y las correspondientes leyes básicas que los rigen, se hizo paralelamente al desarrollo de la termodinámica. Y en la actualidad se distinguen tres modalidades básicas de transmisión del calor; conducción (transmisión de calor en sólidos o fluidos sin movimiento macroscópico), radiación (transmisión sin necesidad de soporte material) y convección (transmisión de calor entre un sólido y un fluido en movimiento que lo baña), si bien algunos consideran la convección como suma de conducción de calor, entre el sólido y la capa adyacente de fluido en reposo, más el movimiento de las partículas del fluido, alejándose del sólido y dejando paso a otras del mismo fluido.

El desarrollo de las vías de transferencia de calor ha sido, como veremos, desigual, así la conducción térmica ha tenido un rápido y sofisticado desarrollo matemático en base a la ley de Fourier, mientras que la convección del calor ha progresado de forma experimental al chocar con la dificultad de obtener el campo de velocidades

La contribución de Newton en el campo de la transmisión de calor no se reduce a la ley de enfriamiento, sino que alcanza a la radiación térmica en lo tocante a sus ensayos sobre el espectro de la luz. Como antecedente al trabajo de Newton, en el año 1000 un científico iraquí llamado Abú Alí Hassan ibn Al-Haitham, conocido por la forma latinizada de su nombre (Al Hazén), su trabajo sobre óptica “Kitab al-Manazir”, fue traducido hacia 1270 bajo el título de “*Opticæ thesaurus Alhazeni*”, y discute allí la naturaleza de la luz, la refracción, el papel de la atmósfera, la fisiología de la visión y muchos temas más. Postula correctamente que la atmósfera no es infinita, sino que mide 15.000 metros de espesor, y que un atardecer rojo es producido por la refracción de la luz del sol en el aire cuando el astro se encuentra a menos de 19° del horizonte, afirma que la refracción es el fenómeno responsable de la descomposición de la luz en un arco iris. Luego de Al Hazén, la refracción espectral fue estudiada por Roger Bacon, por el franciscano John Peckham (1250) y por Witelo. En 1300, un monje llamado Thierry de Freiberg decidió, como Al Hazén, abandonar las especulaciones teóricas y pasar a la experimentación; mediante un trabajo minuciosamente controlado, estudió el arco iris haciendo pasar rayos de luz por esferas de cristal llenas de agua, y consiguió predecir el ángulo y la trayectoria de cada rayo de luz al cambiar de medio transmisor, comprobando que cada uno se reflejaba en el interior de las gotas esféricas. Los conocimientos logrados por Thierry de Freiberg fueron reproducidos, en 1360, en el libro *De Meteoris*, de Themon Judí (que es sólo un apodo que quiere decir “Hijo de Judío”). Sin embargo, el trabajo de Al Hazén había sido olvidado, y Freiberg creyó que los colores en que se convertía la luz blanca al pasar por sus prismas esféricos eran sólo un “efecto de superficie”, una “distorsión de la calidad de la luz” producida al atravesar la interfase aire-vidrio. En 1665 Isaac Newton cambió los prismas esféricos de Freiberg por prismas triangulares, y observó que los rayos de luz blanca se transformaban en siete colores nuevos. Deseando demostrar que Freiberg estaba equivocado pero que Al Hazén tenía razón, colocó un segundo prisma en forma perpendicular al primero, y comprobó que los “espectros” se alargaban longitudinalmente, pero que el ángulo en que se refractaba cada color permanecía constante. Tomó entonces una sola “banda de color” (hoy diríamos “luz de una misma longitud de onda”) producida por el primer prisma, y la hizo atravesar el segundo. A la salida de éste, la luz roja seguía siendo roja, y el ángulo del rojo se mantenía constante. Finalmente, tomó dos prismas, los colocó en forma opuesta sobre un mismo plano, y comprobó que el segundo prisma recomponía los siete colores producidos por el primero para producir luz blanca.

Ya hemos visto que el fenómeno de transmisión de calor por radiación era, lógicamente, conocido y había sido estudiado desde el punto de vista de su naturaleza y propagación como onda de forma similar a la de la luz. Entre los antecedentes podemos citar a Johann Heinrich Lambert quien descubrió en 1760 la ley fotométrica llamada Ley de Beer-Lambert, que relaciona la absorción de luz con las propiedades del material atravesado. August Beer (1825 - 1863) físico alemán, profesor en la

Universidad de Bonn, estudió diversos fenómenos ópticos y la ley de Beer da una medida de la absorción que sufre la radiación al atravesar un medio gaseoso. También la variación de la radiación con la dirección, la Ley de Lambert o Ley del coseno de Lambert, por su parte Humphry Davy, en 1798, estableció la propagación del calor en el vacío, característica de la transmisión de calor por radiación. Previamente, en 1791 Pierre Prevost en sus trabajos “Mémoire sur l'équilibre du feu” y “Essai sur le calorique rayonnant” establece que todo cuerpo a temperatura superior a 0 K radia energía. Prevost consideraba que el actualmente conocido gas de fotones o radiación electromagnética era un fluido que él llamó "free heat". En 1800 William Herschel publica su "An investigation of the powers of prismatic colours to heat and illuminate objects" resultado de su investigación sobre los efectos de las diferentes longitudes de onda de la luz sobre termómetros. El descubrimiento de la radiación ultravioleta en 1801 por Johann Ritter, el cual observó los efectos de la radiación solar sobre sales de plata y dedujo la existencia de radiación fuera del espectro visible. En 1804 John Leslie (1766-1832) publica “An Experimental Inquiry into the Nature and Propagation of Heat” mostrando que la luz y la radiación térmica tienen propiedades similares. La radiación infrarroja fue descubierta en 1830-32 por Macedonio Melloni y William Herschel. Melloni ya había establecido que la luz tiene las mismas propiedades que la radiación.

En lo referente a transmisión de calor por radiación, los estudios continuaron con los logros de investigadores como John Tyndall, el cual trabajó en la medida de las propiedades radiantes de gases, incluyendo la construcción del primer espectrofotómetro, el cual utilizó para medir el poder absorbente de gases como el vapor de agua, el dióxido de carbono, el ozono, diversos hidrocarburos y otros gases, descubriendo que el oxígeno, el nitrógeno y el hidrógeno eran casi transparentes a la radiación, no así otros gases, faceta importantes de cara a la transmisión por radiación en medio participante y el cambio climático. Escribió artículos sobre los problemas de la física en esos años; en uno de ellos, titulado “Heat as a Mode of Motion” (el calor como una modalidad del movimiento), reprodujo el trabajo de Rumford sobre el experimento de perforación de cañones, comentando al respecto: "En esta memoria, Rumford aniquila la teoría material del calor”.

Por su parte Balfour Stewart investigó sobre la radiación del calor, sus trabajos supusieron una extensión a la ley de Pierre Prévost y demostraron que la radiación no sólo se produce en la superficie de los cuerpos, sino también en su interior. También demostró que el poder de radiación y de absorción de una sustancia debe ser idéntico, tanto en el total de sus partes como en cada una de ellas.

Samuel Pierpont Langley publicó en 1890 sus observaciones de los infrarrojos en el Observatorio Allegheny de Pittsburgh junto con Frank Washington Very, las cuales fueron empleadas por Svante Arrhenius para hacer los primeros cálculos del efecto invernadero. A él se debe la medida de la constante solar y el perfeccionamiento del bolómetro, basado en el cambio de la resistividad eléctrica de los metales con la

temperatura, el dispositivo de Langley era capaz de detectar la radiación térmica debida a una vaca a un cuarto de milla de distancia.



J. Lambert



P. Prevost



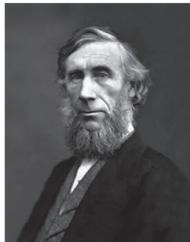
J. Ritter



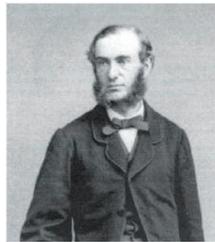
W. Herschel



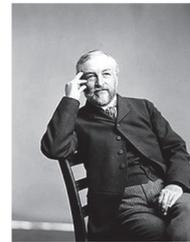
M. Melloni



J. Tyndall



B. Stewart



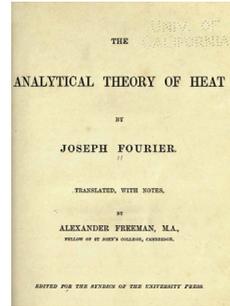
S. Langley

Podemos observar algo que se repetirá a partir de ahora, y es la mayor dedicación de las investigaciones a la radiación electromagnética, lo cual se debe a su interés no sólo en el ámbito térmico, sino para la visión animal (y toda la ingeniería de la iluminación), biológico (fotosíntesis, preservación de alimentos, radioterapia), químico (análisis espectroscópico, fotografía), industrial (óptica, telecomunicaciones, control de procesos, reactores nucleares, criogenia), espacial (control térmico de naves espaciales, vuelo hipersónico), militar (visión infrarroja, generadores isotópicos, armamento nuclear), etc.

El segundo aporte de verdadera importancia en el campo de las leyes de la transmisión de calor se debe a Jean Baptiste Joseph Fourier (1768 - 1830). En 1807 Fourier escribe su “On the Propagation of Heat in Solid Bodies” en el que se introducen tratamientos matemáticos novedosos como la técnica de expansión en serie, en 1822 publica su “The Analytical Theory of Heat”. Fourier realizó una serie de trabajos experimentales con vistas a la obtención de las leyes que gobiernan las formas de transmisión de calor tanto por conducción como por convección.



J. Fourier



The Analytical Theory of Heat

Las observaciones de Fourier sobre la convección del calor mostraban una proporcionalidad entre el flujo de calor y la diferencia de temperaturas, de tal modo que:

$$q \propto \Delta T \quad (1)$$

Pero la expresión (1) para Fourier no podía ser una ley válida por no ser homogénea, por lo que considera una segunda posibilidad se presenta en la expresión (2)

$$q \propto h \Delta T \quad (2)$$

en la que “h” es una constante de proporcionalidad, es decir un número sin dimensión, por lo que la expresión (2) tampoco es homogénea. Fourier considera los siguientes pasos:

Asumir que las leyes de la naturaleza son dimensionalmente homogéneas. Para conseguir esta homogeneidad, la constante de proporcionalidad de la expresión (2) debe ser un parámetro dimensional idéntico a $(q/\Delta T)$, lo que transforma la expresión (2) a la homogénea (3).

$$q = (q/\Delta T) \Delta T \quad (3)$$

asumiendo que el parámetro $(h = q/\Delta T)$ es un coeficiente de transmisión de calor por convección ó coeficiente de película, con lo que:

$$q = h \Delta T \quad (4)$$

esta última ecuación es la ley de convección homogénea de Fourier, habitualmente atribuida a Newton.

Por supuesto su principal aportación es la denominada ley de Fourier de la transmisión de calor por conducción, parece ser que sus trabajos se encontraban estancados hasta que en 1804 recibió la visita de Biot en Grenoble, este que también estaba experimentando en este campo le sugirió independizar la investigación a las zonas internas de un cuerpo (conducción) de las externas (convección), y al parecer le dio

copia de sus trabajos. En base a esta ayuda Fourier elaboró su ley de la conducción según la cual:

$$\text{Flujo de calor} = k (dT/dx) , k \text{ conductividad del sólido}$$

Como se ha dicho, en diciembre de 1807 presentó su memoria sobre “La propagación del calor en sólidos”, en la que trata la difusión de calor entre masas discretas y ciertos casos especiales de cuerpos continuos (placas, anillos, esferas, cilindros, prismas rectangulares y cubos). Esta memoria no llegó a publicarse debido a los ataques de Laplace, Poisson y Biot, los cuales se basaban en la falta de referencias al trabajo de Biot.

Jean Baptiste Biot, en 1804 había publicado su trabajo "Memoire sur la propagation de la chaleur" sobre la distribución de temperaturas en barras de hierro calentadas en uno de sus extremos. Joseph L. marqués de Laplace, asociado con Lavoisier, inventó un calorímetro de hielo y demostró que la respiración era una forma de combustión, además contribuyó a la transmisión de calor por conducción con la ecuación que lleva su nombre. En 1811, Siméon-Denis Poisson (1781-1842) desarrolla su teoría matemática del calor.



J. B. Biot



J. L. Laplace



S.D. Poisson

Una primera dificultad en la experimentación para deducir la ley de Fourier se deriva de la posibilidad de enfriamiento no sólo por convección, sino también por radiación e incluso evaporación, de ahí que en los resultados experimentales existiesen discrepancias, sobre todo para diferencias elevadas de temperatura. Así lo señalaron Pierre-Louis Dulong (1785-1838) - Aléxis Thérèse Petit (1791-1820) que en 1817, en base a resultados experimentales, con diferencias de hasta 243°C, reformularon la ley de enfriamiento como:

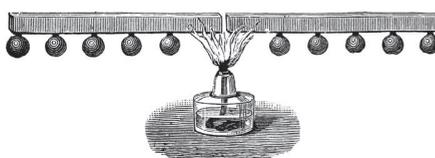
$$q \propto \Delta T^{1.25} \text{ ó } q = K \Delta T^n$$

en la que “K” es una constante de proporcionalidad y el exponente “n” se mueve en el rango de 1.1 ÷ 1.6.

Capítulo aparte merecen los ensayos sobre transmisión de calor por conducción de Jan Ingenhousz (1739-1799) físico de la corte austríaca, el cual ideó en 1789 un tipo de dispositivos cuya finalidad era poner de manifiesto la capacidad de transmisión de calor de diferentes materiales sólidos. El dispositivo consta de diferentes cilindros macizos de materiales diferentes con las mismas longitudes y diámetros. Son llevados a una temperatura constante en uno de sus extremos, bien con un baño de agua, bien adosándolos a una superficie isoterma, en el extremo opuesto se pone una cantidad de cera que se funde al aumentar la temperatura debido al flujo de calor que penetra en el extremo contrario.

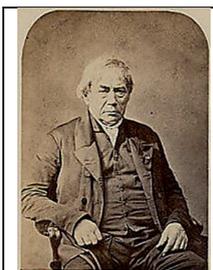


J. Ingenhousz

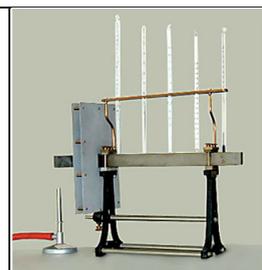
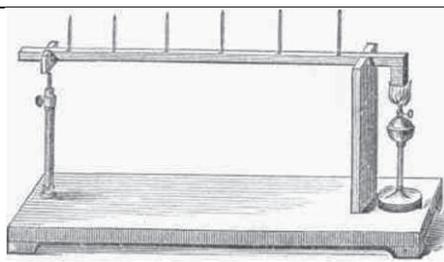


Dispositivos Ingenhousz

Los ensayos de Ingenhousz fueron retomados por César Mansuète Despretz (1798-1863), cuya investigación estableció las bases de la física moderna en el área de la Termodinámica; “The Heat of Combustion (1828)”; “Investigation of the Mercurial Thermometer (1837)”; “The Laws of Conductivity of Heat in Liquids (1838)”. Una de sus vías de investigación fué la determinación de materiales tales como el oro, el platino, la plata, el cobre, el hierro, el mármol, la porcelana y los materiales integrantes de los ladrillos en calderas etc. También la transmisión de calor en la superficie de contacto entre sólidos (resistencias de contacto).



C. M. Despretz



Dispositivos Despretz

Entre 1836 y 1844 James David Forbes publicó cuatro trabajos sobre “Researches on Heat” (Investigaciones sobre el calor) en el Transactions of the Royal Society of Edinburgh. En 1846 comenzó a realizar experimentos sobre la temperatura de la Tierra a diferentes profundidades y en diferentes terrenos cercanos a Edimburgo, los cuales le llevaron a determinar la conductividad térmica de la arenisca y la arena suelta, entre otros sólidos. Hacia finales de su vida estudió la conducción de calor en barras; su último trabajo mostraba que la conductividad térmica del hierro disminuye con el aumento de la temperatura. James Clerk Maxwell comenzó sus estudios bajo su tutela.

En el estudio posterior sobre la conductividad térmica para diferentes materiales conviene destacar:

- La ley de Wiedemann-Franz obtenida por vía experimental en 1853. La ley establece la relación entre la conductividad térmica “ k ” y la eléctrica “ σ ”, para la mayoría de los metales es proporcional a la temperatura “ T ”, siendo el factor de proporcionalidad “ L ” igual para todos los metales. El factor de proporcionalidad entre conductividades térmica y eléctrica fue introducido por L. Lorenz en 1872.
- Percy Williams Bridgman (Premio Nobel en física de 1946) derivó una expresión para la conductividad térmica en líquidos. Considerando que las moléculas del líquido se encuentran distribuidas en una red cúbica y que la energía se transfiere vía colisiones y a una velocidad que es la del sonido en el líquido.
- Arnold Eucken propuso, para gases poliatómicos, una expresión de la conductividad térmica en función del calor específico, y la viscosidad.



G. Wiedemann- L. Lorenz



P.W. Bridgman



A. Eucken

En cuanto al desarrollo de y estudio de la conductividad térmica en sólidos merece la pena destacar el descubrimiento del grafeno, cuyo estudio le ha valido el nobel de física de 2010 al tandem Andre Geim y Konstantin Novoselov. El término grafeno se

refiere a una única lámina de átomos de carbono organizados en una estructura cristalográfica de tipo hexagonal. La estructura electrónica de grafeno era conocida por los físicos teóricos desde hace aproximadamente 60 años. A. Balandin y otros en su trabajo de 2008 "Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene", calcularon la conductividad térmica del grafeno, cuyo valor resultó ser de 5300 W/(m K) a temperatura ambiente, S. Barber lo cifra en aproximadamente 6600 W/m K, y S. Ghosh en el rango de 3080 a 5150 W/m K. Este es el valor más alto conocido para un sólido, un 50% más alto que el de los nanotubos de carbono y más de 10 veces mayor que el de los metales como cobre y aluminio. La gran conductividad térmica del grafeno es probablemente resultado de la relativa facilidad que tienen los átomos de carbono para moverse en el grafeno, comparada con otros materiales.

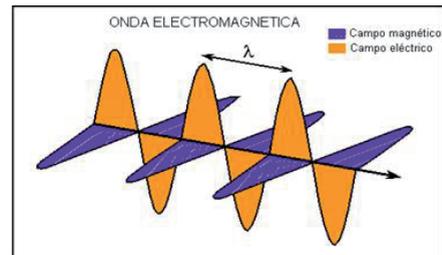
James Clerk Maxwell en la década de 1850 relacionó una temperatura específica con una velocidad específica de las moléculas de un cuerpo. También se debe a Maxwell la concepción de su "demonio" y su implicación con la segunda ley de la Termodinámica. Maxwell comenzó su trabajo en la Universidad de Edimburgo bajo la tutela de James David Forbes, en el campo de la teoría de ondas merece destacarse la concesión de la medalla Rumford en 1869 por sus investigaciones sobre la composición de los colores y otros trabajos sobre óptica.



J. D. Forbes



J. C. Maxwell



Ondas electro-magnéticas de Maxwell

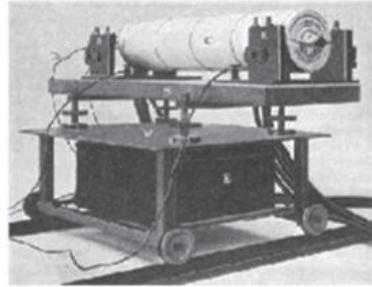
En 1859, Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) obtiene, a partir de la segunda ley de la Termodinámica, que los objetos no pueden ser diferenciados por su radiación térmica a una temperatura dada. En 1860 Kirchhoff estableció la definición del cuerpo negro como capaz de absorber toda la radiación incidente, incluso lo modelizó como un recinto dotado de un pequeño orificio para la entrada de la radiación. Recibió la medalla Rumford en 1862 por sus trabajos sobre transmisión por radiación. Un cuerpo negro de características fiables no se construye hasta 1898 por O. Lummer y S. Kurlbaum.



G. R. Kirchhoff



O. Lummer



Cuerpo negro de 1898

Josef Stefan (1835-1893) dedujo en 1879, de forma empírica, la ley de emisión del cuerpo negro de Kirchhoff, mostrando que el flujo radiante de un cuerpo negro es proporcional a la temperatura absoluta elevada a la cuarta potencia, este tipo de dependencia con la temperatura ya había sido detectado en 1847 por John Williams Draper. Esta relación es conocida como la ley de Stefan-Boltzmann (1844-1906), ya que éste último consiguió deducirla en 1884, vía analítica, desde consideraciones termodinámicas. En 1891, Stefan publicó también un trabajo sobre la formación del hielo en los polos.



J. Draper



J. Stefan



L. Boltzmann

A mediados de 1900 Lord Rayleigh y Sir James Jeans presentaron un cálculo clásico de la densidad de energía para el cuerpo negro ($E_{n\lambda} \approx \frac{2\nu^2}{c^2} kT$). La ley de RAYLEIGH - JEANS se aproxima bien a los datos experimentales en la región de frecuencias bajas, pero no reproduce todo el espectro de radiación del cuerpo negro, ya que tiende al infinito para bajas longitudes de onda (la denominada catástrofe del ultravioleta).

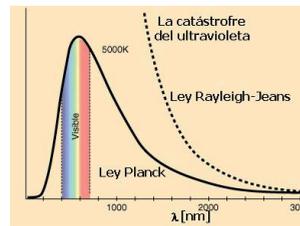
Wilhelm Wien (1864 - 1928) en 1893 propuso sus dos leyes que relacionan la emisión del cuerpo negro con su temperatura. Wien había obtenido mediante razonamientos termodinámicos una relación entre la emitancia monocromática de un cuerpo negro y la temperatura y la longitud de onda (función que no había podido ser explicitada). Sus trabajos sobre la radiación concluyeron que cuando aumenta la temperatura crece la emitancia, pero lo hace de manera más acusada, cuando más corta es la longitud de onda, de forma que el valor máximo se desplaza hacia las longitudes de ondas más cortas cuando la temperatura se eleva. El lugar geométrico de las máximas emitancias monocromáticas se determina sin mas que derivar la emitancia monocromática e igualar a cero. Obtuvo el premio Nobel de Física en 1911.



Lord Rayleigh



J. Jeans



La catástrofe ultravioleta



W. Wien

Heinrich Rubens (1865-1922) construyó un galvanómetro y un bolómetro y estudió principalmente la radiación infrarroja. Sus mediciones sobre la radiación del cuerpo negro constituyeron una confirmación de las teorías cuánticas de Planck.

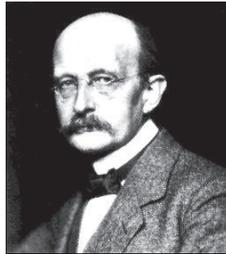
Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), toma como punto de partida el concepto de cuerpo negro propuesto por Stewart y perfeccionado por Kirchhoff, Planck lo define como “En un recinto vacío limitado por paredes perfectamente reflectoras se alcanza un momento en el que la radiación contenida en el recinto, incluyendo todas sus propiedades y su distribución espectral de energía, solo dependen de la temperatura”. Puesto en contacto con Boltzmann, éste le comunica que en su opinión no es posible elaborar una teoría concluyente sobre la radiación del cuerpo negro sin introducir un elemento de discontinuidad. Planck introduce una constante universal “ h ”, que según él tiene dimensiones de una acción, por lo que la denomina “quantum elemental de acción”. De tal manera que cualquier acción es un múltiplo entero de este quantum elemental, así por ejemplo para transportar un cuerpo de un sitio a otro la acción necesaria es igual a “ $k h$ ”, en el que “ k ” es un número entero. Este concepto constituye la base de la física cuántica. A partir de esta base Planck obtuvo la distribución espectral del cuerpo negro, presentandola en primer lugar en 1900 en Berlín, en la Sociedad Alemana de física “On an improvement of the Wien spectral equation”, aunque en su forma definitiva un poco

mas tarde en su “On the theory of the law of the energy distribution in the normal spectrum”, y su tratamiento completo se presento un año después en Annalen der Physik bajo el título “On the law of the energy distribution in the normal spectrum”. Le fue concedido el premio Nobel de Física en 1918 "en reconocimiento a los méritos contraídos por la formulación de la teoría de los cuantos y por su contribución al desarrollo de la física", su ley predice, de forma implícita, que en la física subatómica no son válidas las leyes de la mecánica clásica dado que éstas se concibieron para procesos continuos. La teoría cuántica de Planck sirvió como fundamento para la formulación de las teorías propuestas por Albert Einstein, Niels Bohr y Werner Heisenberg. Dado que Planck se pronunció en contra del antisemitismo durante la época de la hegemonía nazi en Alemania (1933-1945), se le privó de toda posibilidad de trabajar hasta el final de la Segunda Guerra Mundial.

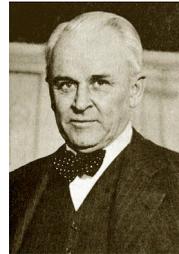
En 1912, Robert Millikan, hace la primera determinación fotoeléctrica de la constant “h” de Planck, y en 1924 Satyendranath Bose deriva la ley de Planck considerando la radiación como un gas de fotones, su trabajo “Ley de Planck e hipótesis sobre los fotones” fue rechazado por la revista Philosophical Magazine, entonces Bose lo envió a Einstein, quién lo tradujo al alemán y lo envió al Zeitschrift für Physik con un recomendación para su publicación. La generalización debida a Einstein del método de Bose es el origen de estadística cuántica denominada de Bose-Einstein.



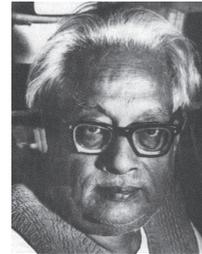
H. Rubens



M. Planck



R. Millikan



S. Bose

Volviendo al tema de la transmisión de calor por convección, tal como se comentó, el estudio de la transmisión de calor por esta vía se ralentiza ante la necesidad de conocer el campo de velocidades en el fluido en movimiento, a pesar de los intentos de evaluarlo vía matemática, tales como los de George Gabriel Stokes (1819 - 1903), el cual no es ajeno al desarrollo de la transmisión de calor como lo demuestra la concesión del premio Rumford de 1852 por su trabajo sobre la luz, ligado a la transmisión de calor por radiación, junto con Claude Louis Navier (1775 - 1846), discípulo de Fourier, dieron nombre a un conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales no lineales, en base a los principios de conservación de masa y cantidad de movimiento, no obstante su resolución se encuentra limitada a algunos casos simples.

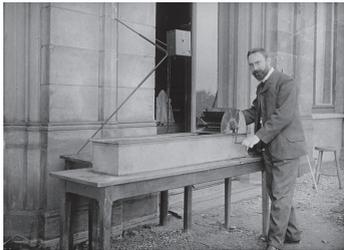


G. Stokes

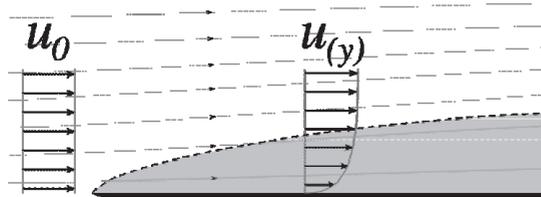


C. Navier

Ludwig Prandtl (1875 – 1953) es considerado el gran renovador en el campo de la mecánica de fluidos, debido a la introducción del concepto de “capa límite”, además de trabajos sobre flujo turbulento. En 1904 presentó su revolucionario trabajo “Flussigkeitsbewegung Bei Sehr Kleiner Reibung” (Fluid Flow in Very Little Friction) en el que describe su teoría de la capa límite.



L. Prandtl



Esquema capa límite

Theodore von Kármán (1881 - 1963) se graduó en 1902, y se incorporó al grupo de Ludwig Prandtl en la Universidad de Göttingen, recibiendo su doctorado en 1908. Su trabajo vanguardista en aeronáutica y astronáutica conlleva importantes contribuciones a la mecánica de fluidos, la teoría de turbulencia, el vuelo supersónico, las matemáticas en ingeniería y la estructura de aviones. En 1911 hizo un estudio de lo que pasaba detrás de un cuerpo sumergido en una corriente. El estudio fue tan bueno que hoy conocemos como calles, remolinos o vórtices de von Karman a lo que él descubrió. Ingeniero a la par que investigador, le gustaba decir que los ingenieros son aquellos que perpetúan los errores cometidos por la generación anterior.



T. Von Karman



Camino de vórtices en las Islas Canarias

Wilhelm Nusselt (1882 – 1957), comienza sus actividad en el área de la transmisión de calor con su tesis doctoral "Conductivity of Insulating Materials" en 1907, usando la "Nusselt Sphere" para la parte experimental. En 1915, publicó su trabajo "The Basic Laws of Heat Transfer", en el que proponía los grupos adimensionales, utilizados en la actualidad como parámetros esenciales en la teoría de semejanza en transmisión de calor. Otros de sus importantes trabajos son los de condensación en película, combustión de carbón pulverizado, y la analogía entre transferencia de calor y masa en evaporación. Catedrático de Mecánica Teórica en Munich, donde trabajó hasta 1952, cuando fue sustituido por Ernst Schmidt.

Ernst Schmidt (1892 – 1975), trabajó en la medida de las propiedades radiantes de los sólidos, resultado de esta investigación es la utilización del papel de aluminio como escudo radiante. No obstante, los trabajos que le dieron fama son sus métodos de resolución gráfica "Graphical Difference Method for Unsteady Heat Conduction" y "The Schlieren and Shadow Method". Además trabajó en el estudio de la condensación en gotas, y en convección natural. Por último publicó un trabajo sobre la analogía entre la transferencia de calor y la de masa. Recibió el premio Max Jacob en 1964.



W. Nusselt



E. Schmidt

Max Jakob (1879 – 1955) fue autor de una gran cantidad de trabajos en el campo de la transmisión de calor, tales como el estudio del vapor de agua y del aire a altas presiones, equipos de medida de conductividad térmica, mecanismos de ebullición y condensación, flujo en tuberías, etc. En su vida profesional fue autor de más de 500 publicaciones entre libros, artículos, y revisiones, entre los destaca su dos libro de transmisión de calor, junto con la obra póstuma sobre intercambiadores de calor editada por su colaboradores en base a sus trabajos. El Max Jakob “award” premia desde 1961 a los investigadores más relevantes en el campo de la transferencia térmica, evidentemente, como cualquier premio, puede criticarse la ausencia de algún autor pero cabe resaltar que si bien “no están todos los que son, sí son todos los que están”, por tanto los principales avances en el desarrollo de la transmisión de calor hasta nuestros días están ligados a los ganadores de este prestigioso premio.



MAX JAKOB AWARDS



1961 E.R. Eckert



1962 L.M.K. Boelter



1963 W. McAdams



1964 E. Schmidt



1965 H. C. Hottel



1966 Sir O. Saunders



1967 T. B. Drew



1968 S. Nukiyama



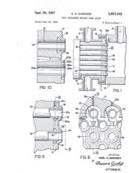
1969 S. S. Kutateladze



1970 W. Rohsenow



1971 J. W. Westwater



1972 K. A. Gardner



1973 U. Grigull



1974 P. Grassmann



1975 R. G. Deissler



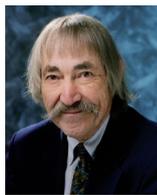
1976 E. M. Sparrow



1977 D. B. Spalding



1978 N. Nishiwaki



1979 S. W. Churchill



1980 R. A. Seban



1981 Chang-Lin Tien



1982 S. Ostrach



1983 Bei Tse Chao



1984 A. L. London



1985 F. Kreith



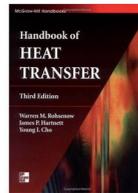
1986 R. Viskanta



1987 S. G. Bankoff



1988 Y. Mori



1989 J. P. Hartnett



1990 R. J. Goldstein



1991 F. X. Mayinger



1992 W. M. Kays



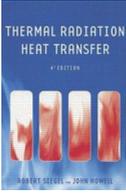
1993 B. Gebhart



1994 G. F. Hewitt



1995 A. E. Bergles



1996 R. Siegel



1997 J. R. Howell



1998 A. I. Leontiev



1999 A. Bejan



2000 V. Arpaci



2001 J. C. Chen



2002 Y. Jaluria



2003 K. J. Bell



2004 V. K. Dhir



2005 P. Cheng



2006 Kwang-Tzu Yang



2007 Wen-Jei Yang



2008 S. Patankar



2009 I. Catton

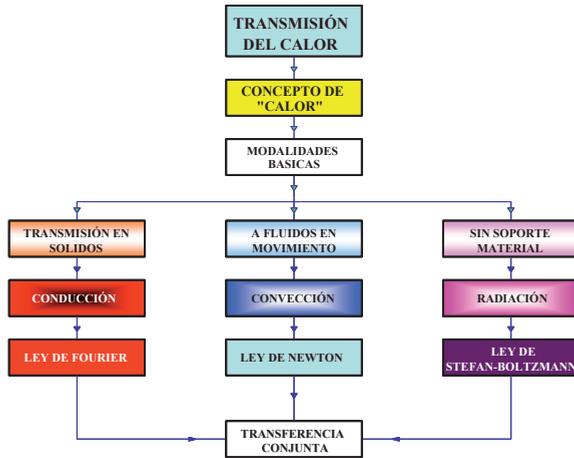


2010 A. Faghri

9. Mecanismos de la transmisión de calor

El estudio de los fenómenos de transmisión de calor y enunciado de las correspondientes leyes básicas que los rigen, se hizo paralelamente al desarrollo de la ciencia termodinámica. Y en la actualidad se distinguen tres modalidades básicas de transmisión del calor:

- Conducción
- Radiación
- Convección



En la práctica se produce una combinación de las vías en las que el calor se transfiere en los sistemas térmicos, si bien, afortunadamente, el montante no es similar para todas las vías, por lo que algunas pueden ser despreciadas frente a una preponderante, lo que explica su estudio independiente.

Capítulo 1

Ley de Fourier.

Ecuación general de la conducción del calor

Objetivos

Al acabar este tema el alumno debería ser capaz de:

- Comprender el significado de la ley de Fourier, básica en aplicaciones en que se presenta la conducción térmica y su no dependencia con el tiempo.
- Entender el concepto de conductividad térmica y sus valores cualitativos en función del estado de agregación.
- Identificar la ecuación diferencial obtenida a partir de un balance energético en aplicaciones de transmisión de calor por conducción.
- Entender el concepto de difusividad térmica y de efusividad térmica.
- Identificar las condiciones de unicidad necesarias para la resolución de la ecuación diferencial, especialmente las condiciones de contorno que delimitan un problema en particular.

1.1. Introducción

Observaciones tales como el calentamiento del aire en el interior de los neumáticos durante un trayecto en coche, conducen a pensar que la materia caliente difiere de la fría en que el movimiento aleatorio de sus átomos es más rápido. Las fuerzas de

cohesión en un gas son muy débiles y, como consecuencia, las partículas están muy separadas, se desplazan a grandes velocidades, chocando entre sí y con las paredes del recipiente que lo contiene, por lo tanto, un gas no tiene ni forma ni volumen definidos. En un líquido, el movimiento es menos activo, Las partículas se atraen entre sí mediante fuerzas de cohesión, estas fuerzas no son suficientemente intensas para mantener las partículas moviéndose en torno a una determinada posición, como consecuencia, se desplazan sobre sí mismas, cambiando de posición, por tanto un líquido no tiene forma definida, sin embargo, las fuerzas de cohesión son suficientemente intensas para impedir el escape de partículas, en consecuencia, un líquido tiene volumen definido. Por último, en un sólido, las partículas se atraen entre sí mediante fuerzas que llamamos de cohesión, estas fuerzas obligan a las partículas a ocupar posiciones fijas, no obstante estas partículas están en movimiento, pero sólo se mueven en torno a una posición determinada, las características de un cuerpo sólido son las de conservación de su forma y volumen, las partículas se encuentran empaquetadas, el movimiento es una vibración en la que cada átomo golpea contra los adyacentes.

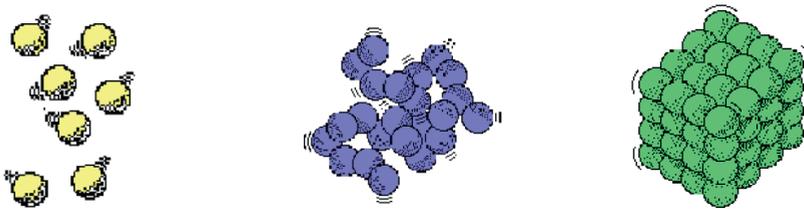


Fig. 1.1. Representación del movimiento en estados gas, líquido y sólido

La transmisión de calor por conducción es el fenómeno de transferencia térmica entre moléculas vecinas debido a la existencia de un gradiente térmico, en el caso de metales, este proceso se complementa con la transferencia energética debida al movimiento de los electrones libres.

En aquellos sólidos en los que no existe transferencia de calor por radiación, la conducción térmica constituye la única vía de transferencia posible, con gases o líquidos, la transferencia por conducción se presenta en conjunción con el transporte energético debido a las corrientes convectivas y a la radiación térmica. Por tanto, para considerar únicamente conducción en el caso de fluidos es necesario poder despreciar su movimiento, tal es el caso de las ventanas de doble o triple cristal con aire (o argón, de menor valor de conductividad; 0.016 W/m K frente a 0.024 W/m K para el aire) atrapado entre los cristales, o las cámaras de aire utilizadas en edificación (Figura 1.2).



Fig. 1.2. Conducción en fluidos. Doble, triple acristalamiento y cámara de aire

Los mecanismos que intervienen en el proceso de transmisión de calor en sólidos y fluidos son de naturaleza complicada, e intervienen principalmente en la evaluación de la conductividad térmica, una propiedad de los materiales a la que nos referiremos posteriormente, por lo que nos limitaremos a un estudio fenomenológico de la conducción térmica en base a la temperatura, la potencia puesta en juego y el flujo de calor, lo cual es suficiente en el tratamiento de las aplicaciones más importantes en las que la transmisión de calor es el fenómeno de mayor incidencia.

1.2. Concepto de gradiente de temperaturas

Supongamos, en un instante dado, dos superficies isotermas (Figura 1.3) a temperaturas “ T ” y “ $T + dT$ ”, y sea el punto “ O ” un punto genérico de la isoterma “ T ” y supongamos que la normal de ese punto tiene la dirección del vector unidad “ n_0 ”. La temperatura de un cuerpo varía únicamente en las direcciones que cortan a las superficies isotermas, por lo tanto la mayor variación de temperatura por unidad de longitud se obtiene en la dirección normal a la superficie isoterma.

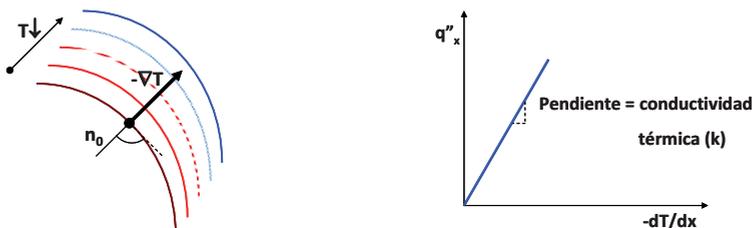


Fig. 1.3. Dirección del gradiente térmico

Un incremento de temperatura según la normal está determinado por el gradiente de temperatura, éste gradiente es, por definición, un vector perpendicular a la superficie isoterma, y positivo en el sentido de las temperaturas crecientes.

El módulo del vector gradiente no es el mismo en puntos distintos de una misma superficie isoterma, su valor será tanto mayor cuanto menor sea la distancia que separa las superficies.

Las líneas tangentes en todos sus puntos, a la dirección de propagación del flujo de calor, se conocen como líneas de flujo de calor, que por tanto son ortogonales a las superficies isotermas e indican la trayectoria de la energía calorífica.

1.3. Ley de Fourier

La ley básica de la transmisión de calor por conducción se debe a Fourier y se basa en sus propias observaciones y a las debidas a la experimentación de Biot. La hipótesis fundamental de Fourier es la de considerar que la cantidad de calor que pasa a través de un elemento de superficie isoterma “dS”, en un intervalo de tiempo “dt” es proporcional al gradiente de temperaturas.

$$\bar{q}'' \propto -\nabla T$$

El signo menos, que aparece en esta expresión, significa que el calor se transmite en el sentido de las temperaturas decrecientes según la segunda ley de la Termodinámica, mientras que el gradiente está orientado en sentido contrario.

La característica más relevante de la expresión deducida por Fourier es la no intervención del tiempo, es decir se postula una respuesta instantánea, en todo punto de un medio, a una perturbación. Esta hipótesis es válida en tanto que las escalas de tiempo consideradas son muy grandes frente a las que caracterizan las colisiones entre portadores elementales.

En segundo lugar, las conclusiones derivadas por Fourier establecían que la proporcionalidad mostrada en la expresión anterior se relacionaba con una constante, función del material, denominada conductividad “k”, de tal manera que la ley que rige la potencia transferida puede escribirse como:

$$q = -kS\nabla T \quad \text{ó} \quad \bar{q}'' = -k\nabla T \quad (1.1)$$

En la que “q” se conoce como densidad de flujo calorífico, siendo un vector normal a la superficie isoterma dirigido hacia las temperaturas decrecientes, que indica la potencia calorífica que por unidad de superficie isoterma se transmite en un punto.

En la forma más general, la propiedad denominada conductividad “k” es un tensor que proporciona información sobre el comportamiento del medio a lo largo de las diferentes direcciones, cuya estructura es:

$$\begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix}$$

Para medios homogéneos anisótropos, el tensor conductividad es simétrico “ $(k_{ij} = k_{ji})_{i \neq j}$ ”, sin embargo se obtiene una gran simplificación con la consideración de medios homogéneos e isotropos al no existir dependencia con la dirección, en cuyo caso la conductividad es un escalar únicamente función del material, consideración ésta que supondremos en adelante.

En general, para los sólidos, la conductividad es una función de la temperatura del sistema, de la composición química y de la densidad del sólido. Experimentalmente se encuentra una expresión empírica para la dependencia con la temperatura, del tipo:

$$k = k_0 [1 + b_0 (T - T_0)] \quad (1.2)$$

en la que tanto “ b_0 ” como “ k_0 ” son constantes para un material dado. En muchos casos prácticos se cumple “ $b_0 (T_{\max} - T_0) \ll 1$ ”, en cuyo caso el valor de la conductividad puede tomarse como una constante.

La conductividad térmica es una medida de la posibilidad de transmitir calor de un material, de tal manera que si un material posee una conductividad térmica grande, el flujo de calor es elevado, para una diferencia de temperatura dada. Este material se denomina buen conductor del calor. Por el contrario para un material, con la misma diferencia de temperaturas, pero con un valor de conductividad bajo, el flujo también lo será, estos materiales son malos conductores del calor o aislantes térmicos.

La energía térmica se propaga a través de un medio debido a dos mecanismos:

- Vibraciones en la estructura (fonones)
- Movimiento de los electrones libres

De tal marea que podemos escribir que la conductividad es la suma de dos componentes, una debida al movimiento vibratorio “l” y otra debida al movimiento de la nube electrónica “e”:

$$k = k_l + k_e \quad (1.4)$$

La importancia relativa de estos mecanismos depende básicamente del material; en los metales, con electrones libres, prima el movimiento de estos, en los aislantes los fonones y en semiconductores ambos mecanismos tienen contribuciones relevantes.

En la física del estado sólido, un fonón es un “quantum” de energía vibracional estructural. Su denominación se debe a una analogía con el “fotón” (quantum de luz). Lo que el fotón es a las ondas electromagnéticas el fonón lo es a las ondas de vibración en sólidos. Podemos considerar al cuerpo sólido, como una vasija que contiene un “gas de fonones”, el cual, para temperaturas no muy altas se puede considerar como gas ideal y puede ser analizado mediante la estadística de Bose-Einstein.

1.3.1. Conductividad en gases

La transmisión de calor por conducción se efectúa en los gases, a presiones y temperaturas ordinarias, mediante el transporte de la energía cinética de las moléculas del gas, esto es consecuencia de los choques que se producen durante el movimiento aleatorio de éstas, es decir, a mayor temperatura mayor energía cinética tendrán las moléculas, por lo que al existir diferencias de temperaturas en el gas, el calor pasa de unas zonas a otras mediante choques elásticos. Según la teoría cinética, la conductividad de un gas perfecto puede ser expresada por:

$$k = \frac{1}{3} v l c_v \rho$$

donde :

- v = velocidad media de las moléculas.
- l = recorrido libre medio entre dos choques.
- c_v = calor específico medio del gas a volumen constante.
- ρ = densidad.

Al aumentar la presión, la densidad aumenta en la misma proporción en que disminuye el recorrido libre medio, de forma que el producto de densidad y recorrido libre permanece prácticamente constante, deduciendo que la conductividad no depende en gran medida de la presión (para presiones ordinarias). No obstante, a presiones muy elevadas ($p > 20.000$ bar) las interacciones moleculares causan desviaciones en esta ley, así como a bajas presiones ($p < 20$ mm. Hg) el recorrido libre medio puede dejar de ser despreciable frente a las distancias geométricas del sistema, con lo que la ley tampoco sería verificada.

Con respecto a la temperatura sabemos que la velocidad aumenta al hacerlo ésta, y lo mismo ocurre con el calor específico a volumen constante, por lo que podemos

decir que la conductividad aumenta con la temperatura. Una buena aproximación viene dada por una ley del tipo:

$$k = C_1 T^n + C_2; \quad (n = 0,5 \div 1)$$

así, el exponente "n" para el aire en condiciones atmosféricas es del orden de 0,7.

En la realidad, se va a tratar con gases no ideales por lo que los razonamientos anteriores sólo deben ser tomados de una manera cualitativa y como orden de magnitud.

1.3.2. Conductividad en líquidos

En los fluidos líquidos, de la misma manera que en los gases, la transmisión de calor por conducción también se debe al movimiento de sus moléculas y átomos, sin embargo el movimiento de traslación media en líquidos es pequeño y por tanto, también será baja la emisión calorífica por este concepto. Actualmente se supone que el mecanismo de propagación primordial se realiza por vibraciones longitudinales (ondas elásticas), de manera similar a las del sonido. Esta última hipótesis se ha comprobado experimentalmente en algunos fluidos, llegándose a la siguiente expresión para la conductividad:

$$k = A \frac{c_p \rho^{4/3}}{M^{1/3}}$$

donde:

- M = masa molecular.
- c_p = calor específico a presión constante
- A = coeficiente de proporcionalidad, dependiente de la velocidad de propagación de la onda elástica (por tanto función de la sustancia y de la temperatura). El producto "A. c_p " puede considerarse constante. Por lo tanto, dado que en los líquidos la densidad disminuye al aumentar la temperatura, podemos decir que teniendo en cuenta que "M" es constante, la conductividad disminuirá al aumentar aquella.

Para aquellos líquidos fuertemente asociados, deberá considerarse en la expresión anterior un factor que tenga en cuenta esta característica, dado que en este caso (agua, alcoholes,...) se observa un incremento de la conductividad con la temperatura.

Por lo que respecta a la influencia de la presión, en general se observa un aumento de la conductividad con el incremento de esta variable.

1.3.3. Conductividad en sólidos

En principio, es muy difícil separar los efectos de transmisión por conducción en los sólidos, de los debidos a la radiación, a causa de la posible presencia de poros en el interior del sólido a través de los cuales existe radiación, por lo que la conductividad suele englobar en este caso ambas formas de transmisión.

La transmisión energética en sólidos se produce mediante dos vías, las cuales pueden ser simultáneas:

- En todos los sólidos la energía se transfiere por medio de las vibraciones elásticas en forma de ondas.
- Solo en algunos, especialmente en los metales, los electrones libres se mueven a través del material transportando energía de una manera similar que la transmisión en gases.

A las temperaturas normales, todos los sólidos almacenan energía como movimiento vibratorio de sus átomos, por lo que la conductividad térmica se encuentra relacionada con el calor específico.

El estudio de sólidos, se va a desarrollar en tres partes, mediante la subdivisión de éstos en tres grandes apartados:

1.3.3.1. Caso de metales

En los metales, aún dándose la transmisión por medio de la oscilación de los átomos, esta forma de transmisión es despreciable frente al transporte de calor mediante los electrones libres, el desplazamiento de los electrones libres produce la transmisión de calor y por lo tanto la igualación de temperatura al pasar de las zonas calientes a las frías.

Dado que los electrones son portadores de calor y al mismo tiempo de la electricidad se deduce que un buen conductor de la electricidad también lo será del calor.

El aumento de la temperatura provoca en los metales un aumento de la dispersión de la nube electrónica, esta es la causa del descenso del valor de la conductividad con la temperatura.

En este punto es oportuno referirse a la ley de Wiedemann-Franz-Lorenz, para metales, esta ley se dedujo por vía experimental en 1853. La ley establece la relación entre la conductividad térmica “ k ” y la eléctrica “ σ ”, para la mayoría de los metales es proporcional a la temperatura “ T ”, siendo el factor de proporcionalidad “ L ” igual para todos los metales (el factor de proporcionalidad entre conductividades

térmica y eléctrica fue introducido por L. Lorenz en 1872). Por lo tanto la relación se expresa como:

$$k/\sigma = LT$$

en la que “ σ ” es la conductividad eléctrica, y “L” el número de Lorenz $\simeq 2.443 \cdot 10^{-8} \text{ W}\Omega/\text{K}^2$.

Cualitativamente, la ley se basa en el hecho que el calor y el transporte eléctrico se deben al movimiento de los electrones libres. Además, la ley de Wiedemann-Franz puede derivarse mediante la suposición del flujo electrónico como un gas “clásico”. Los resultados reales difieren algo de los obtenidos mediante la aplicación de la ley, tal como se observa sobre la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Número de Lorentz para diversos metales

METAL	$k/\sigma T \cdot 10^{-8}$
Cobre	2.23
Plata	2.31
Oro	2.35
Zinc	2.31
Cadmio	2.42
Estaño	2.52
Molibdeno	2.61
Plomo	2.47
Platino	2.51

1.3.3.2. Aleaciones

Las impurezas presentes en los metales pueden disminuir de manera sensible la conductividad térmica, por ejemplo, el cobre puro posee una conductividad de unos 390 W/m K, mientras que el cobre no refinado sólo alcanza 145 W/m K. En el caso de fundiciones, un pequeño contenido en carbón hace descender el valor de la conductividad del hierro (de 67 a unos 46 W/m K).

Las aleaciones pueden ser consideradas en principio como impurezas superpuestas a un metal, dándose el caso de una variación no lineal de la conductividad con las concentraciones de los constituyentes.

1.3.3.3. Sólidos no conductores

En este tipo de sólidos la conducción se produce por un mecanismo similar al que se ha explicado en los líquidos. La conductividad de estos materiales aumenta con la temperatura, y la ley de variación es aproximadamente lineal.

En principio la conductividad está ligada a la densidad, es decir, cuanto más denso es el material mayor conductividad posee, no obstante el parámetro fundamental a considerar es su porosidad, pues los gases presentes en ella pueden dar lugar a transmisión de calor por otras formas distintas a la conducción. El contenido en agua es otro factor que afecta a esta propiedad física.

En resumen, la conductividad en sólidos es de:

- Metales [20 ÷ 400 W/m K], siendo k_e es el efecto predominante
- En las aleaciones suele descender el valor de “k”, por debajo de las de los metales que las componen
- Materiales cerámicos [2 ÷ 50 W/m K], el factor predominante es ahora k_l . La temperatura y la porosidad hacen descender el valor de “k”
- Materiales poliméricos [\sim 0.3 W/m K], también en este caso la porosidad hace descender el valor de “k”
- Materiales aislantes [0.015 ÷ 0.035 W/m K]

Los órdenes de magnitud de la conductividad térmica de los distintos materiales se han representado en la figura 1.4, mientras que sobre la figura 1.5 se presentan los valores de la conductividad térmica de los elementos de la tabla periódica. Asimismo en el anexo 1.II se presentan algunas normativas referentes a la medida de la conductividad térmica.

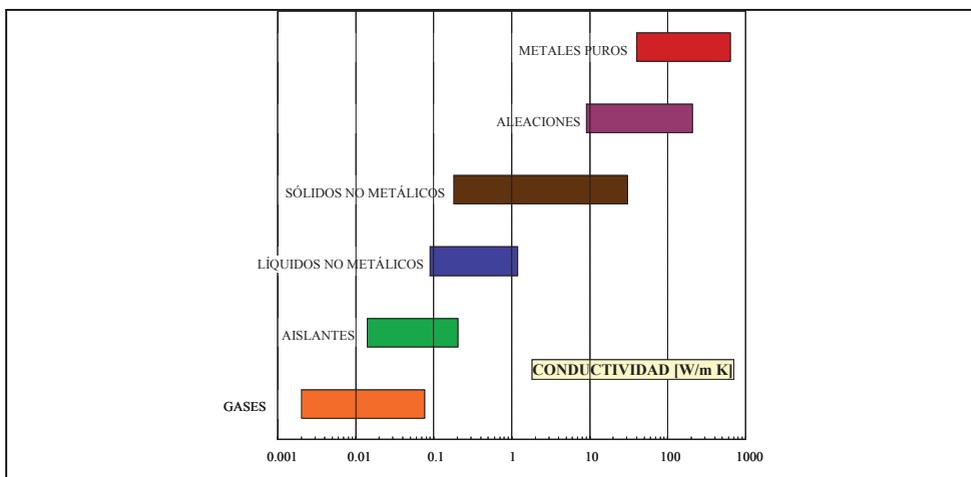


Fig. 1.4. Rangos de variación de la conductividad térmica para diferentes materiales

Conductividad térmica [W/m K]

1													13 14 15 16 17					18
H	[Barra de color verde]											He						
0.181												0.152						
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
84.7	200											27	1960	0.025	0.267	0.027	0.049	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
141	156											273	148	0.235	0.269	0.008	0.017	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
102.4	200	15.8	21.9	30.7	93.7	7.82	80.2	100	90.7	401	116	40.6	59.9	50.0	2.04	0.122	0.009	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
58.2	35.3	17.2	22.7	53.7	138	50.6	117	150	71.8	429	96.8	81.6	66.6	24.3	2.35	0.449	0.005	
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
35.9	18.4	13.5	23	57.5	174	47.9	87.6	147	71.6	317	8.34	46.1	35.3	7.87	20	1.7	0.003	
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub	Uut	Uuq	Uuq	115	116	117	118
15	18.6	12	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
11.4	12.5	16.5	17.9	13.3	13.9	10.6	11.1	10.7	16.2	14.3	16.8	34.9	16.4
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr
54.0	47	27.6	6.3	6.74	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Fig. 1.5. Valores de conductividad térmica de los diferentes elementos

Estas consideraciones sobre la conductividad de los sólidos se ha visto alterada por el descubrimiento del grafeno, cuyo estudio le ha valido el nobel de física de 2010 al tandem Andre Geim y Konstantin Novoselov. El término grafeno se refiere a una única lámina de átomos de carbono organizados en una estructura cristalográfica de tipo hexagonal. La estructura electrónica de grafeno era conocida por los físicos teóricos desde hace aproximadamente 60 años. A. Balandin y otros en su trabajo de 2008 "Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene", calcularon la conductividad térmica del grafeno, cuyo valor resultó ser de 5300 W/(m K) a temperatura ambiente, S. Barber lo cifra en aproximadamente 6600 W/m K, y S. Ghosh en el rango de 3080 a 5150 W/m K. Este es el valor más alto conocido para un sólido, un 50% más alto que el de los nanotubos de carbono y más de 10 veces mayor que el de los metales como cobre y aluminio. La gran conductividad térmica del grafeno es probablemente resultado de la relativa facilidad que tienen los átomos de carbono para moverse en el grafeno, comparada con otros materiales.

1.3.4. La ecuación de Fourier como ecuación de transporte

La ecuación de Fourier (1.1) es una de las denominadas ecuaciones de transporte, las cuales consideran una cantidad de una propiedad o sustancia "Y" se transporta en una cantidad "dY/dt" debido a la existencia de un gradiente "dZ/dx" a través de una superficie "A", siendo "Z" una propiedad que cambia en función de la posición de la coordenada espacial "x". El flujo de transporte depende de una constante de proporcionalidad "cte" llamada propiedad de transporte. La estructura de los fenómenos de transporte se rige por:

$$\frac{dY}{dt} = cte A \frac{dZ}{dx}$$

Las cuatro propiedades básicas de transporte son la conductividad térmica, la difusión, la viscosidad y la conductividad eléctrica. Las ecuaciones específicas para cada una de ellas se muestran en la tabla 1.2.

Tabla 1.2. Analogía ecuaciones de transporte

Propiedad transporte	M. transportada	Gradiente	cte.	Ecuación
Conductividad térmica	Calor (q)	Temperatura (T)	k	$dq/dt = -kA(dT/dx)$
Viscosidad	x-momentum (p_x)	y-velocidad (v_y)	η	$dp_x/dt = -\eta A(dv_y/dx)$
Difusión	Materia (n_i)	Concentración (c_i)	D	$dn_i/dt = -D_{ik}A(dc_i/dx)$
Conductividad eléctrica	Carga (Q)	Potencial (ϕ)	κ	$dQ/dt = -\kappa A(d\phi/dx)$

Esta estructura común en las ecuaciones de transporte, van a permitir el establecimiento de analogías entre transmisión de calor y otros fenómenos de transporte, en particular para transmisión de calor en régimen estacionario sin generación interna.

1.4. Ecuación general de la conducción del calor

La ley de Fourier implica que puede hallarse la densidad de flujo de calor en una dirección si es conocido el gradiente de temperaturas en esa dirección, para definir este gradiente se hace necesaria la obtención del campo de temperaturas en el medio y este campo puede ser obtenido a partir de un balance de energías. Este balance de energías en un sistema supone:

“Energía aportada desde el exterior del sistema + energía generada en el sistema = Almacenamiento de energía en el interior del sistema”

Hipótesis a emplear en el cálculo:

- Sólido homogéneo.
- Parámetros físicos constantes (c_p , ρ , ...).
- Equilibrio mecánico, es decir, la deformación se considera despreciable = Sólido indeformable.

Para seguir leyendo haga click aquí