

T1.- Transmisión de Calor

Las transparencias son el material de apoyo del profesor para impartir la clase. No son apuntes de la asignatura. Al alumno le pueden servir como guía para recopilar información (libros, ...) y elaborar sus propios apuntes

Departamento: Ingeniería Eléctrica y Energética
Area: Máquinas y Motores Térmicos

CARLOS J RENEDO renedoc@unican.es
Despachos: ETSN 236 / ETSIIT S-3 28
<http://personales.unican.es/renedoc/index.htm>
Tlfn: ETSN 942 20 13 44 / ETSIIT 942 20 13 82

1

- 1.- Introducción
- 2.- Conducción
- 3.- Convección
- 4.- Radiación
- 5.- Mecanismos combinados
- 6.- Coeficiente global de transmisión de calor
- 7.- Resistencia de contacto y factor de suciedad
- 8.- Aislantes
- 9.- Intercambiadores de calor

1.- Introducción

Para la transmisión de calor es necesario diferencia de T, transmitiéndose el calor de los cuerpos de mayor T a los de menor

Mecanismos de transmisión de calor:

- **Conducción**, en el interior de los cuerpos
- **Convección**, entre sólidos y fluidos
- **Radiación**, a través de un fluido, o el vacío
- **Psicrometría**, con aporte de humedad

2.- Conducción (I)

Interior de los sólidos

Conductividad térmica, λ (W / m °C), (tablas)
es función de la temperatura del material

Cobre	λ (W / m °C)
200 K	413
273 K	401
400 K	392

Material	λ (W / m °C)	Material	λ (W / m °C)
Aluminio	204	Corcho	0,04
Cartón	0,14-0,35	Granito	3
Cemento	1	Hormigón (seco)	0,128
Cobre	386	Ladrillo	0,3-5

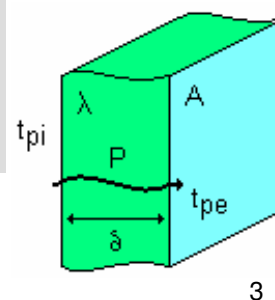
Conductores ($\lambda \uparrow$)
Aislantes térmicos ($\lambda \downarrow$)

Casos típicos (I)

1.- Para una pared de conductividad térmica λ

La resistencia de conducción de la pared $R_k = \delta / \lambda A$

$$P = \lambda \frac{A}{\delta} (t_{pi} - t_{pe}) = \frac{(t_{pi} - t_{pe})}{\frac{\delta}{\lambda A}} = \frac{(t_{pi} - t_{pe})}{R_k}$$



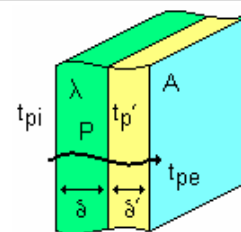
2.- Conducción (II)

Casos típicos (II)

2.- Para una pared plana recubierta de un aislante de conductividad λ'

$$P = \lambda \frac{A}{\delta} (t_{pi} - t_{p'}) = \lambda' \frac{A}{\delta'} (t_{p'} - t_{pe}) = \frac{(t_{pi} - t_{p'})}{\frac{\delta}{\lambda A}} = \frac{(t_{p'} - t_{pe})}{\frac{\delta'}{\lambda' A}}$$

$$= \frac{(t_{pi} - t_{p'})}{R_k} = \frac{(t_{p'} - t_{pe})}{R_{k'}} = \frac{(t_{pi} - t_{pe})}{\frac{\delta}{\lambda A} + \frac{\delta'}{\lambda' A}} = \frac{(t_{pi} - t_{pe})}{R_k + R_{k'}}$$

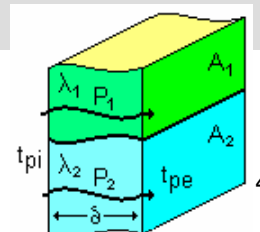


3.- Para dos paredes en paralelo de áreas A_1 y A_2 de material diferente, de igual espesor, δ , cada una de ellas con conductividad térmica, λ_1 , λ_2

Siendo R_k la resistencia térmica equivalente de las dos paredes

$$P = P_1 + P_2 = \frac{t_{pi} - t_{pe}}{R_{k1}} + \frac{t_{pi} - t_{pe}}{R_{k2}} = \frac{t_{pi} - t_{pe}}{R_k};$$

$$\frac{1}{R_k} = \frac{1}{R_{k1}} + \frac{1}{R_{k2}}$$



2.- Conducción (III)

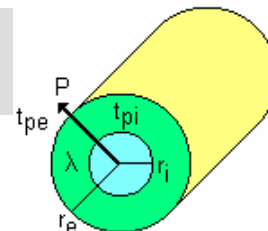
Casos típicos (III)

4.- Para una tubería cilíndrica de conductividad térmica λ

La resistencia de conducción del tubo

$$R_{kTubo} = \frac{\ln(r_e / r_i)}{2\pi\lambda L};$$

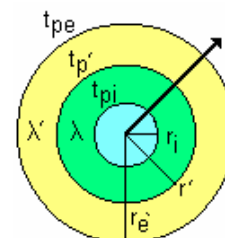
$$P = 2\pi\lambda L \frac{t_{pi} - t_{pe}}{\ln(r_e / r_i)} = \frac{t_{pi} - t_{pe}}{\frac{\ln(r_e / r_i)}{2\pi\lambda L}} = \frac{t_{pi} - t_{pe}}{R_k};$$



5.- Tubería cilíndrica rodeada de una vaina aislante de conductividad λ' ,

$$P = 2\pi\lambda L \frac{t_{pi} - t_{p'}}{\ln(r' / r_i)} = 2\pi\lambda' L \frac{t_{p'} - t_{pe}}{\ln(r_e / r')} = \frac{t_{pi} - t_{pe}}{\frac{\ln(r_e / r_i)}{2\pi\lambda L}} =$$

$$= \frac{t_{p'} - t_{pe}}{\frac{\ln(r_e / r_i)}{2\pi\lambda' L}} = \frac{t_{pi} - t_{p'}}{R_k} = \frac{t_{p'} - t_{pe}}{R_{k'}} = \frac{t_{pi} - t_{pe}}{R_k + R_{k'}};$$



5

3.- Convección (I)

Entre **sólidos y fluidos**

Coeficiente de transmisión de calor sólido-fluido o coeficiente de convección, α (W / m² °C); es variable con geometría del sólido, la orientación, la naturaleza del fluido y del tipo de convección

Existen dos tipos de convección:

- Forzada;** el fluido en movimiento, una bomba, un ventilador, viento, corriente de agua, etc; α *elevado*
- Natural,** el fluido está en reposo, α *bajo*

Dos tipos de fluidos:

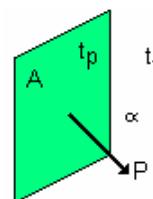
- Gases** tienen un *bajo* α
- Líquidos** poseen un α *elevado*
- Evaporaciones y condensaciones,** α *más elevado*

6

3.- Convección (II)

La transmisión de calor para una pared o una tubería rodeada por un fluido

$$P = A \alpha (t_p - t_f) = \frac{t_p - t_f}{\frac{1}{A \alpha}} = \frac{t_p - t_f}{R_c};$$



Pudiéndose expresar el calor transmitido en función de la resistencia de convección (R_c) entre el sólido y el fluido:

$$R_c = \frac{1}{A \alpha};$$

Entre una superficie y un fluido, **para aumentar la transmisión de calor**

- Pasar de conv. natural a forzada, incrementando el coeficiente α
- Si el fluido es **gas**, se colocan **aletas**



3.- Convección (III)

Dificultad en calcular α , para ello existe formulación de carácter experimental.

Correlaciones de ASHRAE convección natural aire:

Superficies cilíndricas de diámetro exterior D
(Si $D < 0,1$ m se toma $D = 0,1$ m)

$$\begin{cases} \text{Posición vertical: } \alpha = 1,42 \left[\frac{\Delta t}{D} \right]^{0,25} \\ \text{Posición horizontal: } \alpha = 1,32 \left[\frac{\Delta t}{D} \right]^{0,25} \end{cases}$$

¿Unidades?

Superficies planas;
(Si L ó $H < 0,1$ m se toma L ó $H = 0,1$ m)

$$\begin{cases} \text{Vert, altura } H: \alpha = 1,42 \left[\frac{\Delta t}{H} \right]^{0,25} \\ \text{Hor. anchura } L: \begin{cases} \text{Calor hacia abajo: } \alpha = 0,59 \left[\frac{\Delta t}{L} \right]^{0,25} \\ \text{Calor hacia arriba: } \alpha = 1,32 \left[\frac{\Delta t}{L} \right]^{0,25} \end{cases} \end{cases}$$

4.- Radiación (I)

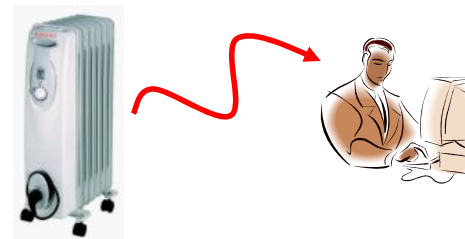
Transmisión de calor incluso en el vacío

La cantidad de calor que abandona un cuerpo:

$$P_{\text{emitido por 1}} = \sigma \varepsilon A t_1^4$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ (W / m}^2\text{K}^4\text{)}$$

ε emisividad superficial, depende del color



- Cuerpo negro:** radiador perfecto, $\varepsilon = 1$
- Cuerpo gris,** $0 < \varepsilon < 1$

Material	Acero oxidado	Acero inox. oxidado	Aluminio oxidado	Plomo áspero	Agua	Hielo	Nieve
Emisividad	0,05	0,55	0,26	0,43	0,95	0,97	0,88
Material	Acero pulido	Acero inox. pulido	Aluminio pulido	Plomo pulido	Ladrillo	Tierra	Madera
Emisividad	0,11	0,23	0,05	0,07	0,94	0,9	0,92

9

4.- Radiación (II)

La energía recibida puede ser:

- Absorbida (α), en equilibrio es igual a ε
- Reflejada (ρ_R)
- Transmitida (ζ), [en los cuerpos opacos es nula]

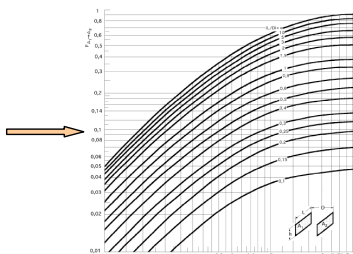
$$\alpha + \rho_R + \tau = 1$$

Factor de forma F marca la posición relativa de los cuerpos

$$P_{\text{emitido por 1 einterceptado por 2}} = \sigma A_1 F_{1-2} (t_1^4 - t_2^4)$$

F_{1-2} engloba ε_1 , ε_2 , y la forma geométrica y su posición de los cuerpos

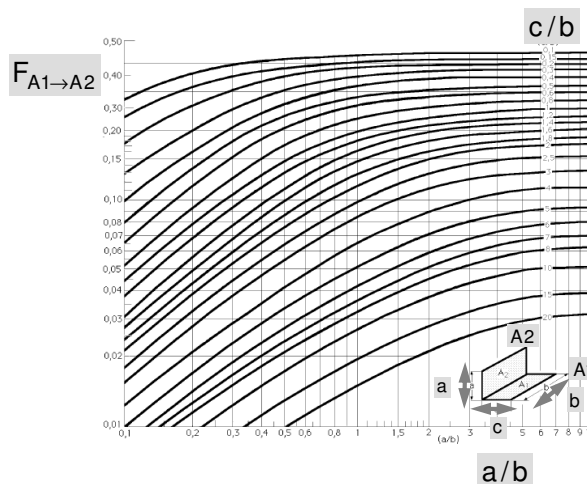
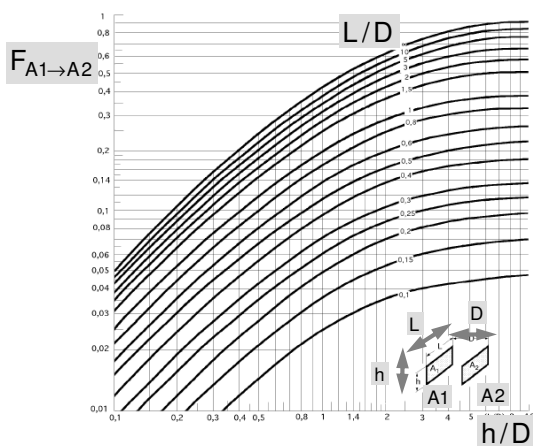
F_{1-2} en gráficos



10

4.- Radiación (III)

F_{1-2} en gráficos en función de la geometría de las superficies



11

4.- Radiación (IV)

$F_{A1 \rightarrow A2}$ en el interior de locales (20 a 30 m², 2,5 a 3 m de altura)

Techo-Suelo $\approx 0,4$

Techo-Pared $\approx 0,15$

La radiación tiene gran importancia a altas temperaturas (T en K)

Pero una persona genera 100 W, y es afectada por poco calor radiante

En el interior de edificios tiene la misma magnitud que la convección (natural)

Coeficiente superficial de radiación (α_r)

De esta forma: $P_{1a2} = \alpha_r \varepsilon A_1 (t_1 - t_2)$

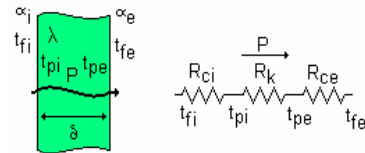
5.- Mecanismos combinados de transmisión de calor

Normalmente existe una combinación de conducción, convección y radiación

Alguno de los mecanismos puede ser despreciable

Para una pared plana que separa dos fluidos (radiación despreciable).

$$P = \frac{t_{fi} - t_{pi}}{R_{ci}} = \frac{t_{pi} - t_{pe}}{R_k} = \frac{t_{fi} - t_{fe}}{R_{ce}} = \frac{t_{fi} - t_{fe}}{R_{ci} + R_k + R_{ce}};$$



Para aire acondicionado los efectos de la **convección** y los de la **radiación** de forma conjunta, la norma ISO

Para tuberías horizontales ($0,25 < D < 1$ m): $\alpha = A + 0,05 \Delta t$

¿Unidades?

Para tuberías y paredes verticales: $\alpha = B + 0,09 \Delta t$

Superficie	A	B
Aluminio brillante	2,5	2,7
Acero galvanizado sucio	5,3	5,5

6.- Coeficiente global de transmisión de calor

Normalmente existe una combinación de conducción, convección y radiación

El coeficiente global de transmisión de calor, K , es el inverso de la suma de resistencias térmicas considerando un área de transmisión unidad:

$$K = \frac{1}{\sum R}$$

R engloba todas las resistencias térmicas existentes.(series y paralelo)

Cuando se trata de un tubo, hay que hacer referencia si K está referido al área interior (K_i) o al área exterior del tubo (K_e)

El calor transmitido queda en forma más simplificada:

$$P = K A \Delta t$$

Se puede hablar de la K de un edificio (los cerramientos ponderados por su área)

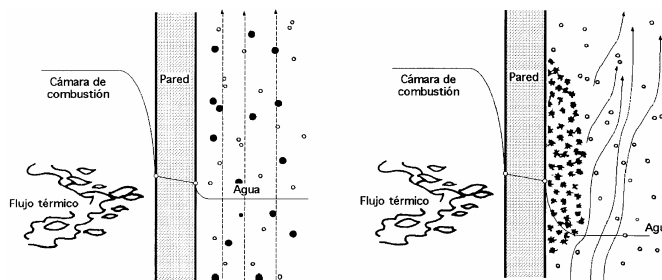
7.- Resistencia de contacto y factor se suciedad

Dificulta la transmisión de calor

La **resistencia de contacto** es por la mala unión de dos superficies sólidas

Con el tiempo se deposita **suciedad (incrustaciones)** sobre las superficies, esto es un aislante térmico y dificulta la transferencia de calor

Su valor se determina con ensayos



Hay que minimizar y eliminar las causas (filtración y tratamiento del agua)

La oxidación y la **corrosión** son un problema que hay que evitar eliminando materiales que tiendan a provocarlas

15

8.- Aislantes

Materiales con un coef. Conduc. Tér. λ bajo

Los efectos de su instalación son:

- Disminuir las pérdidas térmicas
- Evitar temperaturas de contacto peligrosas (calderas, chimeneas, ...)
- Evitar la condensación sobre las superficies frías
- Impedir emisiones de calor incontroladas

El RITE marca
 $T_{sup} < 60^{\circ}\text{C}$

9.- Intercambiadores de calor (I)

Transferir calor entre dos fluidos, con separación física por medio de una pared intermedia, o una masa acumuladora

Fluido primario el caliente $_1$, y **fluido secundario** el frío $_2$

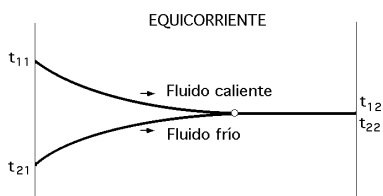
El parámetro principal es el calor intercambiado o **potencia térmica** del intercambiador, P_T ; se corresponde con el calor que cede el fluido caliente

16

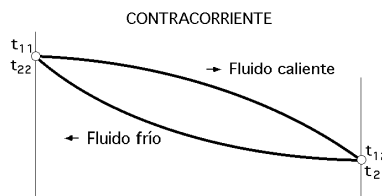
9.- Intercambiadores de calor (II)

Se llama **fluido monofásico**, contiene sólo una fase, **fluido bifásico** el que contiene materia y gaseosa

Flujos paralelos o en equicorriente; y contracorriente



A partir de este punto es imposible realizar más intercambio térmico, $t_{11} = t_{22}$



Teóricamente la temperatura de salida de un fluido puede igualar con la de entrada del otro, $t_{11} = t_{22}$ y/o $t_{12} = t_{21}$

Temperaturas características, limitan la posibilidad de intercambio térmico:

- La temperatura de entrada del fluido caliente, t_{11} en °C
- La temperatura de salida del fluido caliente, t_{12} en °C
- La temperatura de entrada del fluido frío, t_{21} en °C
- La temperatura de salida del fluido frío, t_{22} en °C

17

9.- Intercambiadores de calor (III)

Caudales caliente y frío, q_1 y q_2 en m^3/s

Masas caliente y fría, m_1 y m_2 en kg/s

La densidad de los fluidos, ρ_1 y ρ_2 en kg/m^3

El **calor específico de los fluidos** caliente y frío, c_{p1} y c_{p2} en $W/kg \text{ } ^\circ C$

La **capacidad calorífica de los fluidos** caliente y frío, C_1 y C_2 en $W/^\circ C$, es el producto de masas por el calor específico

La transferencia de calor por unidad de tiempo se utilizan las expresiones:
(sin pérdidas térmicas)

$$P_T = q_{m1} c_{p1} (t_{11} - t_{12}) = q_{m2} c_{p2} (t_{22} - t_{21}) = k A \Delta t$$

Δt la diferencia de T entre el fluido caliente y el frío a lo largo de la pared

Pérdida de presión

18

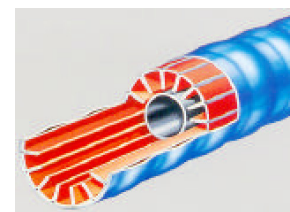
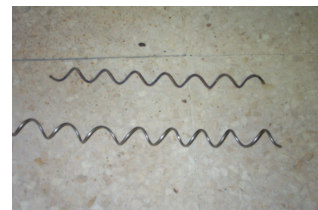
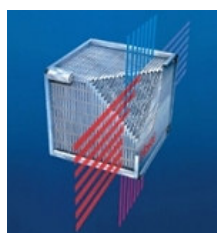
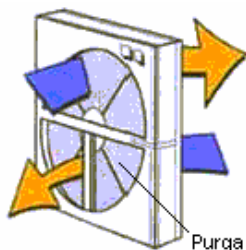
9.- Intercambiadores de calor (IV)

Tipos básicos de intercambiadores de calor (I)

Norma UNE-EN 247

Medios que intercambian

- Líquidos
- Gases (gran superficie, aletas, turbuladores)
- Líquido - Gas (aletas, turbuladores)



Disposición de la transferencia de calor

- Transferencia directa
- Con acumulación o regeneración (masa acumuladora)
- Lecho fluidizado

9.- Intercambiadores de calor (V)

Tipos básicos de intercambiadores de calor (II)

Método de transferencia de calor

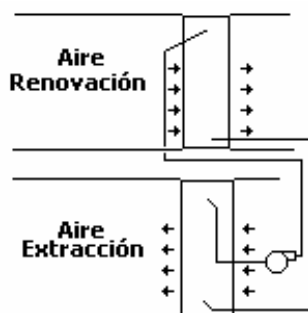
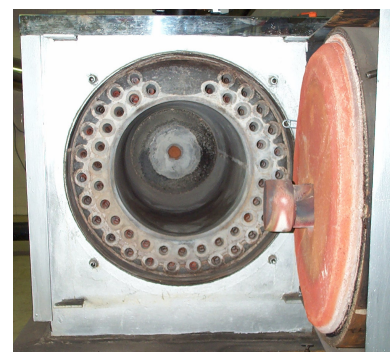
- Radiación
- Convección
- Mixto

Tipo de fluidos

- Monofásicos
- Bifásicos
- Monofásico-bifásico
- Con fluido intermedio

Posibilidades de limpieza

Posibilidad de dilatación

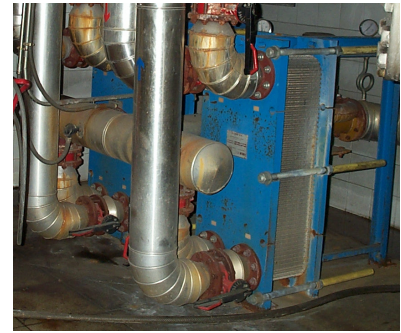


6.- Intercambiadores de calor (VI)

Tipos básicos de intercambiadores de calor (III)

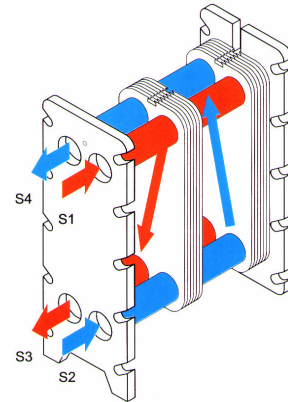
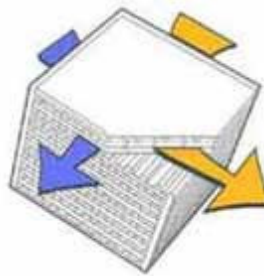
Tipo de diseño

- Carcasa y tubo
- Placas
- Flujo cruzado



Intercambiador de placas

- Las placas (no son planas) → Cavidades
- Cavidades alternadas por fluido caliente y frío
- Flujo cruzado
- Modulares y desmontables (si no son soldadas)
- Alta eficiencia
- Serie o paralelo



21

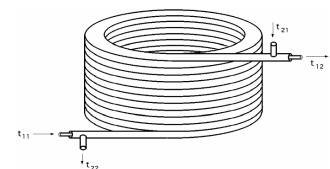
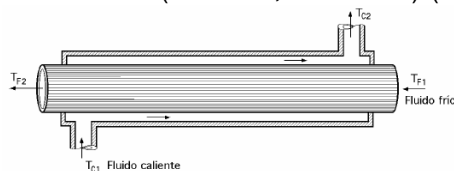
9.- Intercambiadores de calor (VII)

Tipos básicos de intercambiadores de calor (IV)

Intercambiador de carcasa y tubos (I)

Normas TEMA (TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION)

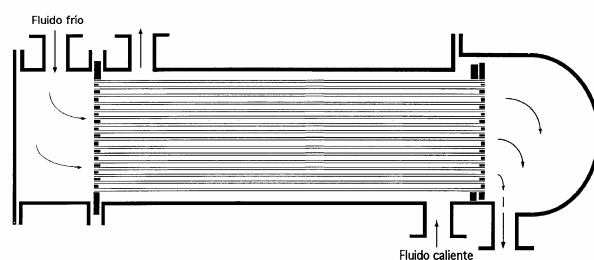
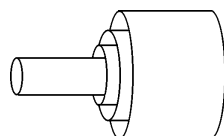
Tubo dentro de otro tubo (curvado, enrollado) (1-1)



Equi o contracorriente

No apto para grades caudales

- Tubos concéntricos
- Haces de tubos



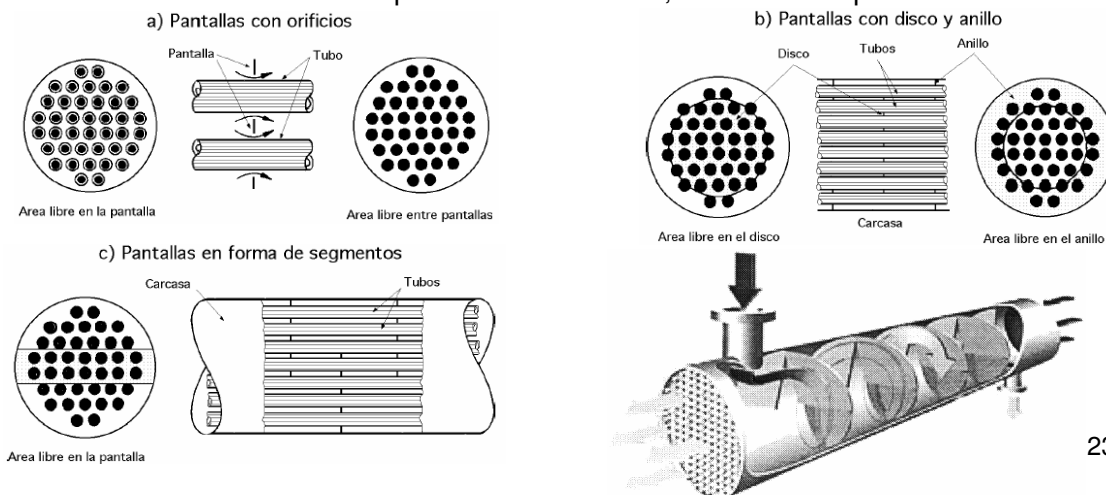
9.- Intercambiadores de calor (VIII)

Tipos básicos de intercambiadores de calor (V)

Intercambiador de carcasa y tubos (II)

Para incrementar la transmisión de calor:

– Lado de la carcasa: pantallas deflectoras, aumentar N° pasos

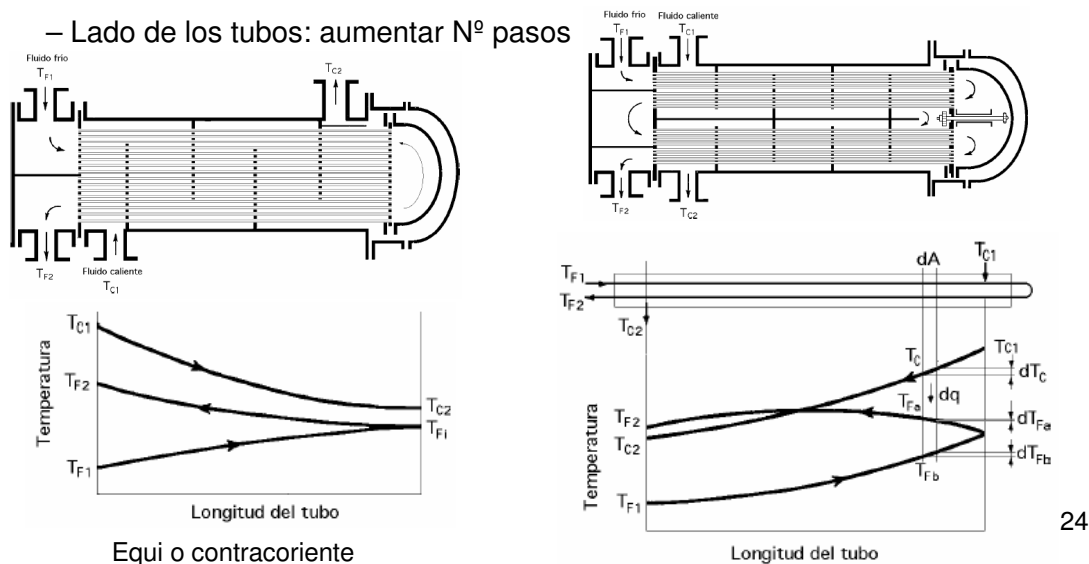


9.- Intercambiadores de calor (IX)

Tipos básicos de intercambiadores de calor (VI)

Intercambiador de carcasa y tubos (III)

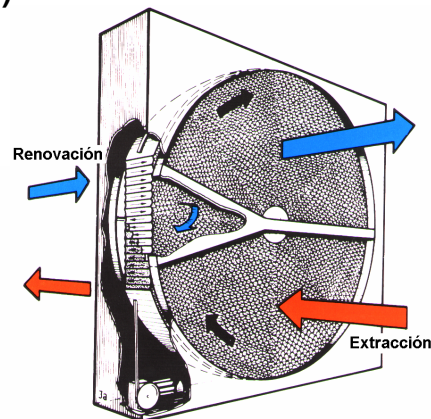
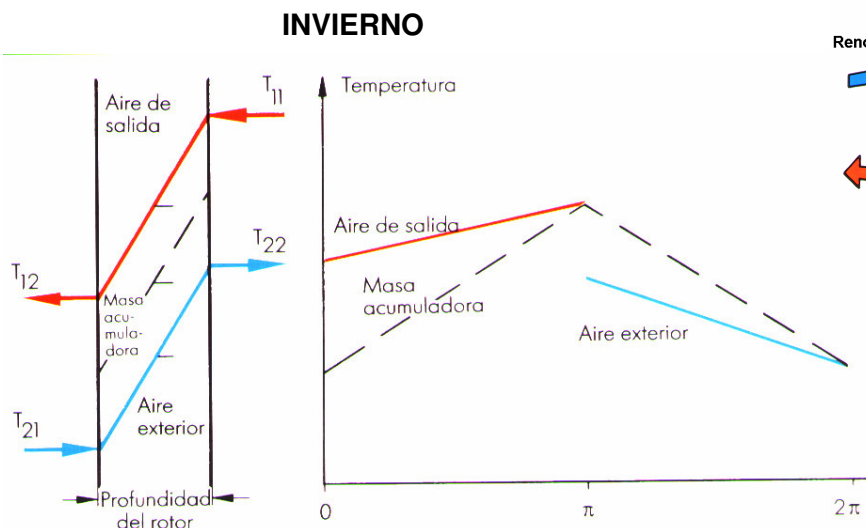
– Lado de los tubos: aumentar N° pasos



9.- Intercambiadores de calor (X)

Tipos básicos de intercambiadores de calor (VII)

Intercambiador rotativo



25

9.- Intercambiadores de calor (XI)

Tipos básicos de intercambiadores de calor (VIII)

Intercambiador de flujos cruzados

Típico en líquido, condensador o evaporador, y gas



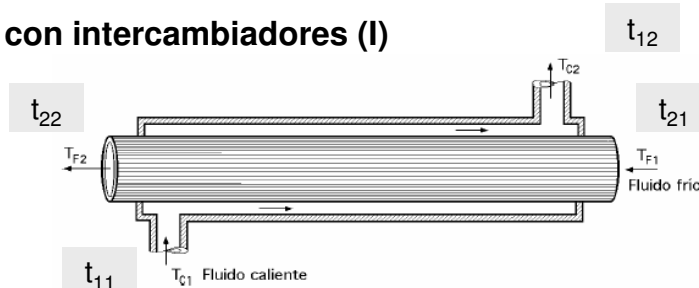
hc depende de la forma de la aleta (lisa, ondulada, ...)

Se aproxima por la de la batería de tubos liso



9.- Intercambiadores de calor (XII)

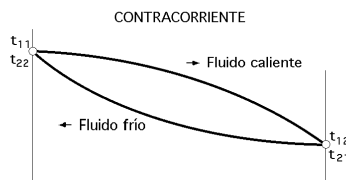
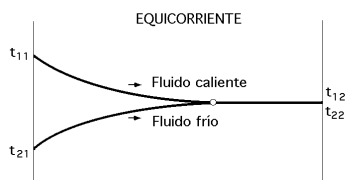
Cálculos con intercambiadores (I)



La diferencia de T a lo largo de la pared, Δt , es variable, se llama LMTD

$$\Delta t = \frac{\Delta t_i - \Delta t_o}{\ln \left(\frac{\Delta t_i}{\Delta t_o} \right)}$$

la diferencia de T de ambos fluidos a la entrada y salida del fluido caliente $\left\{ \begin{array}{l} \Delta t_i = t_{11} - t_{22} \text{ [eq. } t_{21}] \\ \Delta t_o = t_{12} - t_{21} \text{ [eq. } t_{21}] \end{array} \right.$



$$P_T = k A LMTD$$

27

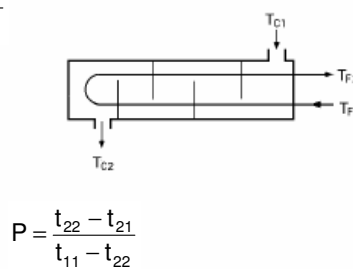
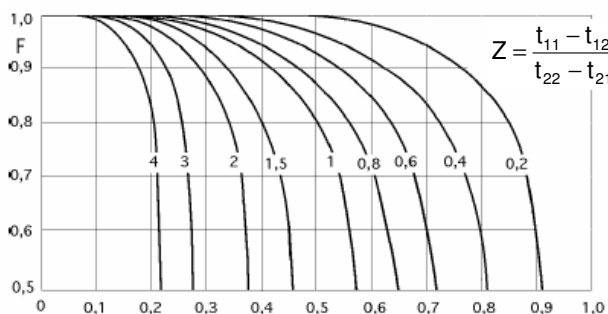
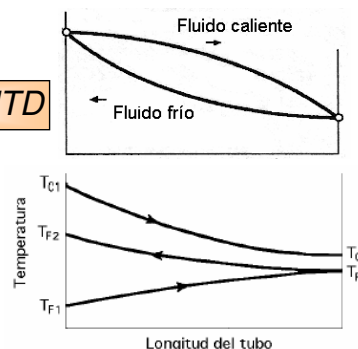
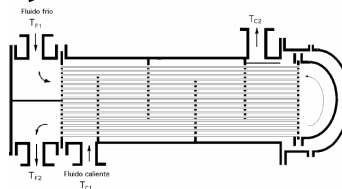
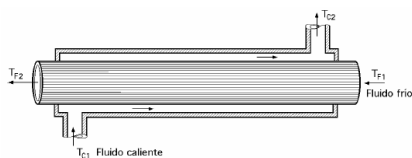
9.- Intercambiadores de calor (XIII)

Cálculos con intercambiadores (II)

$$P_T = k A LMTD$$

Geometría compleja

$$P_T = k A F LMTD$$



$$P = \frac{t_{22} - t_{21}}{t_{11} - t_{22}}$$

28

9.- Intercambiadores de calor (XIV)

Cálculos con intercambiadores (III)

Cuando se conoce es la descripción física del intercambiador y t_{11} y t_{21} se puede hacer uso del concepto de eficacia térmica del intercambiador, η_t

$$\eta_t = \frac{\text{potencia térmica transferencia en el intercambiador}}{\text{potencia térmica máxima posible de transferir}}$$

$$P_T = q_{m1} c_{p1} (t_{11} - t_{12}) = q_{m2} c_{p2} (t_{22} - t_{21}) \Rightarrow P_{\text{máx}} = (q_m c_p)_{\text{mín}} (t_{11} - t_{21})$$

$$\eta_t = \frac{q_{m1} c_{p1} (t_{11} - t_{12})}{(q_m c_p)_{\text{mín}} (t_{11} - t_{21})} = \frac{q_{m2} c_{p2} (t_{22} - t_{21})}{(q_m c_p)_{\text{mín}} (t_{11} - t_{21})}$$

Equicorriente $\eta_T = \frac{1 - e^{-NTU \left(1 + \frac{C_{\text{mín}}}{C_{\text{máx}}}\right)}}{\left(1 + \frac{C_{\text{mín}}}{C_{\text{máx}}}\right)}$

Contracorriente $\eta_T = \frac{1 - e^{-NTU \left(1 - \frac{C_{\text{mín}}}{C_{\text{máx}}}\right)}}{1 + \frac{C_{\text{mín}}}{C_{\text{máx}}} e^{-NTU \left(1 - \frac{C_{\text{mín}}}{C_{\text{máx}}}\right)}}$

$$NTU = \frac{k A}{(q_m c_p)_{\text{mín}}} = \frac{k A}{C_{\text{mín}}}$$

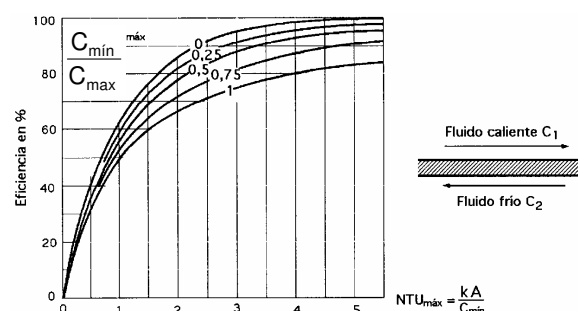
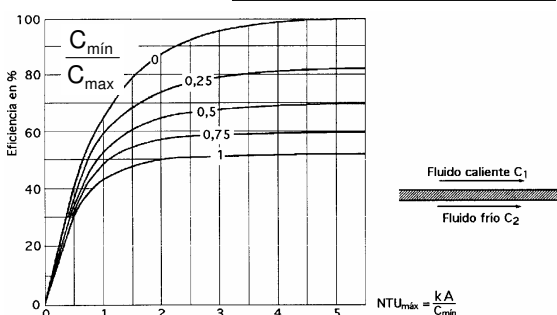
29

9.- Intercambiadores de calor (XV)

Cálculos con intercambiadores (IV)

Equicorriente $\eta_T = \frac{1 - e^{-NTU \left(1 + \frac{C_{\text{mín}}}{C_{\text{máx}}}\right)}}{\left(1 + \frac{C_{\text{mín}}}{C_{\text{máx}}}\right)}$

Contracorriente $\eta_T = \frac{1 - e^{-NTU \left(1 - \frac{C_{\text{mín}}}{C_{\text{máx}}}\right)}}{1 + \frac{C_{\text{mín}}}{C_{\text{máx}}} e^{-NTU \left(1 - \frac{C_{\text{mín}}}{C_{\text{máx}}}\right)}}$



$$NTU = \frac{k A}{(q_m c_p)_{\text{mín}}} = \frac{k A}{C_{\text{mín}}}$$

30

9.- Intercambiadores de calor (XVI)

Cálculos con intercambiadores (V)

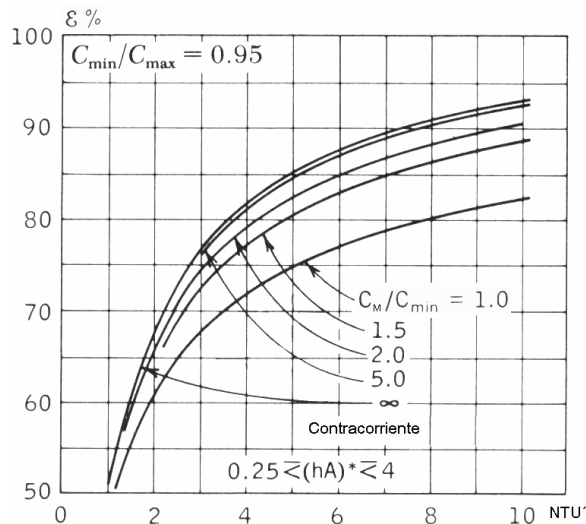
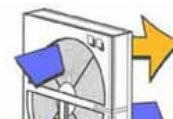
Eficacia de un intercambiador rotativo

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_C A} + \frac{1}{h_F A} \implies UA = \frac{hA}{2}$$

$$C_M = N M_M c_{pM} \text{ siendo } N \text{ el número de rpm}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{CC} \left[1 - \frac{1}{9 (C_M / C_{\min})^{1.93}} \right]$$

siendo ε_{CC} la eficacia de un intercambiador en contracorriente



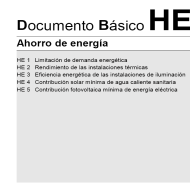
$$hA^* = \frac{hA \text{ en } C_{\min}}{hA \text{ en } C_{\max}} \text{ (normalmente 1)}$$

Bibliografía del Tema (I)



Ingeniería Térmica
P. Fernández, UC

Código Técnico de la Edificación
HE, Ahorro de Energía
Ministerio de Vivienda



Guía Técnica: Diseño y Cálculo del Aislamiento Térmico de Conducciones, Aparatos y Equipos
IDAE

DTIE 12.01. Cálculo del Aislamiento Térmico de Conducciones y Equipos
A. Viti



Bibliografía del Tema (II)



Revistas nacionales:

- El Instalador
- Montajes e Instalaciones

Catálogos Sedical



<http://www.armaflex.es/>
<http://www.isover.net/>
<http://www.rockwool.com/>
<http://www.ursa.es/>



<http://www.lym.com.mx/index.html>
<http://www.hoval.es/default.htm>
<http://www.sedical.com/web/inicio.aspx>