DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

INGENIERÍA TÉRMICA Y DE FLUIDOS

Pedro Fernández Díez

I.- PRINCIPIOS BÁSICOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

I.1.- INTRODUCCIÓN

La Ingeniería Térmica trata de los procesos de transferencia de calor y la metodología para calcular la velocidad temporal conque éstos se producen y así poder diseñar los componentes y sistemas en los que son de aplicación. La transferencia de calor abarca una amplia gama de fenómenos físicos que hay que comprender antes de proceder a desarrollar la metodología que conduzca al diseño térmico de los sistemas correspondientes.

Algunos ejemplos de diseño pueden ser:

a) Los que requieren disminuir las cantidades de calor transferido mediante un aislante térmico, o amplificarlas mediante aletas u otros sistemas

b) Los que implican procesos de transferencia de calor de un fluido a otro mediante intercambiadores de calor

c) Los que controlan térmicamente un proceso, manteniendo las temperaturas de funcionamiento de los elementos sensibles al calor dentro de unos márgenes predeterminados, etc.

Siempre que existe una diferencia de temperatura, la energía se transfiere de la región de mayor temperatura a la de temperatura más baja; de acuerdo con los conceptos termodinámicos la energía que se transfiere como resultado de una diferencia de temperatura, es el calor. Sin embargo, aunque las leyes de la termodinámica tratan de la transferencia de energía, sólo se aplican a sistemas que están en equilibrio; pueden utilizarse para predecir la cantidad de energía requerida para modificar un sistema de un estado de equilibrio a otro, pero no sirven para predecir la rapidez (tiempo) conque puedan producirse estos cambios; la fenomenología que estudia la transmisión del calor complementa los Principios termodinámicos, proporcionando unos métodos de análisis que permiten predecir esta velocidad de transferencia térmica.

Para ilustrar los diferentes tipos de información que se pueden obtener desde ambos puntos de vista, (termodinámico y transferencia de calor) consideraremos, a título de ejemplo, el calentamiento de una barra de acero inmersa en agua caliente. Los principios termodinámicos se pueden utilizar para predecir las temperaturas finales una vez los dos sistemas hayan alcanzado el equilibrio y la cantidad de energía transferida entre los estados de equilibrio inicial y final, pero nada nos dicen respecto a la velocidad de la transferencia térmica, o la temperatura de la barra al cabo de un cierto tiempo, o del tiempo que hay que esperar para obtener una temperatura determinada en una cierta posición de la barra. Un análisis de la transmisión del calor permite predecir la velocidad de la transferencia térmica del agua a la barra y de esta información se puede calcular la temperatura de la barra, así como la temperatura del agua en función del tiempo.

Para proceder a realizar un análisis completo de la transferencia del calor es necesario considerar tres mecanismos diferentes, conducción, convección y radiación.

El diseño y proyecto de los sistemas de intercambio de calor y conversión energética requieren de cierta familiaridad con cada uno de estos mecanismos, así como de sus interacciones; en primer lugar consideraremos los principios básicos de la transmisión del calor y algunas aplicaciones simples, que serán de utilidad en capítulos posteriores, en los que serán tratados con más detalle.

I.2.- TRANSMISIÓN DE CALOR POR CONDUCCIÓN EN RÉGIMEN ESTACIONARIO Y FLUJO UNIDIRECCIONAL

La conducción es el único mecanismo de transmisión del calor posible en los medios sólidos opacos; cuando en estos cuerpos existe un gradiente de temperatura, el calor se transmite de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura, siendo el calor transmitido por conducción Q_k, proporcional al gradiente de temperatura dT/dx, y a la superficie A, a través de la cual se transfiere, Fig I.1.a, es decir:

$$Q_k \quad A \frac{dT}{dx}$$

en donde T es la temperatura y ***x*** la dirección del flujo de calor.

El flujo real de calor depende de la conductividad térmica ***k***, que es una propiedad física del cuerpo, por lo que la ecuación anterior se puede expresar en la forma:

$$Q_k = - k A \frac{dT}{dx}$$

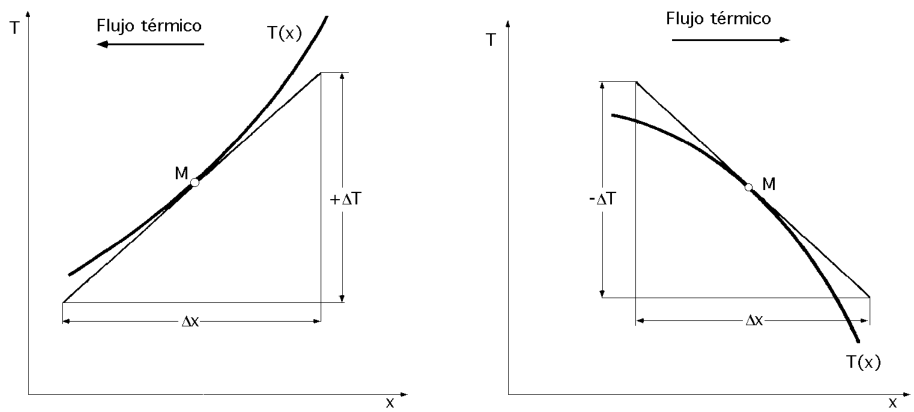

Fig I.1- Convenio de signos para la transmisión del calor por conducción

en la que si la superficie A de intercambio térmico se expresa en m^2, la temperatura en grados Kelvin, la distancia ***x*** en metros y la transmisión del calor en W, las unidades de ***k*** serán W/m°K.

El signo (-) es consecuencia del Segundo Principio de la Termodinámica, según el cual, el calor debe fluir hacia la zona de temperatura más baja. El gradiente de temperaturas es negativo si la temperatura disminuye para valores crecientes de ***x***, por lo que si el calor transferido en la dirección positiva debe ser una magnitud positiva, en el segundo miembro de la ecuación anterior hay que introducir un signo negativo.

PARED PLANA..- Una aplicación inmediata de la ley de Fourier corresponde al caso de la transmisión del calor a través de una pared plana, Fig I.2. Cuando las superficies de la pared se encuentran a temperaturas diferentes, el calor fluye sólo en dirección perpendicular a las superficies.

Si la conductividad térmica es uniforme, la integración de la ecuación anterior proporciona:

$$Q_k = - \frac{k\,A}{L}\,(T_2 - T_1) = \frac{k\,A}{L}\,(T_1 - T_2) = \frac{T_1 - T_2}{\dfrac{L}{k\,A}}$$

en la que L es el espesor de la pared, T_1 es la temperatura de la superficie de la izquierda x = 0, y T_2 es la temperatura de la superficie de la derecha x = L

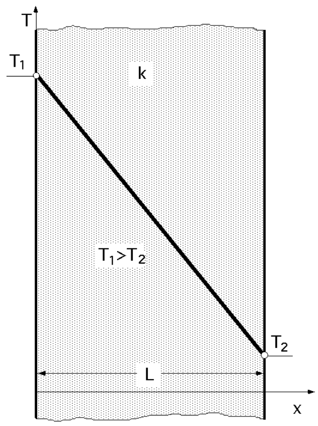

Fig I.2.- Muro plano

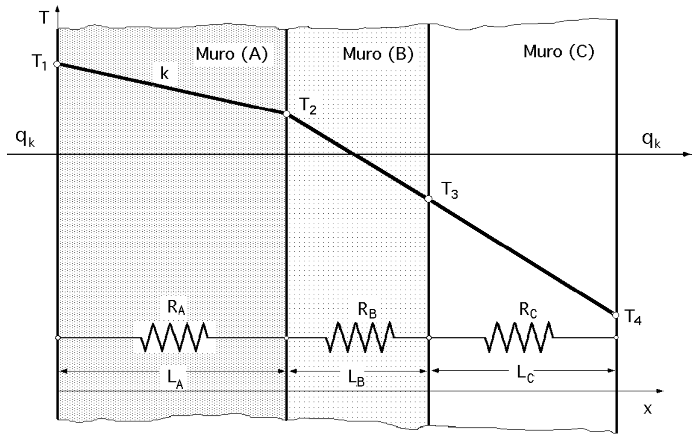

Fig I.3.- Pared compuesta

PAREDES PLANAS EN SERIE.- Si el calor se propaga a través de varias paredes en buen contacto térmico, capas múltiples, el análisis del flujo de calor en estado estacionario a través de todas las secciones tiene que ser el mismo. Sin embargo y tal como se indica en la Fig I.3 en un sistema de tres capas, los gradientes de temperatura en éstas son distintos. El calor transmitido se puede expresar para cada sección y como es el mismo para todas las secciones, se puede poner:

$$Q_k = \frac{T_1 - T_2}{(\frac{L}{k\,A})_A} = \frac{T_2 - T_3}{(\frac{L}{k\,A})_B} = \frac{T_3 - T_4}{(\frac{L}{k\,A})_C} = \frac{T_1 - T_4}{(\frac{L}{k\,A})_A + (\frac{L}{k\,A})_B + (\frac{L}{k\,A})_C}$$

Si se considera un conjunto de ***n*** capas en perfecto contacto térmico el flujo de calor es:

$$Q_k = \frac{T_i - T_{i+1}}{(\frac{L}{k\,A})_i} = \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{i=1}^{i=n} (\frac{L}{k\,A})_i}$$

en la que T_1 y T_{n+1} son la temperatura superficial de la capa 1 y la temperatura superficial de la capa ***n***, respectivamente

ANALOGÍA ELÉCTRICA DE LA CONDUCCIÓN.- La ***analogía entre el flujo de calor y la electricidad,*** permite ampliar el problema de la transmisión del calor por conducción a sistemas más complejos, utilizando conceptos desarrollados en la teoría de circuitos eléctricos. Si la transmisión de calor se considera análoga al flujo de electricidad, la expresión $(L/k\,A)$ equivale a una resistencia y la diferencia de temperaturas a una diferencia de potencial, por lo que la ecuación anterior se puede escribir en forma semejante a la ley de Ohm:

$$Q_k = \frac{\Delta T}{R_k}\ ,\ \text{siendo,}\ \begin{cases} \text{Potencial térmico,}\ \ \Delta T = T_1 - T_2 \\ \text{Resistencia térmica,}\ R_k = \dfrac{L}{k\,A} \end{cases}$$

La inversa de la resistencia térmica es la conductividad térmica (k/L) W/m^2°K, o conductancia térmica unitaria del flujo de calor por conducción.

PAREDES EN PARALELO.- Las ecuaciones anteriores se pueden utilizar en la resolución de problemas más complejos, en los que la conducción tiene lugar en paredes dispuestas en paralelo. La Fig I.4 muestra un bloque formado por dos materiales de áreas A_1 y A_2 en paralelo; para su resolución hay que tener en cuenta que para una determinada diferencia de temperaturas a través del bloque, cada capa del conjunto se puede analizar por separado, teniendo presentes las condiciones impuestas para el flujo unidimensional a través de cada una de las dos secciones.

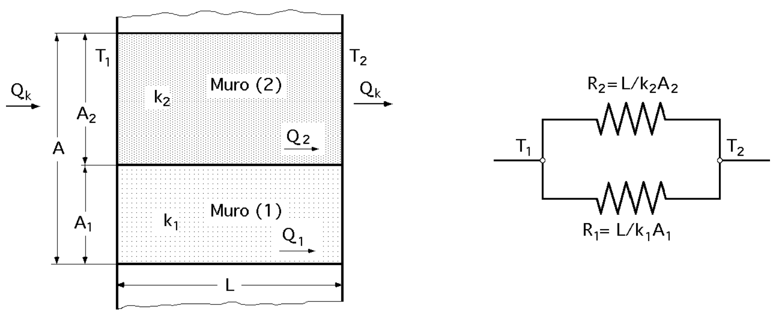

Fig I.4.- Transmisión de calor a través de una pared con dos secciones en paralelo

Si la diferencia de temperaturas entre los materiales en contacto es pequeña, el flujo de calor paralelo a las capas dominará sobre cualquier otro flujo normal a éstas, por lo que el problema se puede tratar como unidireccional sin pérdida importante de exactitud.

Como el calor fluye a través de los dos materiales según trayectorias separadas, el flujo total de calor Q_k será la suma de los dos flujos:

$$Q_k = Q_1 + Q_2 = \frac{T_1 - T_2}{\left(\dfrac{L}{k\,A}\right)_1} + \frac{T_1 - T_2}{\left(\dfrac{L}{k\,A}\right)_2} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)(T_1 - T_2) = \frac{T_1 - T_2}{\dfrac{R_1\,R_2}{R_1 + R_2}}$$

en la que el área total de transmisión del calor es la suma de las dos áreas individuales y la inversa de la resistencia total es igual a la suma de las inversas de todas las resistencias individuales.

Una aplicación más compleja del enfoque del circuito térmico sería la indicada en la Fig I.5, en la que el calor se transfiere a través de una estructura formada por una resistencia térmica en serie, otra en paralelo y una tercera en serie; para este sistema, el flujo térmico por unidad de superficie es:

$$Q_k = \frac{\Delta T_{global}}{\sum\limits_{i=1}^{i=n} R_i} = \frac{\Delta T_{global}}{R_A + R_2 + R_D} = \left|\begin{array}{l} \dfrac{1}{R_2} = \dfrac{1}{R_B} + \dfrac{1}{R_C} \\ R_2 = \dfrac{R_B\,R_C}{R_B + R_C} \end{array}\right| = \frac{\Delta T_{global}}{R_A + \dfrac{R_B\,R_C}{R_B + R_C} + R_D}$$

en la que ***n*** es el número de capas en serie, R_i es la resistencia térmica de la capa ***i***, y ΔT_{global} es la diferencia de temperaturas entre las dos superficies exteriores.

El análisis del circuito precedente supone flujo unidimensional. Si las resistencias R_B y R_C son muy diferentes, los efectos bidimensionales pueden ser importantes.

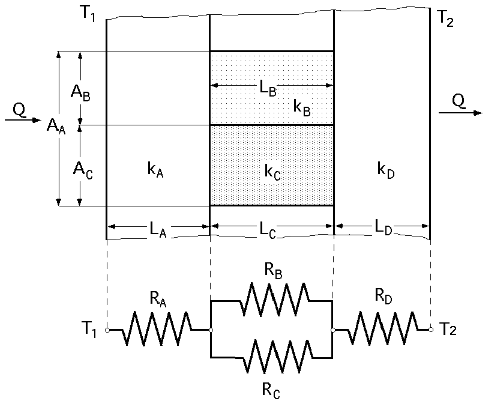

Fig I.5.- Circuito térmico en serie-paralelo-serie

RESISTENCIA DE CONTACTO.- Cuando superficies a distintas temperaturas se ponen en contacto, aparece una resistencia térmica en la interfase de los sólidos, que se conoce como ***resistencia de contacto***, y que se desarrolla cuando los dos materiales no ajustan exactamente, por lo que entre ambos puede quedar atrapada una delgada capa de fluido. Una vista ampliada del contacto entre las dos superficies mostraría que los sólidos se tocan sólo en picos superficiales, mientras que los huecos estarían ocupados por un fluido, o el vacío.

La resistencia de la interfase depende de:

- La rugosidad superficial

- La presión que mantiene en contacto las dos superficies

- Del fluido de la interfase

- De su temperatura

En la interfase, el mecanismo de la transmisión del calor, y su determinación, es complejo; la conducción del calor tiene lugar a través de los puntos de contacto del sólido en forma tridimensional por cuanto el calor se transmite por las áreas de contacto a través del fluido de la interfase por convección, y entre las superficies por radiación.

Si el calor a través de las superficies sólidas en contacto es Q, la diferencia de temperaturas a través del fluido que separa los dos sólidos es ΔT_i y la resistencia de contacto R_i se puede expresar en función de una conductancia interfacial $\boldsymbol{h_i}$, W/m²ºK, se tiene:

$$Q = h_i A\, \Delta T_i = \frac{\Delta T_i}{1/h_i A} = \frac{\Delta T_i}{R_i}$$

Cuando las dos superficies están en contacto térmico perfecto, la diferencia de temperaturas a través de la interfase es nula, por lo que su resistencia térmica es cero; un contacto térmico imperfecto tiene lugar cuando existe una diferencia de temperaturas en la interfase.

La resistencia por contacto depende de la presión conque se mantiene el contacto, y muestra un descenso notable cuando se alcanza el límite elástico de alguno de los materiales.

Tabla I.1.- Conductancias interfaciales de algunos materiales a presiones moderadas

Interface	h_i, W/m^{2}ºK
Cerámica-cerámica	500-3000
Cerámica-metal	1500-8500
Grafito metal	3000-6000
Acero inoxidable-acero inoxidable	1700-3700
Aluminio-aluminio	2200-12000
Acero inoxidable-aluminio	3000-4500
Cobre-cobre	10000-25000
Hierro-aluminio	4000-40000

En los sólidos mecánicamente unidos no se suele considerar la resistencia de la interfase, a pesar de que siempre está presente. Sin embargo hay que conocer la existencia de la resistencia de la interfase y la diferencia de temperaturas resultante a través de la misma; en superficies rugosas y bajas presiones de unión, la caída de temperatura a través de la interfase puede ser importante, incluso dominante, y hay que tenerla en cuenta. La problemática de la resistencia de la interfase es compleja y no existe ninguna teoría, o base de datos empíricos, que la describa exactamente para situaciones de interés industrial.

I.3.- CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

La conductividad térmica ***k*** es una propiedad de los materiales que, excepto en el caso de los gases a bajas temperaturas, no es posible predecir analíticamente; la información disponible está basada en medidas experimentales. En general, la conductividad térmica de un material varía con la temperatura, pero en muchas situaciones prácticas se puede considerar con un valor medio constante, si el sistema tiene una temperatura media, lo que proporciona resultados bastante satisfactorios.

En la Tabla I.2 se relacionan los valores típicos de la conductividad térmica de algunos metales, sólidos no metálicos, líquidos y gases, que nos dan una idea del orden de magnitud conque se presenta en la práctica, mientras que en la Fig I.6, se presentan dos gráficas de conductividades térmicas, una entre 0 y 450 W/m°K para metales y aleaciones (buenos conductores térmicos), y otra entre 0 y 0,8 W/m°K para algunos gases y líquidos, observándose la gran diferencia existente entre sus coeficientes de conductividad ***k***.

Tabla I.2.- Conductividad térmica de algunos materiales

Material	k (W/mºK), a 300ºK
Cobre	386
Aluminio	204
Vidrio	0,75
Plástico	0,2-0,3
Agua	0,6
Aceite de motores	0,15
Freón (líquido)	0,07
Aire	0,026

En los ***materialesconductores*** el mecanismo de la transmisión de calor por conducción está asociado a las vibraciones de la ***estructurareticular*** y al movimiento de los electrones libres, (metales y aleaciones), al igual que en los conductores eléctricos, por lo que materiales buenos conductores de la electricidad son también, en general, buenos conductores del calor, (cobre, plata, aluminio, etc).

Los ***aislantestérmicos*** (vidrio, plásticos, etc) que requieren de una ***estructuraporosa*** y un gas atrapado en la misma, son también buenos aislantes eléctricos; en estos materiales, la transferencia de calor puede tener lugar de diversas formas:

a) Conducción a través de la estructura sólida porosa o fibrosa
b) Conducción y/o convección a través del aire atrapado en los espacios vacíos
c) Radiación entre porciones de la estructura sólida, lo cual es especialmente importante a temperaturas elevadas o en recintos vacíos

Se han desarrollado materiales superaislantes para aplicaciones criogénicas, que constan de varias capas de materiales altamente reflectantes separados por espacios vacíos, que minimizan la conducción y la convección, alcanzándose conductividades térmicas del orden de 0,02 W/m°K.

En muchos materiales el valor de ***k*** no es constante, sino que varía con la temperatura y con la composición química de los mismos. Cuando sólo depende de la temperatura, se puede poner el valor de ***k*** en la forma:

$$k = k(T) = k_0 (1 + \beta T)$$

siendo k_0 el valor de la conductividad a la temperatura de referencia, y β una constante, (coefi-ciente de dilatación). En tal caso la integración de la ecuación de Fourier proporciona:

$$Q_k = - \int_{T_1}^{T_2} A\, k_0 (1 + \beta T)\, dT = \frac{k_0 A}{L} \{T_1 - T_2 + \frac{\beta}{2} (T_1^2 - T_2^2)\} = \frac{k_m A}{L} (T_1 - T_2)$$

en la que k_m es el valor de ***k*** a la temperatura $\frac{T_1 + T_2}{2}$

COEFICIENTES DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA PARA LAS ALEACIONES.- En la Fig I.6.a se muestra el comportamiento de la conductividad térmica de algunos metales y aleaciones, (cobre, aluminio, acero al carbono, acero inoxidable 18-8, etc), con la temperatura.

La ***conductividad térmica de las aleaciones, en general, y de los aceros en particular***, se puede determinar mediante la relación:

$$k = \frac{k_0}{1 + \xi_1 + \xi_2 + ... + \xi_n}$$

en la que k_0 es la conductividad térmica del metal base, y $\xi_1, \xi_2,..., \xi_n$, son unos factores de corrección de dicha conductividad, propios de cada metal que la caracterizan. La conductividad térmica del hierro puro viene representada en la Fig I.7, mientras que los factores característicos de los metales adicionales que entran en la composición de un acero aleado, $\xi_1, \xi_2,..., \xi_n$, en la Fig I.8.

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LÍQUIDOS.- En la Fig I.6 se indica la conductividad térmica de algunos líquidos en función de la temperatura, observándose que ***la conductividad térmica de los líquidos decrece a medida que aumenta su temperatura***, excepto en el caso del agua, pero el cambio es tan pequeño que en la mayor parte de las situaciones prácticas, la conductividad térmica se puede suponer constante para ciertos intervalos de temperatura; asimismo, en los líquidos no hay una dependencia apreciable con la presión, debido a que éstos son prácticamente incompresibles.

Para la determinación de la difusividad térmica en líquidos, se propone la fórmula:

$$\alpha = \frac{k}{\rho\, c_p} = \frac{5}{4}\sqrt[3]{\frac{\rho}{M}}$$

en la que M es la masa molecular y ρ la densidad del líquido.

Como la ecuación no es homogénea, conviene precisar las unidades en que se deben expresar las magnitudes que en ella figuran: ***k*** en Kcal/m.hora°C, ρ en kg/dm³ y c_p en Kcal/kg°C

Para definir la variación de la conductividad térmica ***k*** en función de la temperatura, Riedel propone la ecuación:

$$k = k_K\{1 - 6,7\,(1 - T_r)^{2/3}\}$$

siendo:

k *la conductividad a la temperatura* $T = T_r\, T_k$ *en ºK*

k_k *la conductividad a la temperatura crítica* T_k *en °K*

T_r *la temperatura reducida igual a* $\dfrac{T}{T_k}$

En el caso en que se desconozca la conductividad k_k, la ecuación anterior se puede emplear para determinar la conductividad a una temperatura para la que no existen resultados de medida; en estas circunstancias el valor de k_k se calcula para unas ciertas condiciones en las que se conozca T_k con ayuda de la citada ecuación. Si no se conoce T_k se pueden determinar los valores de k_k y de T_k efectuando dos medidas de ***k*** a temperaturas suficientemente espaciadas una de otra; esta ecuación se puede utilizar para temperaturas reducidas del orden de 0,9, aproximadamente.

La conductividad de los líquidos varía con la temperatura; en las proximidades del punto crítico disminuye más rápidamente, ya que la conductividad del vapor es siempre más baja.

Si se conocen la conductividad del vapor saturado seco ***k*** y la temperatura crítica del líquido T_k en °K, la conductividad del líquido a la temperatura de saturación se puede deducir, con ayuda de la Tabla I.3, de la siguiente relación:

$$\frac{k'}{k} = f\left(\frac{T}{T_k}\right)$$

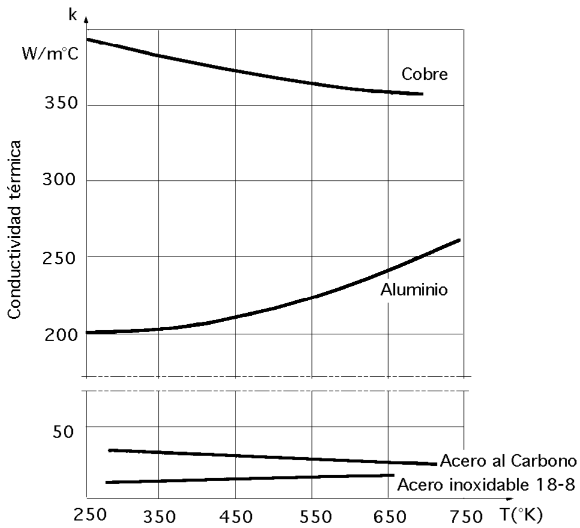

Fig I.6.a.- Conductividad térmica metales y aleaciones

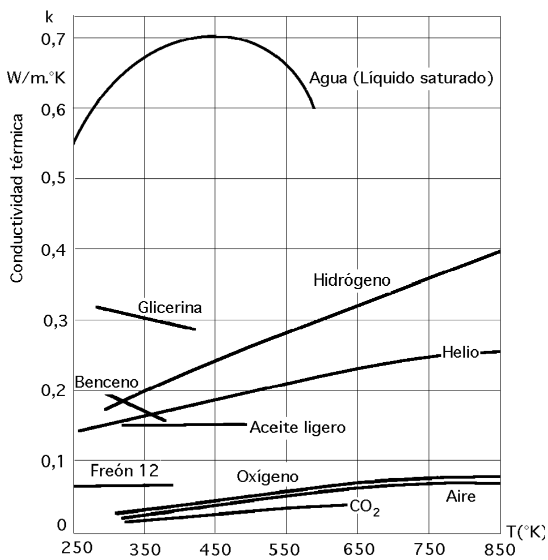

Fig I.6.b.- Conductividad térmica líquidos, gases y vapores

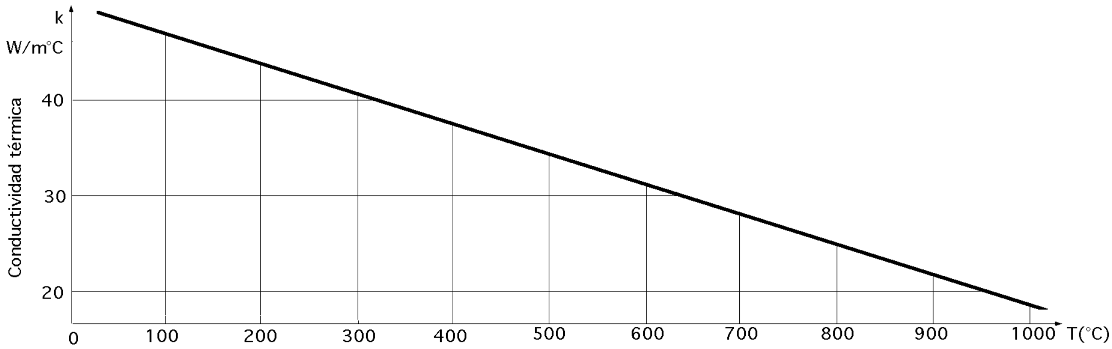

Fig I.7.- Conductividad térmica del hierro puro

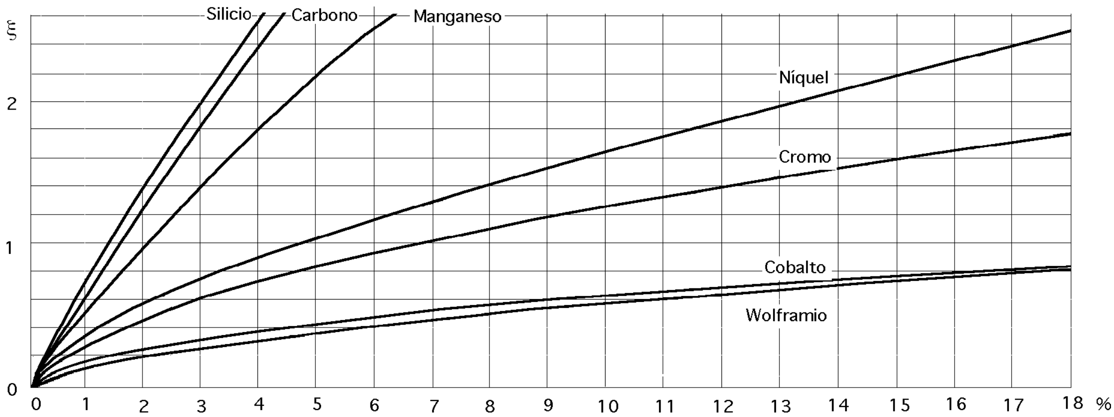

Fig I.8.- Factores de corrección de la conductividad térmica de los aceros aleados

Tabla I.3.- Valores de k'/ k

T/Tk	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	1
k'/k	38	33	27	19,3	15,5	12	9,3	4,3	1

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE GASES Y VAPORES.- En la Fig I.6 y a título de ejemplo, se muestran algunas conductividades térmicas de gases y vapores, observándose su variación con la temperatura. ***La conductividad térmica de los gases crece con la presión***, pero este aumento a presiones normales es tan pequeño que se puede despreciar; sin embargo, en las proximidades del punto crítico, y para presiones o muy bajas, o muy altas, la variación de la conductividad térmica en función de la presión, no se puede despreciar. La conductividad térmica de los gases se incrementa con la raíz cuadrada de la temperatura absoluta. Los gases presentan conductividades térmicas muy bajas, tanto más, cuanto más elevado es su peso molecular. Por analogía con el proceso de la transmisión del calor, y sobre la base de la teoría molecular, se propone la siguiente relación (Sutherland) entre la conductividad y la viscosidad dinámica de un gas, de la forma:

$$k = \varepsilon\, c_v\, \eta = \varepsilon\, c_v\, \eta_0\, \frac{1 + \dfrac{C}{T_0}}{1 + \dfrac{C}{T}} \sqrt{\frac{T}{T_0}}$$

en la que C es una constante con dimensiones de temperatura, y ε un coeficiente numérico que depende del número ***n*** de átomos contenidos en la molécula, de la forma (B. Koch):

$$\varepsilon = 1 + \frac{4{,}5}{1 + 2\,n}\ , \text{ con, } \begin{cases} \varepsilon = 2{,}50 \text{ , para gases monoatómicos } ; \quad \varepsilon = 1{,}90 \text{ , para gases biatómicos} \\ \varepsilon = 1{,}64 \text{ , para gases triatómicos } ; \quad \varepsilon = 1{,}50 \text{ , para gases tetratómicos} \end{cases}$$

Tabla I.4.- Valores de C y η_0 de la fórmula de Sutherland

Fluido	C	η_0 = (Kg seg/m^2)
Aire	114	0,166
Oxígeno	128	0,18
Hidrógeno	74	0,083
Nitrógeno	110	0,16
Anhídrido carbónico	260	0,137
Monóxido de carbono	---	0,16
Vapor de agua	673	0,087

En la Tabla I.4 se indican los valores de C y η_0 para diversos gases industriales.

I.4. - TRANSMISIÓN DE CALOR POR CONVECCIÓN

Cuando un fluido a T_F se pone en contacto con un sólido cuya superficie de contacto está a una temperatura distinta T_{pF}, el proceso de intercambio de energía térmica se denomina ***convección***. En este capítulo introductorio no desarrollamos procedimientos analíticos, sino una visión general del fenómeno, planteando las ecuaciones básicas que se utilizan en los cálculos.

Existen dos tipos de convección:
- a) Convección libre o natural
- b) Convección forzada

En la ***convección natural***, la fuerza motriz procede de la variación de densidad en el fluido como consecuencia del contacto con una superficie a diferente temperatura, lo que da lugar a unas fuerzas ascensionales; el fluido próximo a la superficie adquiere una velocidad debida únicamente a esta diferencia de densidades, sin ninguna influencia de fuerza motriz exterior; ejemplos típicos son la transmisión de calor al exterior desde la pared o el tejado de una casa en un día soleado sin viento, la convección en un tanque que contiene un líquido en reposo en el que se encuentra sumergida una bobina de calefacción, el calor transferido desde la superficie de un colector solar en un día en calma, etc.

La ***convección forzada*** tiene lugar cuando una fuerza motriz exterior mueve un fluido con una velocidad u_F sobre una superficie que se encuentra a una temperatura T_{pF}, mayor o menor que la del fluido T_F. Como la velocidad del fluido en la convección forzada u_F es mayor que en la convección natural, se transfiere, por lo tanto, una mayor cantidad de calor para una determinada temperatura.

Independientemente de que la convección sea natural o forzada, la cantidad de calor transmitida Q_c, se puede escribir (Ley de Newton):

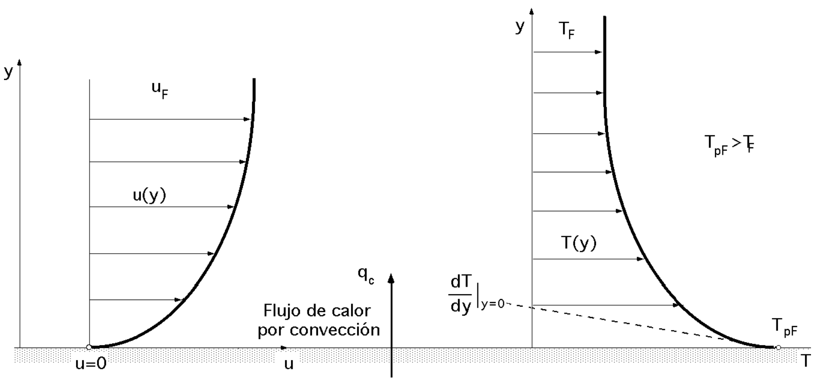

Fig I.9.- Distribución de la temperatura y la velocidad sobre una placa plana en convección forzada

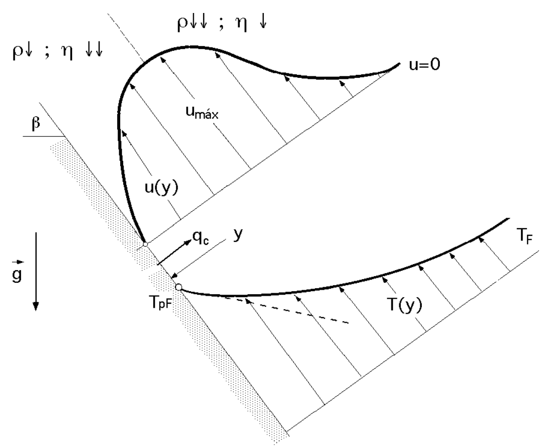

Fig I.10.- Distribución de la temperatura y la velocidad en convección natural sobre una placa plana inclinada

$$Q_C = h_{cF}\ A\,(T_{pF} - T_F)$$

en la que:

h_{cF} es la conductancia convectiva térmica unitaria o coeficiente de transmisión del calor por convección en la interfase líquido-sólido, en W/m²°K

A es el área superficial en contacto con el fluido, en m²

T_{pF} es la temperatura de la superficie

T_F es la temperatura del fluido no perturbado

La ecuación anterior sirve como definición del coeficiente de convección h_{cF}; su valor numérico se tiene que determinar analítica o experimentalmente.

En la Tabla I.5 se relacionan algunos valores aproximados de los coeficientes de transmisión de calor por convección, incluyendo la vaporización (ebullición) y la condensación, consideradas usualmente como una parte del área de la convección.

La relación entre el calor transmitido a un fluido por convección y el flujo del fluido, se puede obtener a partir de la Fig I.9, que muestra una placa plana caliente que se enfría mediante una corriente de aire que fluye sobre aquélla, (convección forzada), y las distribuciones de la velocidad y temperatura.

Tabla I.5.- Valores aproximados de coeficientes de transmisión de calor por convección

Tipo de convección y fluido	h_c (W/m²°K)
Convección natural, aire	5-25
Convección natural, agua	20-100
Convección forzada, aire	10-200
Convección forzada agua	50-10.000
Agua en ebullición	3.000-100.000
Vapor de agua en condensación	5.000-100.000

Se observa que la velocidad u = u(y) decrece en la dirección y hacia la superficie como resultado de la fuerza de rozamiento (viscosidad). Como la velocidad de la capa de fluido adyacente a la pared es u = 0, la transmisión de calor por unidad de área entre la superficie y esta capa de fluido se puede considerar debida exclusivamente a la conducción:

$$\frac{Q_c}{A} = -\,k_F \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{y=0} = h_C\,(T_{pF} - T_F)$$

Este punto de vista sugiere que el proceso pudiera ser eminentemente conductivo, pero como el gradiente de temperaturas en la superficie viene determinado por la velocidad conque el fluido situado lejos de la pared puede transportar la energía a la corriente principal, (el gradiente de temperaturas sobre la pared depende del campo de velocidades del fluido), resulta que a mayor velocidad se produce un mayor gradiente de temperaturas y una transferencia de calor superior, por lo que el proceso es prácticamente convectivo, sin despreciar la conductividad térmica que tiene igualmente un papel importante. La situación es muy similar en la convección natural, Fig I.10; la diferencia principal consiste en que en la convección forzada la velocidad lejos de la superficie se aproxima al valor de la corriente libre impuesta por una fuerza externa, mientras que en la convección natural la velocidad depende de las propiedades del fluido, que se indican a continuación:

- En los gases, un aumento de la temperatura implica que la densidad disminuya y la viscosidad aumente.

- En los líquidos, un aumento de la temperatura implica que la densidad y la viscosidad disminuyan.

En la convección natural, si el fluido es un líquido, la velocidad crece al principio con la distancia a la placa, debido a que la viscosidad disminuye más rápidamente que la densidad, que lo hace más lentamente, fenómeno que se invierte desde la zona de velocidad máxima hasta el resto del fluido; la fuerza ascensional decrece a medida que la densidad del fluido se aproxima a la del fluido de los alrededores, por lo que la velocidad alcanza, en primer lugar, un máximo y, posteriormente, se aproxima a cero lejos de la superficie caliente.

La distribución de temperaturas en la convección natural y en la forzada tiene una forma similar; en ambos casos, el mecanismo de la transmisión del calor en la interfase (fluido/sólido) corresponde a la conducción.

El coeficiente de transmisión de calor por convección forzada depende, en general, de la densidad, de la viscosidad y de la velocidad del fluido, así como de sus propiedades térmicas (conductividad térmica y calor especifico), es decir:

$$h_{cF} = f(\rho, \eta, u_F, k, c_p)$$

En la convección forzada la velocidad viene impuesta al sistema por una bomba, ventilador, etc, y se puede medir directamente, $u_F = Q/\Omega$

En la convección natural, la velocidad es de la forma: $u_F = f(\Delta T, \beta, g)$, es decir, depende de:

- La diferencia de temperaturas ΔT entre la superficie y el fluido

- Del coeficiente de dilatación térmica del fluido β que determina el cambio de densidad por unidad de diferencia de temperatura

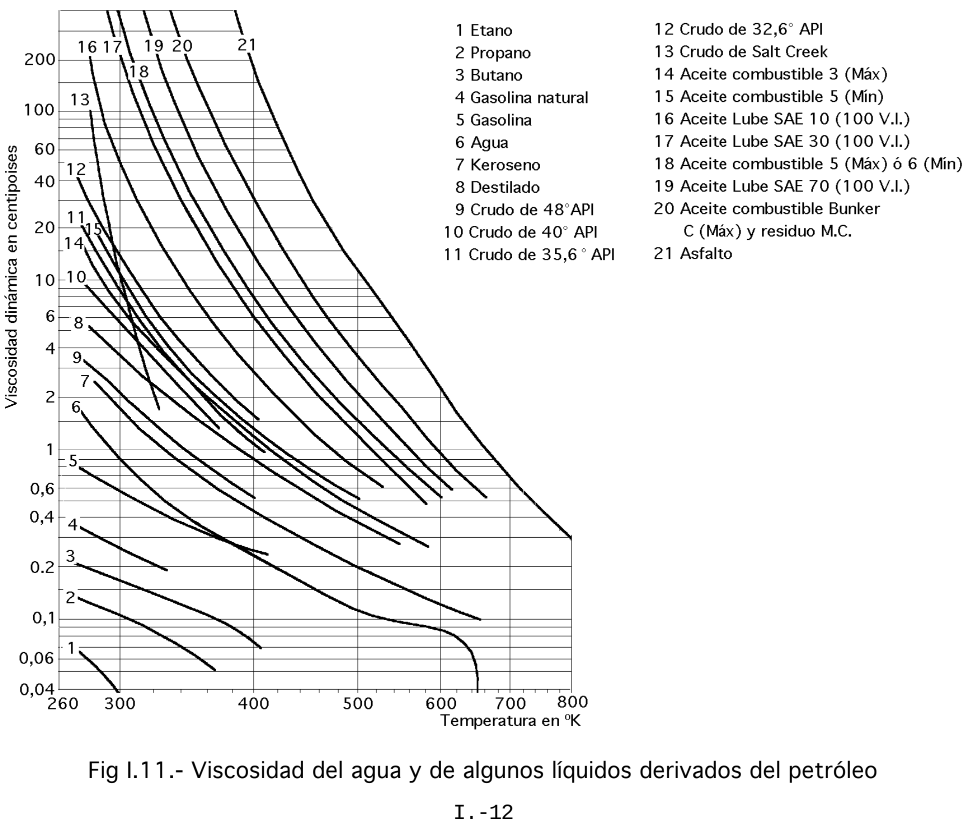

Fig I.11.- Viscosidad del agua y de algunos líquidos derivados del petróleo

- Del campo de fuerzas exteriores que, en general, es la gravedad

El número adimensional que caracteriza la convección natural es el número de Grashoff, que es el cociente entre las fuerzas de flotación y las fuerzas de viscosidad, de la forma:

$$Gr = \frac{g\,\beta}{\nu^2}\,\Delta T\, L^3$$

Para la convección natural en régimen laminar el nº de Rayleigh vale: $Ra = Gr\,Pr < 10^7$
Para la convección natural en régimen turbulento el nº de Rayleigh vale: $Ra = Gr\,Pr > 10^9$

El número adimensional que caracteriza la convección forzada es el número de Reynolds, que es el cociente entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de viscosidad, de la forma:

$$Re = \frac{u_F L}{\nu} \qquad \begin{cases} \text{Régimen laminar por el interior de tuberías:} & Re < 2000 \\ \text{Régimen turbulento por el interior de tuberías:} & Re > 8000 \end{cases}$$

El número adimensional que define al fluido es el nº de Prandtl, clasificándoles, en primera aproximación, en cuatro grandes grupos:

Gases: $Pr \cong 1$

Líquidos (agua, aceites calientes, etc): $Pr > 1$

Aceites a bajas temperaturas: $Pr > 1000$

Metales líquidos: $Pr << 1$

La transmisión de calor por convección se puede tratar también dentro de la estructura de una red de resistencias térmicas, en la forma:

$$R_C = \frac{1}{h_C\,A}$$

y esta resistencia, en una interfase superficie-fluido, se puede incorporar fácilmente a una red térmica en la que participen otras formas de transmisión de calor.

El calor transmitido en el ejemplo de la Fig I.12 entre dos fluidos separados por una pared plana, viene dado por:

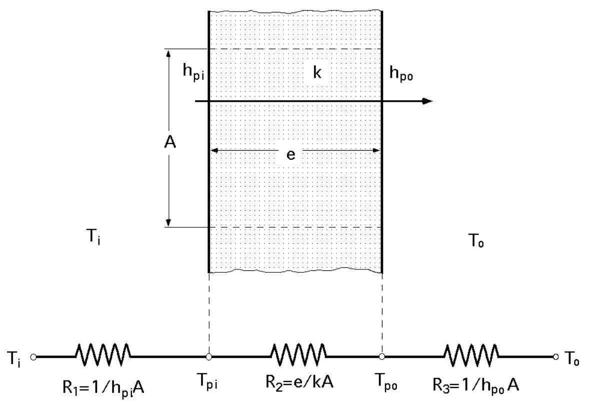

Fig I.12.- Analogía eléctrica correspondiente a la transmisión de calor a través de una pared plana con convección en sus dos caras.

$$Q = \frac{T_i - T_0}{\sum\limits_{i=1}^{i=3} R_1} = \frac{T_i - T_0}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{T_i - T_0}{\dfrac{1}{h_{ci}\,A} + \dfrac{e}{k\,A} + \dfrac{1}{h_{c0}\,A}}$$

I.6.- TRANSMISIÓN DE CALOR POR RADIACIÓN

Mientras que la conducción y la convección térmicas tienen lugar sólo a través de un medio material, la radiación térmica puede transportar el calor a través de un fluido o del vacío, en forma de ondas electromagnéticas que se propagan a la velocidad de la luz. Existen muchos fenómenos diferentes de radiación electromagnética pero en Ingeniería Térmica sólo consideraremos la radiación térmica, es decir, aquella que transporta energía en forma de calor.

La energía que abandona una superficie en forma de calor radiante depende de la temperatura absoluta a que se encuentre y de la naturaleza de la superficie.

Un radiador perfecto o cuerpo negro emite una cantidad de energía radiante de su superficie Q_r, dada por la ecuación:

$$Q_r = \sigma A T^4 = A E_b$$

en la que E_b es el poder emisivo del radiador, viniendo expresado el calor radiante Q_r en W, la temperatura T de la superficie en °K, y la constante dimensional σ de Stefan-Boltzman en unidades SI, en la forma:

$$\sigma = 5{,}67.10^{-8} \frac{W}{m^2\ {}^\circ K^4}$$

La ecuación anterior dice que toda superficie negra irradia calor proporcionalmente a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Aunque la emisión es independiente de las condiciones de los alrededores, la evaluación de una transferencia neta de energía radiante requiere una diferencia en la temperatura superficial de dos o más cuerpos entre los cuales tiene lugar el intercambio. Si un cuerpo negro a T_1 (°K) irradia calor a un recinto que le rodea completamente y cuya superficie es también negra a T_2 (°K) , es decir, absorbe toda la energía radiante que incide sobre él, la transferencia de energía radiante viene dada por:

$$Q_r = \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)$$

Si los dos cuerpos negros tienen entre sí una determinada relación geométrica, que se determina mediante un factor de forma F, el calor radiante transferido entre ellos es:

$$Q_r = Q_{1 \leftrightarrow 2} = \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4)$$

Los cuerpos reales no cumplen las especificaciones de un radiador ideal, sino que emiten radiación con un ritmo inferior al de los cuerpos negros. Si a una temperatura igual a la de un cuerpo negro emiten una fracción constante de la energía que emitirían considerados como cuerpo negro para cada longitud de onda, se llaman cuerpos grises.

Un ***cuerpo gris*** emite radiación según la expresión:

$$Q_r = \varepsilon A E_b = \varepsilon \sigma A T^4$$

El calor radiante neto transferido por un cuerpo gris a la temperatura T_1 a un cuerpo negro que le rodea a la temperatura T_2 es:

$$Q_r = \varepsilon_1 A_1 (E_{b_1} - E_{b_2}) = \varepsilon_1 \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)$$

siendo ε_1 la emitancia de la superficie gris, igual a la relación entre la emisión de la superficie gris y la emisión de un radiador perfecto a la misma temperatura. El hecho de que la transferencia de calor dependa de T^4 complica los cálculos.

Si T_1 y T_2 no difieren demasiado, se puede poner:

$$Q_r = \sigma A_1 \varepsilon_1 (T_1^4 - T_2^4) = \sigma A_1 \varepsilon_1 (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)(T_1 - T_2) =$$

$$= \left| \begin{array}{l} T_1 \approx T_2 \approx T_m \quad ; \quad T_m = \dfrac{T_1 + T_2}{2} \quad ; \quad T_1 - T_2 << T_1 \\ (T_1 + T_2)^2 - 2\, T_1 T_2 = (T_1^2 + T_2^2) = 4\, T_m^2 - 2\, T_m^2 = 2\, T_m^2 \\ (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2) = \{(T_1 + T_2)^2 - 2\, T_1\, T_2\}\, 2\, T_m = (4\, T_m^2 - 2\, T_m^2)\, 2\, T_m = 4\, T_m^3 \end{array} \right| =$$

$$= \sigma A_1 \varepsilon_1 4\, T_m^3 (T_1 - T_2) = A_1\, h_r\, (T_1 - T_2)$$

siendo: $h_r = 4\, \varepsilon_1 \sigma\, T_m^3$, el coeficiente de transferencia de calor por radiación.

A la temperatura de 25ºC = 298ºK, se obtiene: $h_r = 6\, \varepsilon_1$ W/m^{2}ºK, por lo que el coeficiente de transferencia de calor por radiación a la temperatura ambiente es del orden de 6 veces la emitancia de la superficie.

Para: T_1 = 320ºK y T_2 = 300ºK, *el error debido al empleo de la aproximación es del 0,1%*

Para: T_1 = 400ºK y T_2 = 300ºK, *el error debido al empleo de la aproximación es del 2%*

Si ninguno de los dos cuerpos es un radiador perfecto, pero poseen entre sí una determinada relación geométrica, el calor radiante neto transferido entre ellos viene dado por:

$$Q_{1 \leftrightarrow 2} = \sigma A_1 F_{1\text{-}2}^* (T_1^4 - T_2^4) = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\dfrac{\rho_1}{\varepsilon_1} + \dfrac{1}{F_{12}} + \dfrac{A_1}{A_2}\dfrac{\rho_1}{\varepsilon_1}}\, A_1$$

en la que $F^*_{1\text{-}2}$ es un factor de forma que modifica la ecuación de los radiadores perfectos para tener en cuenta las emitancias y las geometrías relativas de los cuerpos reales.

En muchos problemas industriales, la radiación se combina con otros modos de transmisión del calor. La solución de tales problemas se puede simplificar utilizando una resistencia térmica R_r para la radiación; su definición es semejante a la de la resistencia térmica de convección y conducción.

Si el calor transferido por radiación se escribe en la forma convectiva:

$$Q_r = \frac{T_1 - T_{2'}}{R_r} = h_r\, A\, (T_L - T_{2'})$$

en la que $T_{2'}$ es una temperatura de referencia cuya elección viene impuesta por las condiciones de convección, (temperatura media del entorno en contacto con la superficie), mientras que T_2 es una temperatura de referencia que viene impuesta por las condiciones de radiación, (medio ambiente), Fig I.13.

La resistencia térmica radiativa viene dada por:

$$R_r = \frac{T_1 - T_2}{\sigma\, A_1\, F_{1\text{-}2} (T_1^4 - T_2^4)} = \frac{1}{\sigma\, A_1\, F_{1\text{-}2} (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}$$

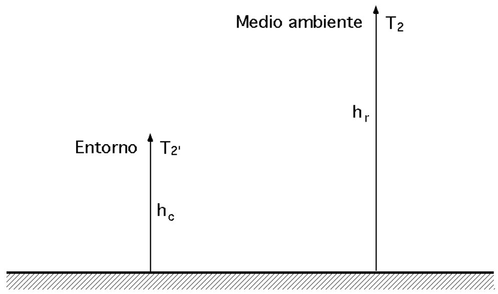

Fig I.13

La conductividad térmica unitaria de la radiación $\boldsymbol{h_r}$ se define mediante la expresión:

$$h_r = \frac{1}{R_r A_1} = \frac{\sigma F_{1-2}\,(T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_{2'}} = \sigma F_{1-2}\,(T_1^2 + T_2^2)\,(T_1 + T_2)$$

en la mayoría de los casos T_2 y $T_{2'}$ coinciden.

I.7.- MECANISMOS COMBINADOS DE TRANSMISIÓN DE CALOR

Normalmente la energía térmica se transmite en etapas a través de un cierto número de secciones conectadas en serie, intercalando entre ellas otras situaciones en paralelo; para dar una idea, consideraremos una aplicación de la transmisión de calor en la cámara de combustión de una turbina de gas, en la que los productos de la combustión que la atraviesan, calientan las paredes siendo estas refrigeradas mediante un refrigerante que circula por un anillo exterior a la pared, Fig I.14. Los productos de la combustión contienen gases como el CO, CO_2 y H_2O que emiten y absorben la radiación; en la primera sección de este sistema el calor se transfiere del gas incandescente a la superficie interna de la pared de la cámara de combustión por los mecanismos de convección y radiación que actúan en paralelo.

El calor total Q en la superficie de la pared, a cierta distancia de la tobera es:

$$Q = Q_{c(gases)} + Q_r = h_{cg}\, A\,(T_g - T_{pg}) + h_r\, A\,(T_g - T_{pg}) = (h_{cg} + h_r)\,(T_g - T_{pg})\,A = \frac{T_g - T_{pg}}{R_1}$$

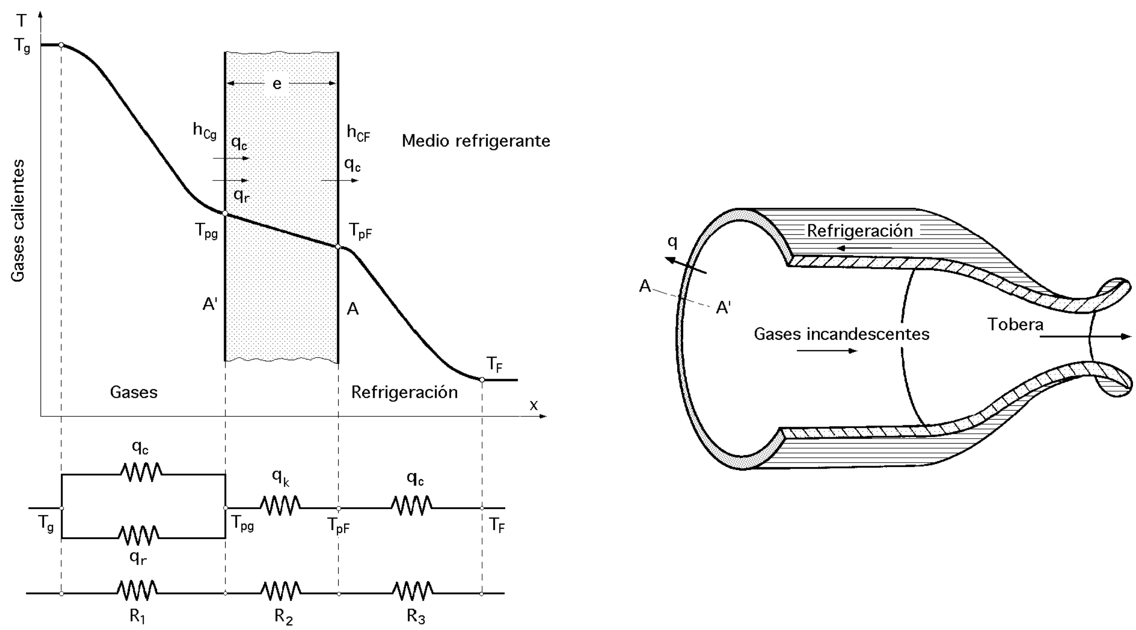

Fig I.14.- Transmisión de calor en la cámara de combustión de una turbina de gas

$$R_1 = \frac{1}{(h_{cg} + h_r)\, A}$$

en la que T_g es la temperatura del gas incandescente y T_{pg} es la temperatura de la superficie interna de la pared.

En estado estacionario el calor se conduce a través de la pared periférica a la misma velocidad que en la superficie y en la que el valor de Q es:

$$Q = Q_k = \frac{k\,A}{e}\,(T_{pg} - T_{pF}) = \frac{T_{pg} - T_{pF}}{R_2} \quad ; \quad R_2 = \frac{e}{k\,A}$$

siendo T_{pF} la temperatura superficial de la pared en el lado refrigerado y R_2 la resistencia térmica de la segunda sección.

Después de atravesar la pared, el calor fluye por convección a través de la tercera sección del sistema hacia el refrigerante. El calor en la última etapa es:

$$Q = Q_c = h_{cF}\, A\,(T_{pF} - T_F) = \frac{T_{pF} - T_F}{R_3} \quad ; \quad R_3 = \frac{1}{h_{cF}\, A}$$

siendo T_F la temperatura del refrigerante y R_3 la resistencia térmica en la tercera sección del sistema.

Hay que hacer constar que los valores numéricos de los coeficientes de convección en la primera $\boldsymbol{h_{Cg}}$ y tercera $\boldsymbol{h_{CF}}$ sección del sistema dependen de muchos factores y, por lo tanto, son diferentes.

Además, las áreas de las tres secciones sometidas al flujo de calor no son iguales. No obstante, como la pared es muy delgada, el cambio en el área del flujo de calor es tan pequeño que puede despreciarse en este sistema. En la práctica ocurre con frecuencia que sólo se conocen las temperaturas de los gases incandescentes y del refrigerante, por lo que el calor es:

$$Q = \frac{T_g - T_F}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{T_g - T_F}{\dfrac{1}{h_{cg} + h_r} + \dfrac{e}{k} + \dfrac{1}{h_{cF}}}\, A$$

En la ecuación anterior el flujo de calor se ha expresado exclusivamente en función de un potencial global de temperaturas y las características de transmisión del calor de las secciones individuales en que se ha dividido el camino seguido por el flujo. A partir de estas relaciones es posible evaluar cuantitativamente la importancia de cada resistencia térmica individual de la transmisión, por lo que una inspección del orden de magnitud de los términos individuales del denominador indican, frecuentemente, la forma de simplificar el problema, de modo que cuando uno u otro término domine cuantitativamente, se puede, a veces, despreciar el resto.

Existen ciertos tipos de problemas, principalmente en el diseño de intercambiadores de calor, en los que conviene simplificar la ecuación anterior combinando las resistencias o conductancias individuales del sistema térmico, reduciéndolas a una magnitud llamada ***coeficiente global de transmisión del calor*** U; la última ecuación se puede expresar en función de este coeficiente global en la forma:

$$Q = U\, A\, \Delta T_{total} = \frac{\Delta T_{total}}{R_1 + R_2 + R_3} \qquad U\, A = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3}$$

Para una pared plana de espesor *e* entre dos fluidos:

$$\frac{1}{U\,A} = \frac{1}{h_C\,A} + \frac{e}{k\,A} + \frac{1}{h_F\,A}$$

Para el ejemplo anterior:

$$\frac{1}{U\,A} = \frac{1}{(h_{cg} + h_r)\,A} + \frac{e}{k\,A} + \frac{1}{h_{cF}\,A}$$

El coeficiente global U se calcula siempre en función de una superficie A de intercambio térmico del sistema, que habrá que fijar de antemano.