



COEFICIENTES, INTERCAMBIADORES DE CALOR Y CALDERAS

Barcelona; 01 de Febrero del 2002

INTRODUCCIÓN

Los Intercambiadores de Calor son aparatos que permiten el calentamiento o enfriamiento de un fluido (líquido o gas) por medio de otro fluido a diferente temperatura y separado por una pared metálica.

La mayoría de las industrias químicas la transmisión de calor se efectúa por medio de intercambiadores de calor y el más común de todos es el formado por dos tubos concéntricos, por uno de los cuales pasa el líquido a enfriar y por otro se hace circular la corriente refrigerante.

Las Calderas son transformadores de energía térmica capaces de transferir de forma conveniente el calor producido por una combustión o generado por otro fenómeno químico o físico a un fluido (generalmente agua) destinado a ceder la energía recibida en forma térmica o mecánica y luego utilizada en múltiples empleos.

Las Calderas industriales son instalaciones mucho más complicadas y transforman la energía térmica que en ellas se genera en energía potencial mecánica, ya que su fluido está destinado a desarrollar trabajo mecánico, y sale en forma de vapor.

La Gran energía contenida en el vapor puede ser liberada en forma de trabajo de expansión y equivale a la energía térmica cedida por la caldera al fluido. Con mucha propiedad las calderas industriales se denominan Generadores de Vapor.

Los fenómenos que tiene lugar en el funcionamiento de una caldera son cuatro: combustión, transmisión del calor entre fluidos en movimiento, evaporación y sobrecalentamiento.

Para la combustión en la caldera se emplea: el calor fósil, los aceites pesados, el gas natural y raramente el lignito.

DESARROLLO

CUAL ES SIGNIFICADO DEL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR U. QUE VARIABLES DETERMINAN EL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR. COEFICIENTE DE PELÍCULA H Y SU DIFERENCIA CON EL COEFICIENTE GLOBAL U.

Para diseñar o predecir el rendimiento de un intercambiador de calor, es esencial relacionar la transferencia total de calor con cantidades como el coeficiente global de transferencia de calor donde:

$$1/U = 1/h_h + T/h + 1/h_c,$$

Son los coeficientes convectivos de transferencia de calor en el lado caliente y en el lado frío de la pared metálica. El coeficiente de transferencia de calor total para intercambiadores de calor depende no solo de los coeficientes convectivos de transferencia de calor, sino además de las superficies interior y exterior del tubo.

El coeficiente de transferencia de calor total es importante ya que nos proporciona la cantidad total de calor transferido cuando se multiplica este por área de la superficie del exterior del tubo y T .

Desde el punto de vista del diseño del intercambiador de calor, puede estar basado, tanto en el área del interior del tubo como la exterior.

Aunque los diseños finales de los intercambiadores de calor dependen ampliamente de los cálculos de U , resulta de utilidad disponer de valores tabulados del coeficiente global para varias situaciones que se puedan encontrar en la práctica.

Factores de Obstrucción.

las superficies de transferencia de calor de un intercambiador de calor pueden llegar a recubrirse con varios depósitos presentes en las corrientes o las superficies pueden corroerse como resultado de la interacción entre los fluidos y el material empleado en la fabricación y diseño del intercambiador.

El efecto global se representa generalmente mediante un factor de suciedad o resistencia de suciedad, R_f . Que debe incluirse junto con las otras resistencias térmicas para obtener el coeficiente global de transferencia de calor.

Los factores de suciedad se tienen que obtener experimentalmente, la determinación de los valores de U del intercambiador de calor, tanto en condiciones de limpieza como en suciedad.

El factor de suciedad queda definido entonces como:

$$R_f = 1/U_{\text{Sucio}} - 1/U_{\text{Limpio}}$$

Se debería destacar que el valor de U viene determinado en muchos casos por solo uno de los coeficientes de transferencia de calor por convección.

En la mayoría de los problemas prácticos la resistencia a la conducción es pequeña comparada con la resistencia a la convección. Si uno de los valores de h es notablemente mas bajo que otro tenderá a dominar en la ecuación de U donde:

U_i : Coeficiente global de transferencia de calor interna.

U_e : Coeficiente global de transferencia de calor externa.

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\ln(r_e/r_i)}{k} + \frac{1}{h_e}}$$

$$h_i = 2 k_L A_e \cdot h_e$$

$$U_e = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \frac{\ln(r_e/r_i)}{k} + \frac{1}{h_i}}$$

$$\frac{1}{U_e} = \frac{1}{h_e} + \frac{\ln(r_e/r_i)}{k} + \frac{1}{h_i}$$

$A_i \cdot h_i = 2 k_L h_e$

Donde,

$h_i = \frac{Nu_i K}{L} h_e = \frac{1.32}{L} T_1/4$

$d = d_1/4$

Intercambiador de corrientes paralelas

En este tipo de intercambiador la distribución de temperaturas caliente y fría se muestran en el siguiente diagrama:

Considerando una longitud diferencial del intercambiador térmico con un área diferencial, (dA).

El calor transmitido a través de esta área se puede expresar de tres maneras equivalentes, el calor medido por el fluido más caliente, el calor recibido por el fluido más frío y el calor que se transfiere en el intercambiador.

Intercambiador de Calor Contracorriente.

En este tipo de intercambiador se mantiene la transferencia de calor entre las partes más calientes de los fluidos en un extremo, y así como entre las partes más frías en el otro.

Las distribuciones de temperatura de los fluidos se muestran en el siguiente diagrama:

Se puede observar que conforme el área es mayor, la diferencia entre la distribución de las temperaturas de los fluidos más calientes y más frío se vuelve cada vez más pequeña y que en el límite del área finita, las líneas de distribución son coincidentes.

Esto quiere decir que el fluido caliente es enfriado hasta la temperatura de entrada del fluido frío y este es calentado hasta la temperatura de entrada del fluido caliente.

El cambiador de calor que presenta la transferencia térmica reversible en mayor grado, es el más eficiente y transmite así la mayor cantidad de calor posible para una determinada superficie de transferencia.

El cambio de calor a temperatura constante es el caso reversible, de manera que el intercambiador térmico capaz de lograr esto, será el más eficiente desde el punto de vista termodinámico.

Los cambiadores de calor a contracorriente transfieren energía térmica a temperatura constante, ningún otro cambiador se aproxima a este estado, de modo que el intercambiador de contracorriente es el de mayor eficacia o eficiencia.

La diferencia media de temperatura logarítmica proporciona una relación de cierta diferencia de temperatura entre los estados de entrada y salida (ΔT).

Cuando los intercambiadores de calor no son de una configuración geométrica simple, ΔT no es DTML por lo tanto es necesario modificarla mediante un factor de corrección FC, este factor dependerá del tipo de intercambiador que se requiere, y su uso es a través de gráficas, además de que FC sirve de ayuda para seleccionar el intercambiador más indicado para el proceso que se requiera.

INTERCAMBIADORES DE CALOR. CLASIFICACIÓN Y FUNCIONES

Intercambiadores de calor.

Estos son dispositivos que facilitan la transferencia de calor de una corriente de fluido a otra.

Los procesos de producción de energía, refrigeración, calefacción y acondicionamiento de aire, elaboración de alimentos, elaboración de productos químicos, y el funcionamiento de casi todos los vehículos dependen de diversos tipos de intercambiadores de calor.

Los intercambiadores se clasifican normalmente de acuerdo con el arreglo del flujo y el tipo de construcción.

- **Intercambiador de calor de tubos concéntricos.**

Flujo paralelo. Contraflujo.

- **Intercambiador de calor de flujo cruzado.**

Con aletas y ambos fluidos sin mezclar. Sin aletas con un fluido mezclado y el otro sin mezclar.

- **Intercambiador de calor de tubos y coraza.**

Con un paso por la coraza y un paso por los tubos (modo de operación contraflujo cruzado).

- **Intercambiador de calor de tubos y coraza.**

Un paso por la coraza y dos pasos por los tubos. Dos pasos por la coraza y cuatro pasos por los tubos.

- **Cubiertas de intercambiadores de calor compactos.**

Tubo con aletas (tubos planos, aletas de placa continuas). Tubo con aletas (tubos circulares, aletas de placa continuas). Tubos con aletas (tubos circulares, aletas circulares). Aletas de placa (un solo paso). Aletas de placa (multipaso).

- **Intercambiador de calor de lámina de cierre tubular fija.**

Se utilizan con mayor frecuencia que los de cualquier otro tipo. Por lo común, se extienden más allá del casco y sirven como bridas a alas que se sujetan con pernos los cabezales del lado de los tubos. Utiliza una construcción de tipo de empaque ciego y éste no es accesible al mantenimiento o el reemplazo, este tipo de unidad se utiliza para condensadores superficiales de vapor, que funcionan en él vacío.

El cabezal de lado del tubo se puede soldar a la lámina tubular, para cabezales de tipo C y N. Este tipo de construcción es menos costosa que B y M o A y L, y le ofrece de todos modos la ventaja que los tubos se pueden examinar y reemplazar sin tocar las conexiones de tuberías del lado del tubo. No hay limitaciones para el número de pasos del lado de los tubos. Los tubos pueden llenar por completo el casco del intercambiador de calor.

- **Intercambiador de calor de tubo en U;** El haz de tubo consiste en una lámina tubular estacionaria, tubos en U, desviadores o placas de soporte y espaciadores y tirantes apropiados. El haz de tubo se puede retirar del casco del intercambiador. Se proporciona un cabezal de lado del tubo y un casco con cubiertas integrada, que se suelda al casco mismo. Cada tubo tiene libertad para dilatarse o contraerse, sin limitaciones debidas a la posición de los otros tubos. Tiene la ventaja de proporcionar franqueo mínimo entre el límite exterior y interior del casco, para todas las construcciones de haces de tubos

desmontables, reduce el número de juntas. En la construcción para altas presiones, esta característica es muy importante, puesto que reduce tanto el costo inicial como el de mantenimiento.

- **El calentador de succión de tanque;** contiene un haz de tubo en U. Este tipo de diseño se utiliza con frecuencia en tanques de almacenamiento de aire libre, para combustibles pesados, alquitrán, melazas y fluidos similares, cuya viscosidad se debe reducir para permitir el bombeo adecuado. Un extremo del casco del calentador está abierto y el líquido que se calienta pasa por la parte externa de los tubos.
- **Intercambiadores de anillo de cierre hidráulico;** Esta construcción es la menos costosa de los tipos de tubos y haz desmontable. Los fluidos del lado del casco y el lado del tubo se retienen mediante anillos de empaque distintos separados por un anillo de cierre hidráulico y se instalan en la lámina tubular flotante. Este tipo lleva orificio de purga y luego cae al piso, las fugas en los empaques no darán como resultado la mezcla de los dos fluidos al interior del intercambiador. La anchura de la lámina tubular flotante tiene que ser suficientemente grande para dejar margen para los empaques, el anillo de cierre hidráulico y la dilatación diferencial. El espacio entre el franqueo entre el límite del tubo exterior y la parte interior del casco, es ligeramente mayor para los intercambiadores de tubo en U y el de lámina tubular fija. El uso de un faldón de lámina tubular flotante incrementa este espacio de franqueo. Sin el faldón, el franqueo debe dejar un margen para la distorsión de orificio tubular durante el laminado, cerca del borde exterior de la lámina tubular o para la soldadura del extremo del tubo en la lámina tubular flotante.
- **Intercambiador de cabezal flotante exterior;** El fluido del casco se retiene mediante anillos de empaque, que se comprimen dentro de un prensaestopas, mediante un anillo seguidor de junta, esta construcción de haz desmontable acomoda la expansión diferencial entre el casco y los tubos y se utiliza para servicio del lado del casco. No hay limitaciones sobre el número de pasos del lado de los tubos o su presión y su temperatura de diseño, este diseño se utiliza con mayor frecuencia en las plantas químicas. El faldón del casco y el tubo flotante, cuando está en contacto con los anillos del empaque, tiene un acabado fino de maquinado. Se inserta un anillo dividido de corte en una ranura de faldón de la lámina tubular flotante. Una brida de respaldo, deslizante que se mantienen en servicio mediante un anillo de corte, se sujeta con pernos en la cubierta exterior del cabezal flotante. La cubierta del cabezal flotante suele ser un disco circular.
- **Intercambiador de cabezal flotante interno;** El diseño del cabezal flotante interno se utiliza mucho en las refinerías petroleras. El haz de tubo es desmontable y la lámina tubular flotante se desplaza para acomodar diferentes dilataciones entre el casco y los tubos. El límite de tubo exterior se acerca al diámetro interno del empaque en la lámina tubular flotante. El anillo dividido de respaldo y un sistema de pernos retienen, por lo común, la cubierta del cabezal flotante en la lámina tubular flotante. Se sitúan más allá del casco y dentro de la cubierta del casco de diámetro mayor. Está última, el anillo dividido de apoyo y la cubierta del cabezal flotador se deben retirar antes que pueda pasar el haz de tubos por el casco del intercambiador.
- **Intercambiador de cabezal flotante extraíble;** La fabricación es similar al anterior, anillo dividido de respaldo, con la excepción de que la cubierta del cabezal flotador se sujeta directamente con pernos en la lámina tubular flotante. El haz de tubos se puede retirar del casco sin desmontar ni la cubierta ni el casco ni la del cabezal flotador. Esta característica reduce el tiempo de mantenimiento durante la inspección y la reparaciones. Es espacio grande de franqueo entre los tubos y el casco deben dejar un margen tanto para el empaque como para la sujeción con pernos a la cubierta del cabezal flotador. Con frecuencia se utilizan bandas selladoras o tubos falsos para reducir la desviación del haz de tubo.
- **Intercambiador de lámina tubular fija con tubo acodado:** Los tubos se instalan con una ligera curva. La dilatación diferencial afecta la cantidad de acodamiento; pero se eliminan la necesidad de una junta de expansión o una lámina tubular flotante. Las secciones del evaporador se hacen de este

modo y se produce el desescamado al flexionarse los tubos.

- **Intercambiador de tubo de bayoneta;** Este tipo de intercambiador es útil cuando hay una diferencia de temperatura considerable entre los fluidos del lado del casco y el del tubo, puesto que todas las partes sujetas a la dilatación diferencial tienen libertad para moverse independientemente unas de otras. Esta construcción única no sufre fallas debida a la congelación del condensado del vapor, puesto que el vapor en el tubo interno de funcionamiento intermitente. Los costos son relativamente altos, puesto que sólo los tubos de gas exteriores transmiten calor al fluido del lado del casco. Los tubos internos no tienen soportes. Los extremos se apoyan en placas de soporte o desviadores tradicionales.
- **Intercambiadores de tubo en espiral:** Consisten en un grupo de serpientes devanados en espiral, que se conectan en general mediante múltiples. Las características incluyen el flujo a contracorriente, la eliminación de las dificultades provocadas por la dilatación diferencial, un tamaño pequeño y una velocidad constante.
- **Intercambiadores de membrana descendente.** Los intercambiadores de calor de casco y tubo de membrana descendente el fluido entra por la parte superior de los tubos verticales. Los distribuidores o los tubos ranurados ponen el líquido en el flujo de la membrana sobre la superficie de los tubos y la membrana se adhiere a la superficie del tubo, mientras cae al fondo de él. La membrana se puede enfriar, calentar, evaporar o congelar, con el medio apropiado de transferencia de calor fuera de los tubos. Se usan diseños de láminas tubulares fijas, con o sin junta de expansión y de cabezales exteriores empaquetados. Las ventajas, son el índice elevado de transferencia de calor, la falta de caída de presión interna, el tiempo breve de contacto, la facilidad de acceso a los tubos para su limpieza y, en algunos casos, la prevención de las fugas de un lado al otro.
- **Intercambiadores de calor de teflón.** Existen intercambiadores de calor de casco y tubo de teflón con tubos de resina de fluorocarbono de teflón, químicamente inerte. Los tubos mayores se utilizan primordialmente cuando las limitaciones de caída de presión o las partículas reducen la eficiencia de los tubos menores. En general, estos intercambiadores de calor funcionan con caídas más altas de presión que las unidades tradicionales y son más apropiados para fluidos relativamente limpios. Puesto que son químicamente inertes, los tubos tienen muchas aplicaciones en las que otros materiales se corroen. Los intercambiadores de calor son de paso simple, con diseño de flujo a contracorriente y haces de tubos desmontables. Los haces de tubos se componen de tubos rectos y flexibles de teflón, unidos unos a otros en láminas tubulares integrados en forma de panal. Los tubos individuales se separan mediante bandas de teflón a las que se sueldan. Los haces se sellan dentro de los cascos mediante anillos en O y se pueden desmontar con facilidad del casco.
- **Intercambiadores de tuberías dobles.** Se utilizaron por muchos años, sobre todo para índices de flujos bajos y gamas de temperaturas elevadas. Esas secciones de tuberías dobles están bien adaptadas para aplicaciones a altas temperaturas y presiones elevadas, debido a sus diámetros relativamente pequeños que permiten el empleo de bridas pequeñas y secciones delgadas de paredes, en comparación con los equipos ordinarios de casco y tubo.

GENERADORES DE VAPOR (CALDERAS)

Los generadores de vapor conocidos comúnmente en la terminología industrial como calderas es un recipiente cerrado en el cual se calienta agua, se genera vapor o se sobrecalienta (o cualquier combinación de las dos cosas) bajo presión o vacío mediante la aplicación de calor de combustibles, electricidad o energía nuclear. Las calderas se dividen generalmente en cuatro tipos clásicos: residencial, comercial, industrial y para generación de energía eléctrica.

CLASIFICACION INDUSTRIAL.

Se suelen clasificar como de tubos de humo (Pirotubular) o tubos de agua (Acuatubular).

* Calderas de Tubos de Humo (Pirotubular)

En este tipo, el calor es transferido por la planta y los productos de combustión que pasan a través de tubos. El agua calentada rodea el hogar interno y los haces de tubos.

TIPOS DE CALDERAS PIROTUBULARES

Estos se diferencia entre sí por el diseño del hogar.

- El primer tipo se caracteriza por estar compuesta por un hogar de forma cilíndrica, el calor es generado por combustibles derivado del petróleo, (*figura 1*).
- Calderas con cajas de humo permiten el quemado del combustible sólidos por que están dotadas de un espacio horizontal para los procesos de combustión quemando una corriente vertical de la plancha o de los productos de combustión, (*figura 2*).
- Caldera tubular con retorno horizontal, en esta unidad los productos de combustión viajan a través del casco y retroceden a través de los tubos dentro del recipiente a presión, (*figura 3*).

* Calderas de Tubos de Agua (Acuatubular)

Agua circulando por los tubos como su nombre lo indica, los productos de combustión rodean usualmente a los tubos y el agua está en el interior de ellos, los tubos se inclinan hacia un recipiente o domo en el punto más alto de la caldera. Algunos fabricantes operan este tipo de unidad con tubos rectos o tubos doblados.

Es una caldera de tubos de agua con cabezal de cajón, los tubos de agua están conectados a cabezales rectangulares dispuestos de modo que la mezcla de agua y vapor en circulación suban hacia un domo colector. Los cabezales de cajón están usualmente en cualquier extremo de los haces de tubos, y los productos de combustión pasan entre cabezales y alrededor de los haces de tubos.

Algunas son de tipo de domo largo, esto es, cuando se mira al frente de la caldera, el domo tiene la longitud de la caldera. Su consecuencia lógica es la caldera de domo atravesado. Cuando se contempla desde el frente de la unidad, los domos están instalados perpendicularmente a la larga línea central o a través de la caldera, (*figura 4 Caldera comercial, figura 5 tubos acostados y figura 6 domo largo*).

PRODUCCIÓN ESTIMADA DE VAPOR DE UNA CALDERA PIRITUBULAR Y ACUATUBULAR

Las unidades de tubo de humo (Pirotubular) se suministran casi siempre de aplicaciones hasta de aproximadamente 30.000 Lb. = 2.100 Kg de vapor de agua por hora. Se suministra para operar a baja presión 15 PSIG = 104 KPa y menos, y como caldera de potencia hasta aproximadamente 300 PSIG = 2.100 KPa de presión de vapor. Las calderas de tubos de agua (acuatubulares) para utilizarse en aplicaciones industriales se proporcionan capacidades hasta casi de un millón de libras 1.000.000 Lb. = 450.000 Kg de vapor por hora. Las presiones de diseño varían desde 100 PSIG = 700 KPa hasta 1.200 o 1.400 PSIG = 8,3 ó 9,6 MPa con temperaturas de vapor que varían desde la saturación hasta 1.000 °F = 540 °C.

Las calderas del mercado industrial se han planeado para quemar una amplia variedad de combustible y operar hasta presiones de 12,4 MPa y velocidades de vaporización hasta de 455.000 Kg/h. Se han ensamblado calderas de alta capacidad para operar en el intervalo de 4.500 Kg/h hasta aproximadamente 250.000 Kg/h.

Estas unidades se diseñan para trabajar a presiones hasta 11.1 MPa y temperaturas de 783 K (950 °F). Aunque las calderas se diseñan para trabajar con combustibles gaseosos o líquidos, se tienen diseños para quemar carbón pulverizado. El incremento significativo en el costo de los combustibles y la creciente confianza en el carbón, han sido el motor que impulsa hacia el empleo de calderas de alta capacidad erigidos en los campos que trabajan a altas presiones y proporcionan sobrecalentamiento y posible recalentamiento.

GENERACION DE VAPOR.

En cualquier sistema de generación de vapor es de vital importancia el Agua a utilizar y el tratamiento que se le debe dar, para así lograr la vida normal de la caldera y de los equipos que utilizan la energía creada por esta.

Agua es el compuesto más abundante y más ampliamente extendido. En estado sólido, en forma de hielo o nieve, cubre las regiones más frías de la tierra, en estado líquido, lagos, ríos, y océanos, cubre las tres cuartas partes de la superficie terrestre. Está presente en el aire en forma de vapor de agua. Hay agua en toda materia viva, constituyendo el 65% del cuerpo humano. Todos los alimentos contienen agua. Debido a su gran abundancia y a que temperaturas convenientes, puedes ser convertida en vapor, resulta un medio ideal para la generación de la fuerza.

CONSTITUYENTES DEL AGUA

El agua es el fluido de trabajo de los sistemas de vapor y una de las sustancias naturales más abundantes; sin embargo, nunca se encuentra en estado puro, adecuado para la alimentación directa de una caldera. Por lo común en estado natural, el agua se encuentra turbia, con materias sólidas en suspensión fina. Incluso cuando está clara, el agua natural contiene soluciones de sales y ácidos que dañan con rapidez el acero y los metales a base de cobre de los sistemas de vapor.

El reciclaje del condensado de vapor procedente del calentamiento de procesos es conveniente para aprovechar el condensado relativamente puro. Debido a la disipación atmosféricas y a la contaminación por los equipos de procesamiento, se requiere casi siempre una cantidad adicional de materia prima.

Los diversos constituyentes de las aguas se pueden clasificar según las dificultades que causa su presencia.

- Sustancias corrosivas.
- Sustancias Incrustantes.
- Sustancias productoras de espuma.

LIMITES RECOMENDADOS PARA LOS CONSTITUYENTES DEL AGUA QUE SE USAN EN CALDERAS

0-300	3500	700	0	100-60	175	7	140
301-450	3000	600	0	60-45	150	7	120
451-600	2500	500	0	45-35	125	7	100
601-750	2000	400	0	35-25	100	7	80
751-900	1500	300	0	25-15	75	7	