

# Ingeniería Energética General

## Ahorro Energético Integral Aplicado a la Mediana y Pequeña Industria, a los Centros Comerciales, a los Edificios

### **TRANSMISION DEL CALOR, AISLAMIENTO TÉRMICO**

Por el peso que tienen en el consumo mundial energético, nos proponemos al abordar estos conocimientos de ingeniería, una meta muy ambiciosa.

*"Crear un conjunto de informaciones y procesadores de cálculo para conocer, aplicar y poder realizar tareas de selección, diseño, proyectos, mantenimientos y modernizaciones de sistemas que requieren aislamiento térmico".*

Noviembre 2011

## TRANSMISION DEL CALOR, AISLAMIENTO TÉRMICO

### SEGUNDA PARTE

OBJETIVOS:

- 1) Breve explicación del fundamento técnico sobre la transferencia de calor.
- 2) Flujo de calor a través de una superficie
- 3) Mecanismos de transferencia de calor
- 4) Procesadores de cálculos para cada uno de los mecanismos estudiados.

#### Breve explicación. Fundamento técnico.

Procesos de transferencia de calor.

La transferencia de calor está relacionada con la razón de intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos, o entre espacios con altas y bajas temperaturas, en ambos casos llamados foco o fuente emisor y receptor.

En la primera parte de este conjunto de artículos sobre la Transmisión del Calor, Aislamiento Térmico, explicamos las diferentes formas de transmisión. En esta segunda parte, explicaré el mecanismo en las que el calor puede pasar desde el emisor al receptor.

La transferencia de calor a través (sección transversal) de una superficie ocurre por conducción a través del material de la superficie, por convección en circulación libre o forzada con el aire ambiente y por radiación. Entonces el calor transferido es igual a:

$$Q = Q_{\text{conducc}} + Q_{\text{convecc}} + Q_{\text{radiacc}}$$

donde:

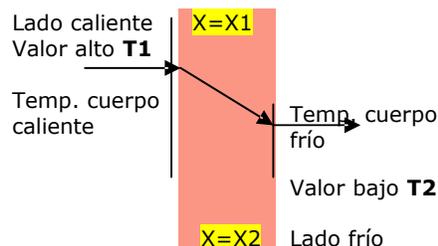
$Q$ : El calor transferido al exterior por la sección transversal de una superficie  $S$ .

$Q_{\text{Conducc}}$ : Calor transferido al exterior por conducción

$Q_{\text{Convecc}}$ : Calor transferido al exterior por convección.

$Q_{\text{radiacc}}$ : Calor transferido al exterior por radiación.

En el caso de superficies frías, el proceso se referirá al calor ganado en ambos casos.



En la figura anterior se muestra como se realiza el flujo de calor desde una fuente interior emisora a una temperatura  $T_1$  al ambiente exterior a una temperatura menor

**T2**, atravesando el espesor del material  $\Delta X = X_2 - X_1$

La cantidad de calor transferida y que atraviesa la superficie se expresa en unidades de energía Joule, Calorías y Btu por la unidad de tiempo, por hora.

## Flujo de calor a través de una superficie

**Flujo térmico por conducción** (Ver el calculador Sistema Transferencia de Calor. Conducción en nuestra web [www.energianow.net](http://www.energianow.net))

Paredes planas sencillas

$$Q = \frac{k(T_i - T_s)}{e} = \frac{(T_s - T_s)}{e/k}$$

siendo:

k : conductividad térmica, Kcal/(h·m<sup>2</sup>)(°C/m)

T<sub>i</sub>: temperatura interior o del fluido, °C

T<sub>s</sub>: temperatura superficial de la pared (aislada o no aislada), °C

e: espesor del aislamiento, m

Paredes múltiples

$$Q = \frac{k(T_i - T_s)}{e} = \frac{(T_i - T_s)}{\sum e/k}$$

Siendo e y k referido a cada una de las capas o paredes que forman el conjunto

Superficies curvadas sencillas

Cuándo el calor fluye a través de una pared circular, cómo la de las tuberías, la dirección del flujo es en todos los puntos radial y perpendicular al eje, siendo la sección recta de paso proporcional a su distancia al eje del cilindro. En todos los casos el área media logarítmica es el valor medio verdadero. Entonces la velocidad de conducción del calor por conducción en un cilindro hueco de longitud unitaria, dependerá exclusivamente de los radios extremos y no del espesor.

$$Q = \frac{2\pi k(T_i - T_s)}{\log(d_o/d_i)} = \frac{(T_i - T_s)}{1/2\pi \cdot \log(d_o/d_i)}$$

Superficies curvadas múltiples

$$Q = \frac{(T_i - T_s)}{1/2\pi \cdot (\sum k_i) [\ln(d_o/d_i)]_i}$$

donde ln es logaritmo neperiano

**Flujo térmico por convección.** (Ver el calculador Sistema Transferencia de Calor. Convección en nuestra web [www.energianow.net](http://www.energianow.net))

El flujo térmico por convección dependerá del régimen exterior al que están expuestas las superficies, si la circulación es forzada o es natural. Las ecuaciones que aquí se muestran son deducidas de la experimentación y propias de las condiciones en las que fueron obtenidas. En aquellos estudios e investigaciones en las que se requiere total precisión, habría que utilizar ecuaciones que consideran todos los parámetros que intervienen. Entran en juego, además de la temperatura de la superficie y la del medio al que se cede calor, determina la densidad y la viscosidad del gas circulante, y la velocidad del flujo exterior. También la geometría y las condiciones que presentan las superficies expuestas. Entonces se hace muy complejo.

## Convección natural

Para conocimiento general, las ecuaciones empíricas que determinan el coeficiente de transferencia de calor por convección, han sido determinadas en función de variables o parámetros que influyen de manera directa en ellos y que por su grado de complejidad aquí no los vamos a describir. Esos parámetros se agrupan en números característicos, que determinan el proceso de transferencia de calor. Entre los más importantes tenemos Nusselt ( $hL/k$ ), Grashof ( $L^3\rho^2g/\mu^2(\beta\Delta t)$ ), Prandtl ( $c_p\mu/k$ ), Reynolds ( $LV\rho/\mu$ ) y otros.

Conocido las propiedades y características de los materiales, el ambiente circulante, las formas geométricas de las superficies, sus características, etc. es que se obtienen los diferentes parámetros y estos a su vez determinan los coeficientes por convección, tanto en circulación natural, cómo en circulación forzada.

Existen nomogramas y Tablas que resumen esta información y se pueden obtener rápidamente los coeficientes de transferencia por convección, una vez determinado los valores de estos parámetros característicos. En este artículo lo que hacemos es un resumen práctico de estas ecuaciones que nos ofrece la literatura especializada en transferencia de calor.

La mayoría de las veces es difícil obtener buenos datos para cada una de las disímiles situaciones que se nos presentan. Hay una amplia diversidad de tamaños y tipos de equipos usados en la industria. Esto se debe en parte a la interferencia y complejidades de los elementos del calentamiento por convección libre, tales como los bancos de tubos y la imposibilidad de controlar una atmósfera del fluido al grado necesario para obtener buenos resultados experimentales. Las superficies que encontramos, su acabado, la posición en que están dispuestas, las proximidades con otros equipamientos, todo eso forma una amplia diversidad que hace complicado poder seleccionar el dato correctamente.

Las correlaciones para convección libre de superficies externas de diferentes formas, que son de valor directo en la ingeniería, están catalogadas, principalmente, en dos clases: convección libre respecto a tubos simples, y convección libre respecto a paredes y recipientes.

Es claro que las corrientes de **convección libre** no solo se influyen por la posición de la superficie sino también por la proximidad a otras superficies. Las superficies

horizontales originan corrientes que difieren grandemente de las que se originan en superficies verticales. McAdams (Transferencia de Calor, Tercera Edición) ha resumido las formas dimensionales simplificadas para la convección libre del aire.

## **Tubos horizontales.**

$$hc = 1.18 * \text{antilog} [0.25 * \ln(\Delta T/d_o)]$$

**Tubos diámetros pequeños = 0.47 y tubos diámetros grandes = 0.53**

## **Tubos verticales.**

$$hc = 1.27 * \text{antilog} [0.25 * \ln(\Delta T/d_o)]$$

## **Placas verticales de menos de 0.6 metros de alto**

$$hc = 1.27 * \text{antilog} [0.33 * \ln(\Delta T/d_o)]$$

## **Placas verticales de más de 0.6 metros de alto**

$$hc = 1.33 * \text{antilog} [0.33 * \ln(\Delta T/d_o)]$$

## **Placas horizontales superficie caliente hacia arriba**

$$hc = 1.18 * \text{antilog} [0.25 * \ln(\Delta T/d_o)]$$

## **Placas horizontales superficie caliente hacia abajo**

$$hc = 0.525 * \text{antilog} [0.25 * \ln(\Delta T/d_o)]$$

siendo:

hc: coeficiente de conductividad térmica en Kcal/h-m<sup>2</sup>-°C

Ta: temperatura ambiente, °C

Ts: temperatura superficial de la pared (aislada o no aislada), °C

$\Delta t = T_s - T_a$

L: altura de la superficie, m

Do: El diámetro exterior del cilindro o tubería.

Calcularemos el coeficiente por convección natural de una superficie plana y otra cilíndrica y su relación con las diferencias de temperatura respecto a la ambiente.

Este procedimiento es muy utilizado para cálculos estimados de pérdidas o infiltraciones de calor por superficies, sectorizando las áreas de los equipos que generan calor o producen frío.

En la Tabla que sigue resumiremos los cálculos. Asumiremos que estamos en presencia de una superficie de acero caliente, que es un cuadrado de 1 m de lado, y de una tubería también de acero galvanizado que conduce un fluido caliente, de un diámetro exterior de 318 mm (12 plg) y de 1 metro de longitud, ambas en posición vertical. Consideramos que tanto la superficie como la tubería están expuestas al aire

# INGENIERÍA ENERGÉTICA GENERAL

IEG: 050811  
[www.energianow.net](http://www.energianow.net)

ambiente, en circulación libre, a una temperatura ( $T_a$ ) de 30 °C y a la presión atmosférica.

En los cálculos se irá variando el valor de la temperatura superficial, tanto de la placa como de la tubería, aumentando de 10 en 10 °C y comprobaremos cómo cambia el coeficiente de transferencia de calor con estas variaciones.

<b>Coefficiente de transferencia de calor por convección. Convección libre al aire</b>			
		<b>Placa vertical</b>	<b>tubería vertical</b>
		$hc = 1.33 * \text{antilog} [0.33 * \ln(\Delta T / do)]$	$hc = 1.27 * \text{antilog} [0.25 * \ln(\Delta T / do)]$
superficie, m <sup>2</sup>		1.0 m <sup>2</sup>	$\pi \phi L = 3.14 * 0.318 = 1.0 \text{ m}^2$
Material		<b>Placas de acero</b>	<b>Tubería de acero</b>
coeficiente de convección libre <b>hc:</b> Kcal/h m <sup>2</sup> °K			
Ts, Temperatura superficie.	313 °K (40°C)	2,84	3,01
	323 °K (50°C)	3,57	3,58
	333 °K (60°C)	4,09	3,96
	343 °K (70°C)	4,49	4,25
		<b>Placa horizontal</b>	<b>Tubería horizontal</b>
Ts, Temperatura superficie.	313 °K (40°C)	2,10	2,79
	323 °K (50°C)	2,50	3,32
	333 °K (60°C)	2,76	3,68
	343 °K (70°C)	2,97	3,95

Dado que tanto la placa como la tubería que hemos utilizado en el ejercicio de la Tabla anterior, son del mismo material y tienen una superficie de 1.0 m<sup>2</sup>, apreciamos como la forma de la superficie influye en el valor del coeficiente y la posición respecto a la horizontal también.

En realidad los mecanismos son muy complejos, varía en el tiempo, en el espacio. Por ejemplo, si la velocidad del viento es alta ya no se puede considerar una convección libre, y estos coeficientes ya tomarían otros valores, por eso es muy importante, cuando se trata de establecer un parámetro que posteriormente tendrá implicaciones en el dimensionamiento de equipos y materiales, realizar un análisis que abarque todas las posibles condiciones reales de operación del sistema, desde aquellas de menor rigor operacional hasta las de mayor rigor o críticas. Entonces así, decidir dentro del entorno.

**Flujo térmico por radiación.** (Ver el calculador Sistema Transferencia de Calor. Radiación en nuestra web [www.energianow.net](http://www.energianow.net) )

Los cuerpos calientes emiten energía radiante a una cierta velocidad, dependiendo principalmente de las características del cuerpo. A temperaturas inferiores a 540 °C la radiación no es percibida por el ojo humano pero si puede sentirse la sensación de calor al acercarnos a un cuerpo más caliente. Cada sustancia material emite diferentes longitudes de ondas calóricas cuando se excitan.. La expresión radiación térmica se refiere a la energía radiante emitida como consecuencia de la temperatura de un cuerpo.

En los procesos térmicos el fenómeno de transporte de calor por radiación tiene su importancia ya que es energía que se pierde o se gana en los sistemas, de no ponerle obstáculos para reducir su velocidad y cantidad de flujo.

Este fenómeno de transferencia además de ser complejo, pues depende de muchos factores, se hace difícil de atenuar o eliminar. Por ejemplo, una corriente convectiva de aire caliente puede ser extraída del área de trabajo con medios mecánicos, por ejemplo, con extractores y a la vez forzado un flujo de aire fresco del exterior. Pero un flujo radiante, procedente de equipos que operan a elevadas temperaturas y se encuentran mal aislados, o procedente de cubiertas metálicas que al estar en contacto con el sol radian el calor al interior de las áreas de trabajo, sólo puede ser reducido con apantallamiento de superficies reflectivas o con una buena capa de material aislante.

La explicación anterior que puede parecer muy teórica, tiene grandes implicaciones al diseñar las naves o locales donde se realizarán trabajos intensivos, en líneas de producción continuas. Las soluciones posteriores a la puesta en marcha son muy costosas, de no tomarse en cuenta desde la etapa de proyecto.

Ecuación de Stefan Boltzmann:

$$Q_r = 4.84 \cdot 10^{-8} \cdot e \cdot \{ \text{antiln}[4 \cdot \ln(T_s + 273)] - \text{antiln}[4 \cdot \ln(T_a + 273)] \} \cdot S$$

Para tuberías, por unidad de longitud:

$$Q_r = 4.84 \cdot 10^{-8} \cdot e \cdot \{ \text{antiln}[4 \cdot \ln(T_s + 273)] - \text{antiln}[4 \cdot \ln(T_a + 273)] \} \cdot n \cdot d_o$$

Constante de Boltzmann es  $4.84 \cdot 10^{-8}$

El coeficiente de radiación puede expresarse por:

$$h_r = 4.84 \cdot 10^{-8} \cdot e \cdot \{ \text{antiln}[4 \cdot \ln(T_s + 273)] - \text{antiln}[4 \cdot \ln(T_a + 273)] \} / (T_s - T_a)$$

Y acomodando estas expresiones:

$$Q_r = h_r \cdot E \cdot (T_s - T_a) \cdot S \text{ superficies planas}$$

$$Q_r = h_r \cdot E \cdot (T_s - T_a) \cdot n \cdot d_o \text{ tuberías y sup. cilíndricas}$$

Donde:

e es la emisividad superficial

Ta es la temperatura ambiente

Ts es la temperatura de la superficie (aislada o no aislada)

Conocido el valor de la emisividad de la superficie, podríamos calcular el coeficiente de radiación para diferentes temperaturas superficiales, respecto a una temperatura ambiente Ta promedio, digamos 30 °C ó 303 °K. ¿En qué unidades viene expresado este coeficiente? Veamos:

# INGENIERÍA ENERGÉTICA GENERAL

IEG: 050811  
[www.energianow.net](http://www.energianow.net)

El calor transferido  $Q_r$  se expresa en kcal  
 Las unidades de superficies  $S$  en  $m^2$   
 La temperatura en K elevado a la cuarta.

$h_r$  viene dada en  $Kcal/h \cdot m^2 \cdot ^\circ K$

Calculemos el coeficiente de transferencia de calor por radiación al ambiente desde las mismas superficies de la tabla anterior, planteando diferentes intervalos de temperaturas.

<b>Coeficiente de transferencia de calor por radiación.</b>			
		<b>Placa</b>	<b>tubería</b>
superficie, $m^2$		1.0 $m^2$	$\pi \cdot d_o = 3.14 \cdot 0.318 = 1 \text{ m}^2$
emisividad		0.28 a 0.30	0.28 a 0.30
Material		<b>Placas de acero</b>	<b>Tubería de acero</b>
coeficiente de radiación $h_r$ , $Kcal/h \cdot m^2 \cdot ^\circ K$			
$T_s$ , Temperatura superficie.	313 $^\circ K$ (40 $^\circ C$ )	5.66	5.66
	323 $^\circ K$ (50 $^\circ C$ )	5.94	5.94
	333 $^\circ K$ (60 $^\circ C$ )	6.24	6,24
	343 $^\circ K$ (70 $^\circ C$ )	6.55	6,55

Del cuadro anterior apreciamos que en la medida que la diferencia de temperatura crece, mayor es el coeficiente de radiación. Un metro de tubería de 318 mm de diámetro a una temperatura superficial de 70  $^\circ C$ , lo cual es común en las tuberías de vapor condensado, transfiere al exterior 6,55 kcal/h de calor por cada metro de longitud.

En el coeficiente de transferencia de calor por radiación determina el coeficiente de emisividad, una propiedad física de los diferentes materiales que se emplean en la industria.

## Conductancia

Si el calor se transfiere mediante más de un mecanismo de los anteriormente estudiados, a través de una estructura cuya sección recta tenga un área unitaria, se define la conductancia como la relación del flujo calorífico total por hora a la caída de temperatura entre las superficies límites.

$$C = \Sigma q / \Delta t$$

## Los mecanismos estudiados de transferencia de calor.

El flujo de calor a través de una superficie cualquiera se determina conociendo los tres mecanismos anteriores, cómo se conduce, cómo se realiza la convección y cómo las superficies radian calor al medio. Es normal que estén presentes los tres procesos.

En los sistemas reales de transferencia de calor, las superficies calientes de los equipos operacionales (o frías), sean hornos, calderas, enfriadoras, intercambiadores de calor, conductos y tuberías que conducen fluidos térmicos o combustibles, están expuestas al

medio exterior, dónde encontramos la temperatura ambiente y dónde la circulación del aire es libre.

Estos equipos y materiales que componen las superficies, intercambian calor con otras superficies que estén cercanas a ella y que sus temperaturas son diferentes, conduciéndose el calor desde la zona de la superficie de alta temperatura a la de menor temperatura. En conclusión, por lo general se busca encontrar un coeficiente global de transferencia de calor, representativo de todos estos procesos.

Hasta aquí un resumen de los que podemos llamar la esencia para saber cuánta energía se puede perder en un sistema térmico y cómo poder reducir esas pérdidas. Hemos conocido que si hay diferencia de temperaturas entre las superficies y el medio exterior, el calor pasa al ambiente, y que si esa diferencia se hace mayor, también es mayor el calor que se transfiere. También conocimos que a más área expuesta, más calor se transfiere.

Ahora, si cubrimos esas superficies de materiales que se opongan a que el calor se transfiera, estaremos reduciendo el flujo calórico. Y eso es precisamente lo que hace el aislamiento térmico, recubre las superficies y se opone al paso el calor.

Esa es la razón y el fundamento de aislar, evitar que el calor se transfiera libremente, que las superficies radien el calor contaminando las áreas cercanas. En otro ángulo del problema, el aislamiento también protege las superficies metálicas en recipientes donde se desarrollan procesos a altas temperaturas, como son los hornos de fusión de hierro y preparación del acero, o los tubos internos de calderas en hogares dónde se desarrollan altas temperaturas radiantes. También la protección de líneas de fluidos térmicos que conducen líquidos a temperaturas muy altas, de los conductos de gases, humos de la combustión, etc.

Si el proceso que se desarrolla es el de conducción de agua helada, para alimentar unidades de Tratamiento de Aire (Fancoil) en sistemas centralizados de Aire Acondicionado, o de aire frío a través de conductos pues entonces nos interesa evitar que el calor penetre desde el exterior. Las ganancias de calor ahora serán una pérdida.

En conclusión, aislamientos térmicos y refractarios son dos actividades dentro de una especialidad que es de las de mayor importancia dentro de la Ingeniería Energética. Conocer sobre aislamientos térmicos y refractarios, saber seleccionar estos materiales según los requerimientos del proyecto, saberlos aplicar y montar correctamente, mantener y fiscalizar periódicamente su estado técnico, es todo un sistema que a corto plazo da resultados economizando el dinero que de seguro se perdería.

**Nota:** El artículo es la base teórica para el diseño y operación de los procesadores de cálculos para la determinación de los coeficientes de transferencia de calor para superficies planas y cilíndricas. En estos procesadores se introducen los valores de  $t_s$ ,  $t_a$ ,  $k$ ,  $e$ ,  $d_o$ ,  $d_i$ ,  $s$ , etc y se obtienen los valores de los coeficientes. Estos procesadores se encuentran online en nuestra web [www.energianow.net](http://www.energianow.net) y pueden ser utilizados gratuitamente.

En el próximo artículo trataremos sobre el origen y la aplicación de los coeficientes globales de transferencia de calor y por supuesto, también facilitaremos la tarea con un procesador de cálculo múltiple.

## **¿A quién le es útil este conocimiento, los procesadores de cálculo y su aplicación?**

Proyectistas en general, ingenieros de operación, de mantenimiento, de reparación, modernización y desarrollo de sistemas energéticos, especialistas en diagnóstico y auditorías, profesores, estudiantes afines y a todos los interesados que le preocupa saber sobre energía, su uso y cuidado.



Sobre el Autor: René Ruano Domínguez tiene más de 35 años de experiencia en actuaciones en sistemas y equipos energéticos, tanto en los que utilizan energía fósil como fuentes renovables. Se inició como operador, posteriormente tecnólogo y Gerente Técnico en la Industria de Conversión y Refinación de los Combustibles. Ha sido fundador y Gerente Técnico de varios Equipos de Ingeniería Energética dirigidos al Proyecto, Montaje y los Servicios Técnicos en los Sistemas de Calor y Frío, abarcando la generación, distribución y uso del vapor y el agua caliente en mediana y pequeñas instalaciones, hasta 10 bar de presión; y en los sistemas de Frío las bajas temperaturas (refrigeración y producción de hielo industrial), medianas temperaturas (conservación) y altas temperaturas (Aire Acondicionado) para instalaciones industriales y comerciales. Ha realizado múltiples actuaciones en proyectos, ejecución y servicios de Ingeniería Energética General.