

GESTICAL

Gestión y Asesoramiento en la Calidad Industrial

CIF: G-39.486.360

C/ José M^º Pereda, N^º 5, Entlo. Centro
39200 - REINOSA - Cantabria
Tfno.- 942 75 46 29
Fax.- 942 75 35 88
Tfnos. Móviles - 620 86 66 00 / 696 54 38 40
rafaeldeandres@gestical.com
manueldiez@gestical.com
info@gestical.com

**REFRIGERACIÓN EN MOTORES Y
GENERADORES ELÉCTRICOS:**

**INTERCAMBIADORES
DE CALOR AIRE-AIRE**

Persona de contacto:

Rafael de Andrés Seco

C/ José M^º Pereda, N^º 5, Entlo. Centro

39200 - REINOSA - Cantabria

Tfno.- 942 75 46 29

Fax.- 942 75 35 88

Tfno. Móvil - 620 86 66 00

rafaeldeandres@gestical.com

info@gestical.com

INTERCAMBIO DE CALOR EN LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS

En las máquinas eléctricas, una pequeña parte de la potencia absorbida no se convierte en potencia útil, sino que se disipa en la máquina: en los *conductores* (pérdidas eléctricas por efecto Joule), en el *hierro* (por corrientes de Foucault generadas en los núcleos magnéticos) y *mecánicas* (por los diferentes rozamientos mecánicos de las partes móviles de la máquina). La energía perdida lo es en forma de calor y en consecuencia se produce una elevación de la temperatura de las partes de la máquina donde se localizan las pérdidas. Si la máquina está en marcha durante un tiempo suficientemente largo y en condiciones de funcionamiento constante, se habrá alcanzado un estado de equilibrio en el que el calor producido por toda clase de pérdidas deberá ser igual al calor evacuado al exterior a través de los procesos físicos de conducción, convección y radiación.

Con objeto de poder hacer un análisis cualitativo del calentamiento y refrigeración de una máquina eléctrica, se considera ésta como un cuerpo homogéneo, con una temperatura uniforme en toda su masa y una difusión de calor también uniforme en toda la superficie. Una vez alcanzado el equilibrio térmico en una máquina, si se aumenta el coeficiente total de transmisión de calor se puede aumentar el calor disipado. Como la potencia nominal de una máquina viene limitada por la temperatura máxima de sus aislamientos, mejorando las condiciones de ventilación y de refrigeración de la máquina se puede aumentar su potencia útil. Conforme aumenta la potencia de las máquinas eléctricas, se requieren sistemas de ventilación y de refrigeración más complejos, lo que encarece su coste, por lo que habrá que calcular la solución económica óptima en cada caso.

Mediante la realización de ensayos de calentamiento y de enfriamiento de las máquinas eléctricas, se pueden determinar experimentalmente los valores de temperatura-tiempo y en consecuencia conocer las curvas exponenciales correspondientes. Normalmente estos ensayos se realizan midiendo la temperatura en los arrollamientos o bobinados y en otras partes de las máquinas. En la Figura 1 se representan los gráficos típicos del ensayo de calentamiento y de enfriamiento de una máquina eléctrica.

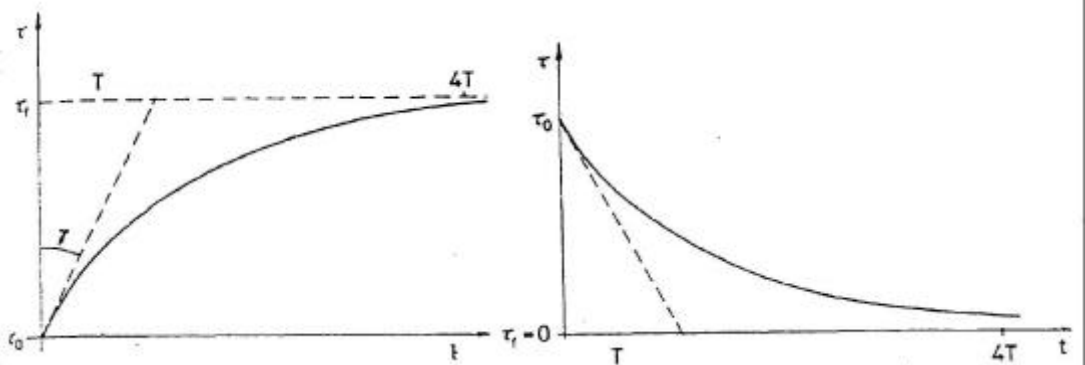


Figura 1 - Gráficos de calentamiento y de enfriamiento

REFRIGERACIÓN EN LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS

El esquema de refrigeración más simple en las máquinas eléctricas rotativas es el realizado por aire, ya sea circulando por su interior o por su exterior. El calor disipado se transmite mediante un flujo térmico del conductor a las chapas a través de los aislantes, y de las chapas al aire que circula por su superficie o bien a través de la carcasa de la máquina. Funcionando en régimen permanente y una vez se haya establecido el equilibrio térmico, habrá un gradiente térmico entre los diferentes componentes de la máquina, de forma que las partes más calientes deberán limitar su temperatura a un valor admisible por los aislantes.

El uso de métodos sofisticados de refrigeración está en relación con la potencia de la máquina, de forma que se justifique una mayor inversión en su sistema de enfriamiento por imposibilidad técnica de utilizar métodos de refrigeración más elementales. El sistema de refrigeración utilizado en una máquina dependerá también de su *grado de protección*, y así las máquinas con grado IP44 (cerradas) y a partir de una cierta potencia requerirán un ciclo cerrado de refrigeración interior con intercambios de calor con el medio refrigerante exterior.

SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN POR CIRCUITO CERRADO

En el sistema de refrigeración por **circuito cerrado**, el calor producido en la máquina se transmite a un refrigerante externo mediante un *intercambiador de calor*, disponiéndose de dos circuitos de refrigeración separados entre sí:

- **Primario.** Constituido por el fluido que está en contacto con las partes internas de la máquina y que transporta el calor hacia el intercambiador en circuito cerrado.
- **Secundario.** Constituido por el fluido exterior que circula por el intercambiador de calor y que enfría el fluido del circuito primario.

Este sistema de refrigeración se utiliza en máquinas suficientemente grandes, como máquinas asíncronas (de 1.000 Kw en adelante), máquinas de corriente continua grandes (más de 500 Kw) y en alternadores. Generalmente como fluido del circuito primario se emplea el aire, y para el secundario el aire o el agua. En el primer caso se trata de refrigeración con un intercambiador de calor *aire-aire*, y en el segundo con un intercambiador *aire-agua*.

Los intercambiadores de calor deben poseer un coeficiente de transmisión de calor adecuado y una superficie útil lo más grande posible para que la evacuación de calor sea efectiva, procurando una convección forzada suficiente y así facilitar la emisión de calor al exterior. Cuanto más baja se mantenga la temperatura del lado caliente, menores temperaturas se obtendrán en el lado frío.

NORMAS DE LOS SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN: INTERCAMBIADOR DE CALOR AIRE-AIRE

Al igual que existen códigos para definir los grados de protección de las máquinas eléctricas, también se designan según normas los sistemas de refrigeración empleados. En concreto la norma UNE-EN 60034-6 de abril de 1997 determina los códigos IC para los *métodos de refrigeración* de las máquinas eléctricas rotativas, que adopta de la norma internacional CEI 34-6:1991, anulando y sustituyendo a la anterior norma UNE 20-125 de octubre de 1974.

Consideremos un sistema cuyo refrigerante primario se hace circular en circuito cerrado y cede su calor a través de un intercambiador de calor aire-aire, que va montado directamente en la máquina eléctrica, al refrigerante secundario que es el medio circundante (aire). Además ambos refrigerantes circulan en función de la velocidad de giro de la máquina, mediante sendos ventiladores montados sobre el rotor (circulación propia). Este caso, representado en la Figura 2, corresponde según la norma UNE-EN 60034 al siguiente código: IC6A1A1, o bien de manera simplificada al IC611. Según la norma antigua UNE 20-125, el código sería IC0161.

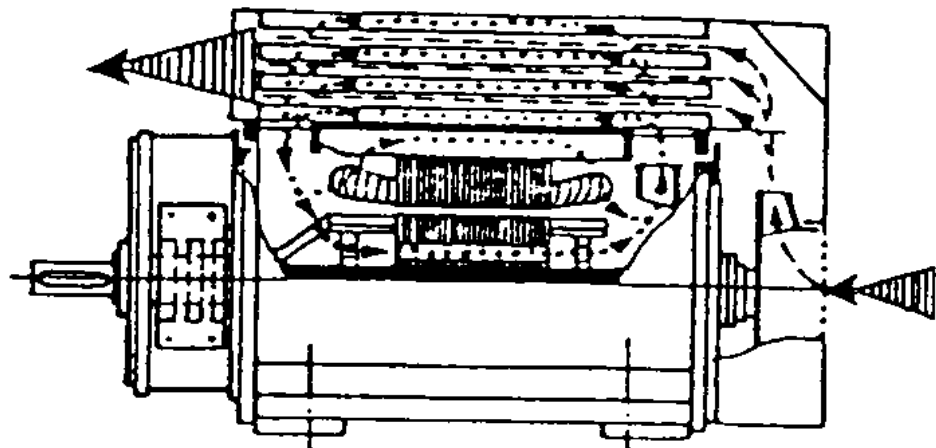


Figura 2 - Sistema de refrigeración con intercambiador aire-aire

PROBLEMAS EN LA INDUSTRIA PARA DETERMINAR LA TRANSMISIÓN DE CALOR

El problema que suele encontrarse en las aplicaciones industriales de transmisión de calor no es determinar el coeficiente total de transmisión de calor a , sino aplicar valores experimentales de a para obtener la superficie necesaria de transferencia de calor A_i . Así, entre dos puntos en el proceso puede requerirse aumentar la temperatura de cierto flujo de fluido dado de t_1 a t_2 , mientras que otro fluido se enfría de T_1 a T_2 .

La cuestión en los problemas industriales es determinar cuánta superficie de transferencia de calor es necesaria para llevar a efecto estas condiciones de proceso. La clave está en que tanto a como A_i son parámetros desconocidos, a menos que se hayan establecido por experimentos anteriores para idénticas condiciones.

INTERCAMBIADORES DE CALOR DE TUBO Y CORAZA

Cuando se requieren grandes superficies de transferencia de calor, para satisfacer las demandas industriales, aquéllas pueden ser obtenidas más eficientemente por medio de intercambiadores de calor de tubo y coraza. El tipo de intercambiador de tubo y coraza más simple es el intercambiador de cabezal fijo, también llamado de cabezal de tubo estacionario, tal como se muestra en la Figura 3.

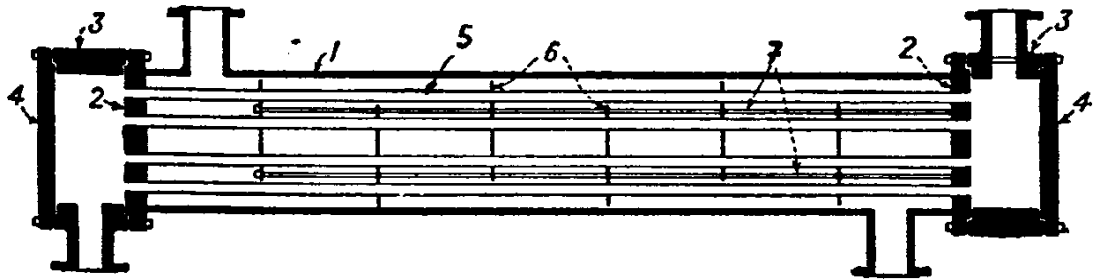


Figura 3 - Intercambiador tubular de cabezal fijo

Sus partes esenciales son: *coraza* (1), equipada con dos entradas, que contiene dos cabezales de tubos o *espejos* (2) a ambos lados, los cuáles también sirven como bridas para fijar sendos *carretes* (3) y sus respectivas *tapas* (4). Los *tubos* (5) se fijan en ambos cabezales, estando equipados con *deflectores transversales* (6) en el lado de la coraza que se mantienen firmemente sujetos mediante *espaciadores* (7). El cálculo de la superficie efectiva de transferencia de calor se basa frecuentemente en la distancia entre las caras interiores de los cabezales, en lugar de considerarse la longitud total de los tubos.

LOS TUBOS

Los tubos para los intercambiadores, según los casos, pueden fabricarse en diversos tipos de materiales, como acero, cobre, latón, cobre-níquel, aluminio, aluminio-bronce, aceros inoxidables, etc. El diámetro exterior de los tubos se obtiene dentro de tolerancias dimensionales muy estrictas, con groesos de pared determinados.

En cuanto al espaciado de los tubos, los orificios correspondientes no pueden situarse muy cerca entre sí, ya que ello debilitaría estructuralmente cada cabezal de tubos o espejo. La distancia más corta entre dos orificios adyacentes se denomina *claro*, y la distancia de centro a centro en tubos adyacentes es el *espaciado de los tubos*, estando ambas dimensiones casi siempre normalizadas.

La disposición de los tubos puede ser *triangular* o *en cuadro*, y sus variedades se muestran en la Figura 4.

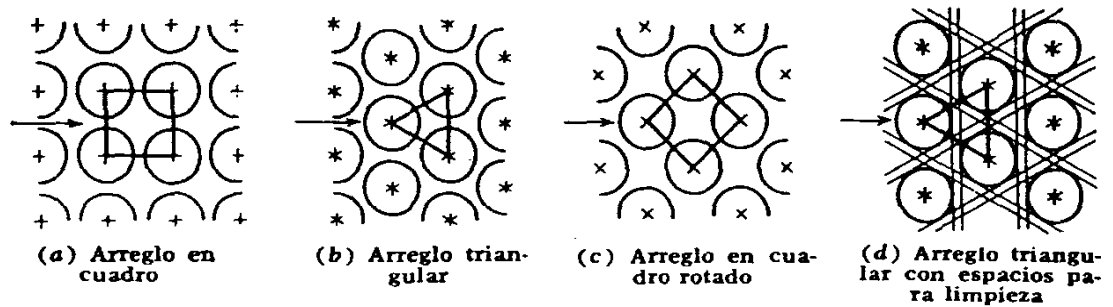


Figura 4 - Disposiciones comunes para los tubos de intercambiadores

La ventaja del espaciado cuadrado consiste en que los tubos resultan accesibles para la limpieza externa y que tienen una baja caída de presión cuando el fluido fluye en la dirección indicada en la Figura 4 (a). En cambio en la disposición triangular se produce mayor turbulencia, debido a que el fluido que circula entre los tubos adyacentes a alta velocidad golpea directamente en la hilera siguiente.

Esto supone que cuando la caída de presión y la limpieza son aspectos de menores consecuencias, la disposición triangular es mejor para alcanzar valores altos del coeficiente de transmisión de calor en el lado de la coraza (fuera del haz de tubos), consiguiéndose así coeficientes en torno al 25 % mayores que con la disposición en cuadro bajo condiciones similares.

LAS CORAZAS

Las corazas de los intercambiadores se fabrican de tubo de acero, con un espesor normalizado y determinado según el diámetro de la coraza y la presión de trabajo correspondiente.

LOS DEFLECTORES

Es claro que se logran coeficientes de transmisión de calor más altos cuando el fluido se mantiene en estado de turbulencia. Para inducir turbulencia fuera del espacio de los tubos, es habitual emplear deflectores que hacen que el fluido circule a través de la coraza a ángulos rectos con el eje de los tubos. Esto causa considerable turbulencia aun cuando por la coraza fluya un caudal pequeño de fluido.

La distancia de centro a centro entre dos deflectores consecutivos se denomina *espaciado de deflectores*, y esta dimensión se determina en función de variables como la masa-velocidad del fluido y el diámetro de la coraza. Hay varios tipos de deflectores que se emplean en los intercambiadores de calor, siendo los más comunes los *deflectores segmentados* que se muestran en la Figura 5.

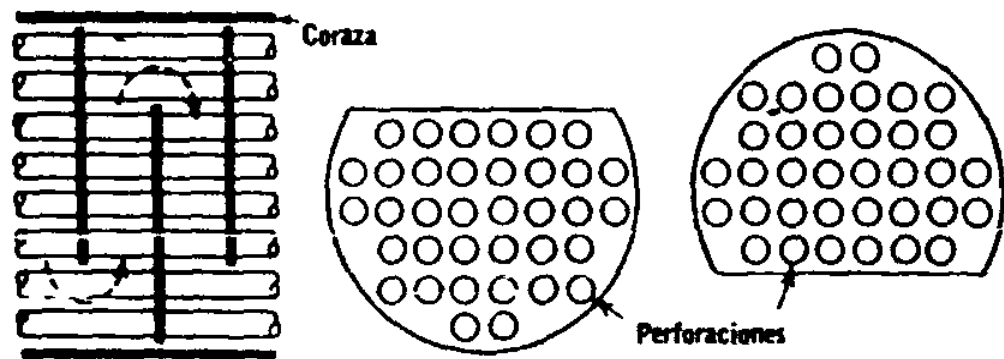


Figura 5 - Detalle de deflector segmentado

MODELOS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR DE TUBO Y CORAZA

Además del intercambiador de cabezal fijo mostrado en la Figura 3, existen otros tipos de intercambiadores de calor de tubo y coraza, estando algunos de ellos representados en la Figura 6.

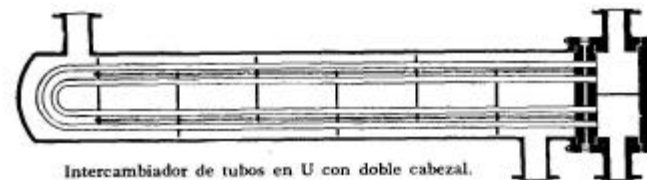
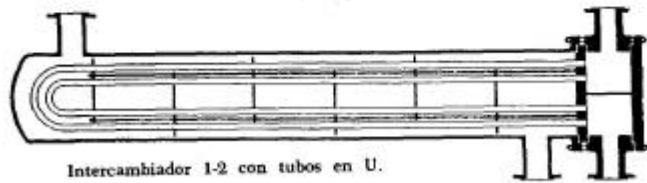
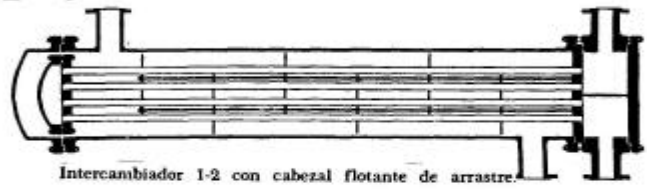
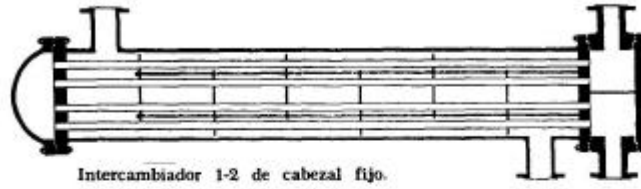
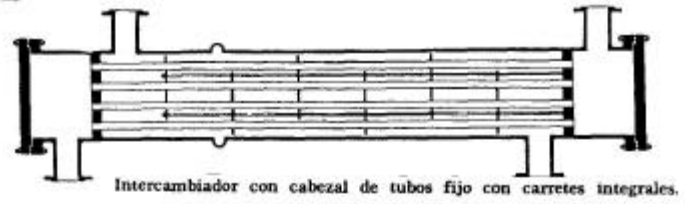


Figura 6 - Modelos de intercambiadores de calor de tubo y coraza

BALANCE DE CALOR Y EFICIENCIA DE LOS INTERCAMBIADORES

Como en un sistema térmico la cantidad de calor perdida por el fluido caliente es igual a la absorbida por el fluido frío, el *balance total de calor* en un intercambiador será:

$$Q = W.C.(T_1 - T_2) = w.c.(t_2 - t_1)$$

- Q = Flujo de calor (Kcal/h)
- W = Masa de fluido caliente en circulación (Kg/h)
- w = Masa de fluido frío en circulación (Kg/h)
- C = Calor específico del fluido caliente (Kcal/Kg.°C)
- c = Calor específico del fluido frío (Kcal/Kg.°C)
- T_1 = Temperatura de entrada del fluido caliente (°C)
- T_2 = Temperatura de salida del fluido caliente (°C)
- t_1 = Temperatura de entrada del fluido frío (°C)
- t_2 = Temperatura de salida del fluido frío (°C)

Las relaciones de temperatura en un intercambiador de tubo y coraza están representadas en la Figura 7.

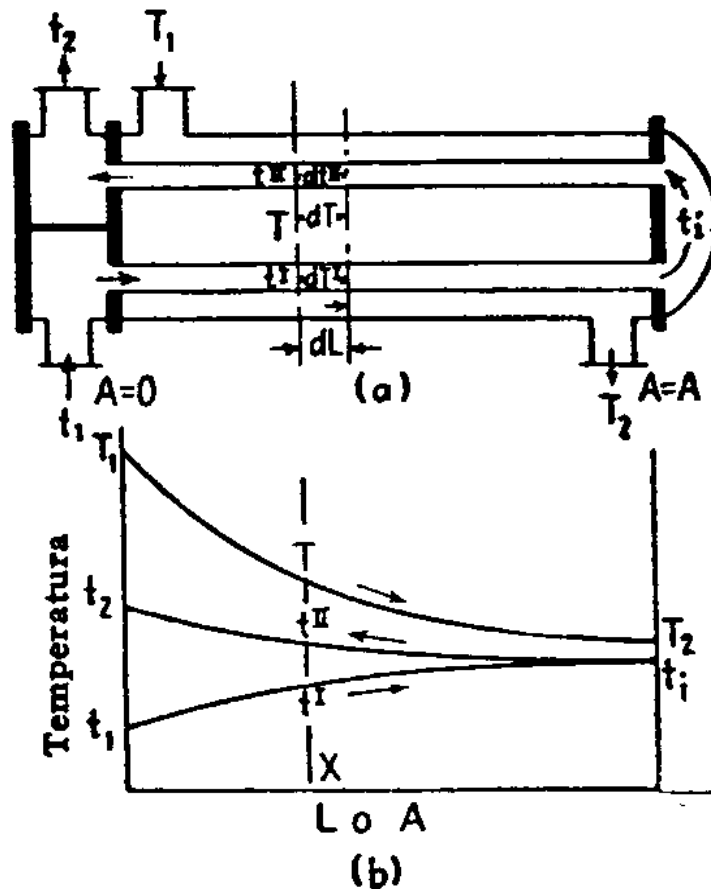


Figura 7 - Relaciones de temperatura en un intercambiador de calor de tubo y coraza

En el diseño de muchos tipos de intercambiadores, con frecuencia es deseable establecer una norma de máximo rendimiento. La *eficiencia* de un intercambiador está determinada por su *rendimiento*, y se define como la razón de la cantidad de calor intercambiado entre dos fluidos respecto a la máxima que puede ser intercambiada.

MANTENIMIENTO Y LIMPIEZA DE LOS INTERCAMBIADORES

Los intercambiadores de calor aire-aire no requieren prácticamente mantenimiento, aunque sí se precisa una limpieza periódica de los tubos, sobre todo si el aire ambiental donde trabaja la máquina eléctrica no es limpio. Una gran suciedad en los tubos puede reducir la eficiencia del intercambio de calor, por lo que es recomendable su control y limpieza cuando sea necesario, antes que las acumulaciones lleguen a formar capas en el interior de los tubos.

Las incrustaciones se pueden eliminar por procedimientos *mecánicos* o *químicos*, pero por riesgos de corrosión es preferible una limpieza mecánica cuidadosa. Se recomienda usar un cepillo tubular de nylon, montado sobre una baqueta, que se pasa por el interior de los tubos. También se admite la limpieza con aire comprimido, agua a presión o disolventes no corrosivos.