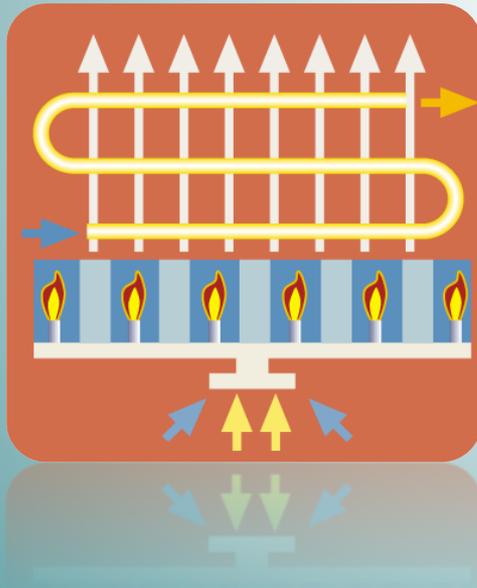


Termodinámica y Máquinas Térmicas

Tema 09. Transmisión de Calor

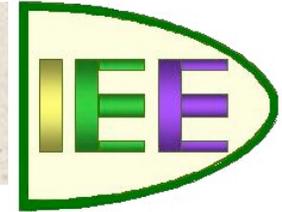


Inmaculada Fernández Diego
Severiano F. Pérez Remesal
Carlos J. Renedo Estébanez

DPTO. DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA

Este tema se publica bajo Licencia:

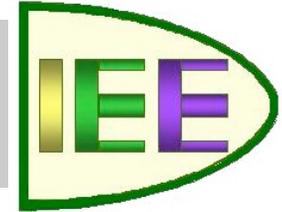
[Creative Commons BY-NC-SA 3.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/)



T 09.- Transmisión de calor

Objetivos:

El objetivo de este tema es introducir al alumno en los fenómenos básicos de transmisión de calor. El tema finaliza con el análisis de los intercambiadores de calor.



- 1.- Introducción
- 2.- Conducción
- 3.- Convección
- 4.- Radiación
- 5.- Coeficiente de transmisión de calor
- 6.- 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

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

Los aislantes tienen λ bajo

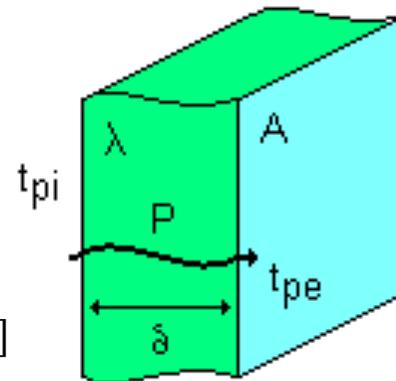
Los efectos de su instalación son:

- Disminuir las pérdidas térmicas.
- Evitar temperaturas de contacto peligrosas, calderas, chimeneas, tuberías de agua caliente,...
- Evitar la condensación sobre las superficies frías

2.- Conducción (II)

Ley de Fourier de la conducción

$$P_T = -\lambda * A * \frac{\Delta T}{\Delta \delta}$$



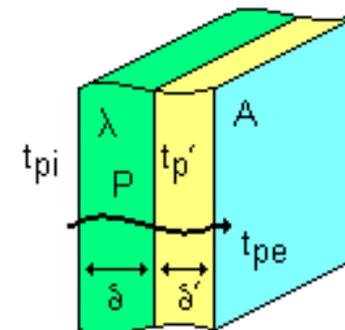
$$p_T = -\lambda * \frac{\Delta T}{\Delta \delta}$$

$$P_T = -\lambda \left(\frac{W}{m^{\circ}C} \right) * A (m^2) * \frac{\Delta T \left(\frac{\circ C}{m} \right)}{\Delta \delta \left(\frac{m}{m} \right)} [W]$$

$$p_T = -\lambda \left(\frac{W}{m^{\circ}C} \right) * \frac{\Delta T \left(\frac{\circ C}{m} \right)}{\Delta \delta \left(\frac{m}{m} \right)} \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Analogía eléctrica de la conducción

$$P_T = -\frac{\Delta T}{\frac{\Delta \delta}{\lambda * A}} \Bigg|_{R_T = \frac{\Delta \delta}{\lambda * A}} = -\frac{\Delta T}{R_T}$$



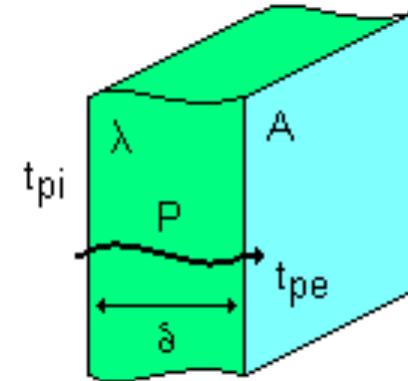
2.- Conducción (II)

Casos típicos (I)

1.- Para una pared de conductividad térmica λ

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

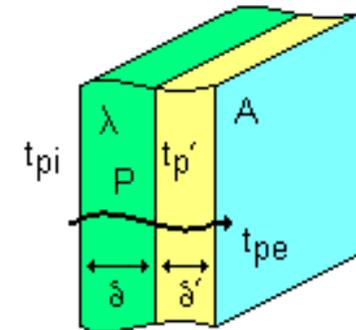
$$P = \lambda \frac{A}{\delta} (t_{pi} - t_{pe}) = \frac{(t_{pi} - t_{pe})}{\frac{\delta}{\lambda A}} = \frac{(t_{pi} - t_{pe})}{R_k}$$



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

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

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



2.- Conducción (II)

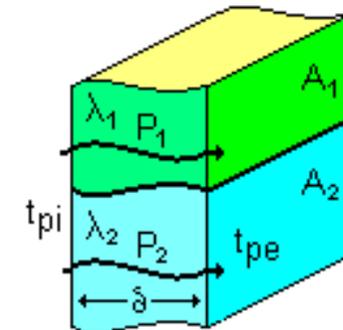
Casos típicos (II)

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

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

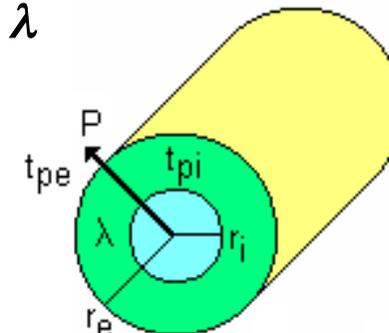
$$\frac{1}{R_k} = \frac{1}{R_{k1}} + \frac{1}{R_{k2}}$$



4.- *Para una tubería cilíndrica de conductividad térmica λ*

La resistencia de conducción del tubo $R_k = \ln(r_e/r_i) / 2\pi\lambda L$

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



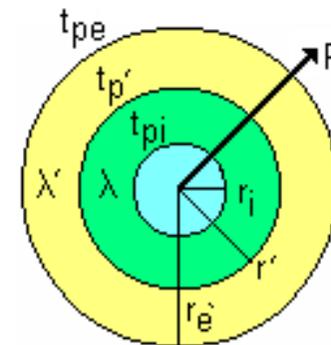
2.- Conducción (III)

Casos típicos (III)

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

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

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





3.- Convección (I)

Entre sólidos y fluidos

Coeficiente de transmisión de calor sólido-fluido o coeficiente de convección, α ($W / m^2 \text{ } ^\circ C$); 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

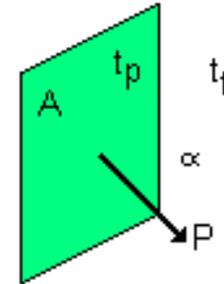
3.- Convección (II)

Ley de Newton para la convección

$$P_T = -\alpha \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right) * A(m^2) * \Delta T(^{\circ}C) [W]$$

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

$$P_T = A * \alpha * (t_p - t_f) = \frac{t_p - t_f}{\frac{1}{A * \alpha}} = \frac{t_p - t_f}{R_c}$$



Pudiéndose expresar el calor transmitido en función de la resistencia de convección (R_c) entre el sólido y el fluido: $R_c = 1 / \alpha A$

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 , existen diferentes correlaciones experimentales:

CONVECCIÓN NATURAL

Superficies cilíndricas de diámetro exterior D

(Si $D < 0,1$ m se toma $D = 0,1$ m)

Posición vertical: $\alpha = 1,42 \left[\frac{\Delta t}{D} \right]^{0,25}$

Posición horizontal: $\alpha = 1,32 \left[\frac{\Delta t}{D} \right]^{0,25}$

Superficies planas;

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

Vert, altura H : $\alpha = 1,42 \left[\frac{\Delta t}{H} \right]^{0,25}$

Hor. anchura L : Calor hacia abajo: $\alpha = 0,59 \left[\frac{\Delta t}{L} \right]^{0,25}$

Calor hacia arriba: $\alpha = 1,32 \left[\frac{\Delta t}{L} \right]^{0,25}$

Pared caliente y un fluido o gas:

$$\alpha = \frac{4 * \lambda}{3 * L} * \left[0,508 * (\text{Pr})^{1/2} * (0,952 + \text{Pr})^{-1/4} * \text{Gr}^{1/2} \right]$$

Número de Grashof

$$\text{Gr} = \frac{g * (t_p - t_f) * L^3 * \rho^2}{\mu_k^2} * \beta_p$$

expansión
volumétrica

Número de Prandtl

$$\text{Pr} = \frac{c_p * \mu_k}{\lambda}$$

Otras situaciones

3.- Convección (IV)

CONVECCIÓN FORZADA

$5 \cdot 10^4 < Re < 1 \cdot 10^7$

$$\alpha = \lambda^{2/3} * (c_p * \mu_k)^{1/3} * \frac{0,037 * Re_L^{0,8} - 850}{L}$$

$$Re_L = \frac{\rho * v_f * L}{\mu_K}$$

Convección forzada de un fluido en torno a un objeto

$$\alpha = \frac{\lambda}{D} * C * Re_D^n * \left[\frac{c_p * \mu_k}{\lambda} \right]^{1/3}$$

$$Re_D = \frac{\rho * v_f * D}{\mu_K}$$

Sección transversal	Re _D	C	n
	0,4 - 4	0,989	0,33
	4 - 40	0,911	0,385
	40 - 4000	0,683	0,466
	4000 - 40000	0,193	0,618
	40000 - 400000	0,0266	0,805
	5*10 ³ - 1*10 ⁵	0,2460	0,588
	5*10 ³ - 1*10 ⁵	0,102	0,675
	4*10 ³ - 1,5*10 ⁴	0,228	0,731

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 es la emisividad superficial depende del color

t_1 es la Tª del cuerpo en K

{ **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

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]

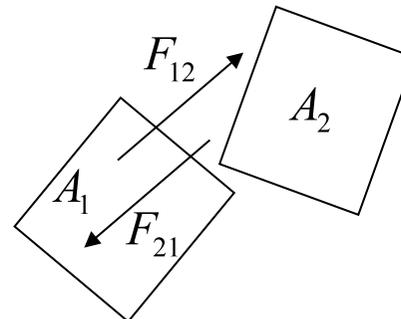
$$\alpha + \rho_R + \tau = 1$$

Factor de forma F marca la posición relativa de los cuerpos

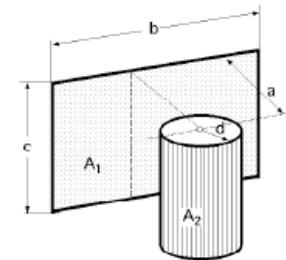
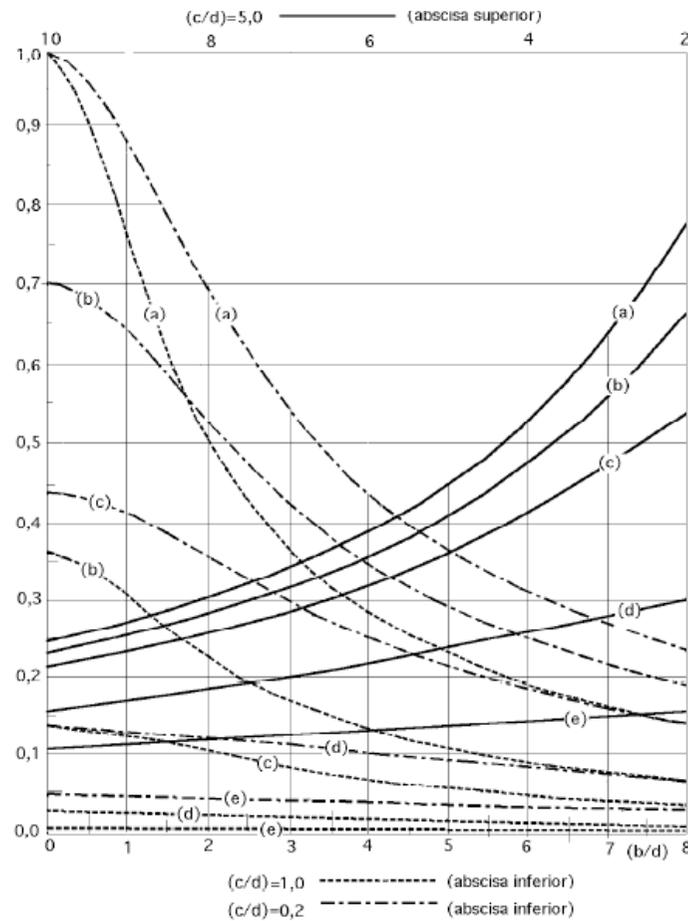
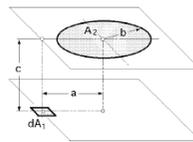
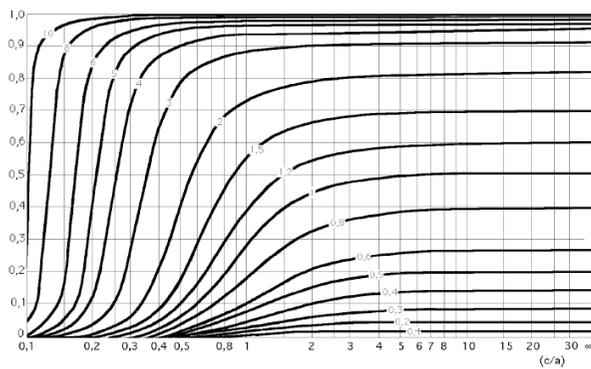
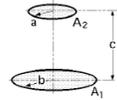
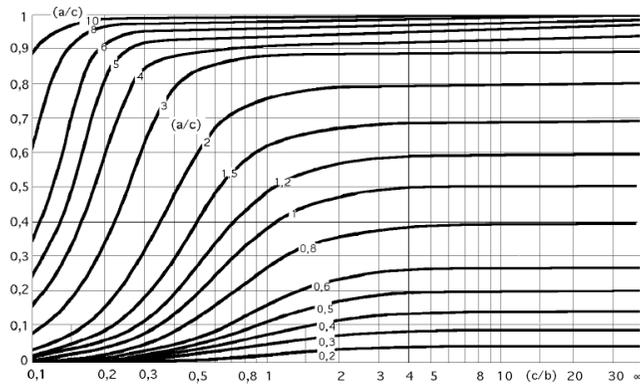
$$P_{\text{emitido por 1 e interceptado por 2}} = \sigma * A_1 * F_{1-2} * (t_1^4 - t_2^4)$$

F_{1-2} engloba ε_1 , ε_2 , y la forma geométrica y posición relativa de los dos cuerpos negros.

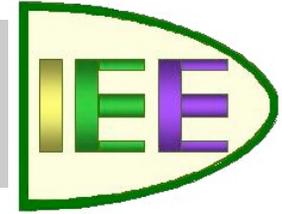
$$A_1 * F_{12} = A_2 * F_{21}$$



4.- Radiación (III)



(a/d)	Curva
1,0	a
1,2	b
1,5	c
2,5	d
4,0	e



5.- 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:

$$P_T = K * A * \Delta T$$

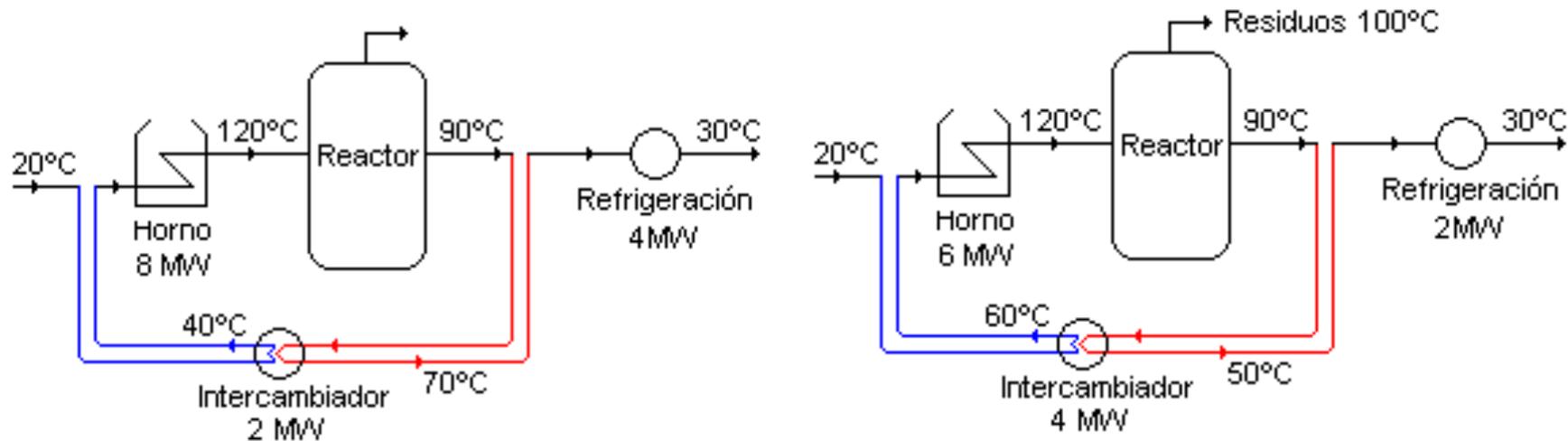
6.- Intercambiadores de calor (I)

Transferir calor entre dos fluidos, con separación por medio de una pared

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

Estudio económico: ahorro energético / coste equipo



6.- Intercambiadores de calor (II)

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 (t_{c1})
- La temperatura de salida del fluido caliente, t_{12} en °C (t_{c2})
- La temperatura de entrada del fluido frío, t_{21} en °C (t_{f1})
- La temperatura de salida del fluido frío, t_{22} en °C (t_{f2})

6.- 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 $\text{W}/\text{kg } ^\circ\text{C}$

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

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

$$P_T = m_1 * c_{p1} * (t_{11} - t_{12}) = m_2 * c_{p2} * (t_{22} - t_{21}) = k A \Delta t$$

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

6.- Intercambiadores de calor (IV)

Tipos básicos de intercambiadores de calor (I)

Norma UNE-EN 247

Medios que intercambian

- Líquidos
- Gases
- Líquido – Gas



http://www.sedical.com/web/productos_listado.aspx?CAT_ID=38&SUB_ID=61



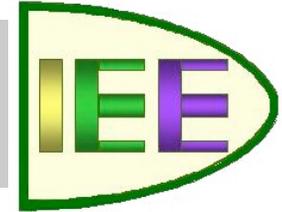
<http://www.proenergia.com/id27.html>



http://www.sedical.com/web/productos.aspx?CAT_ID=29

Disposición de la transferencia de calor

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



6.- 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

6.- Intercambiadores de calor (VI)

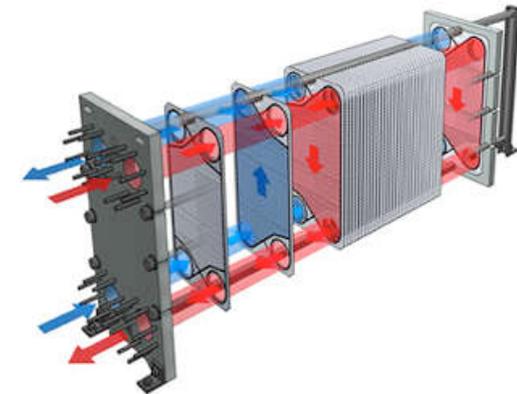
Tipos básicos de intercambiadores de calor (III)

Tipo de diseño

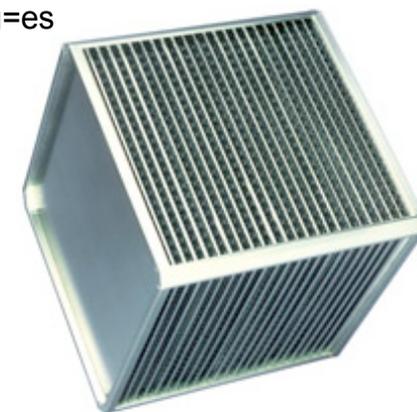
- Carcasa y tubo
- Placas
- Flujo cruzado

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



http://www.seditesa.es/index.php?option=com_content&view=article&id=70&catid=56&lang=es



http://www.sedical.com/web/productos_listado.aspx?CAT_ID=38&SUB_ID=61

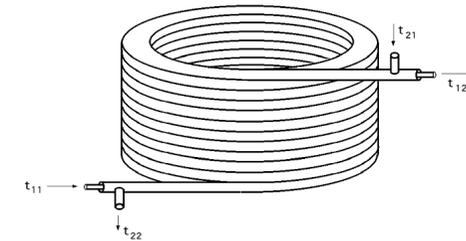
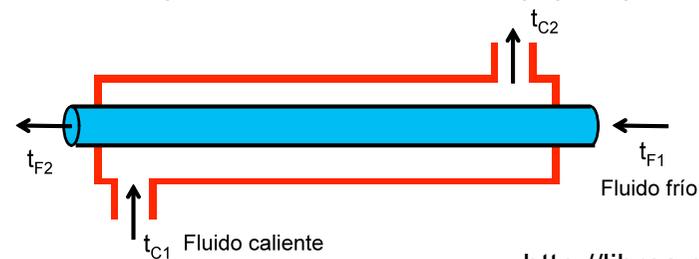
6.- Intercambiadores de calor (VII)

Tipos básicos de intercambiadores de calor (IV)

Intercambiador de carcasa y tubos (I)

Normas TEMA (TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION)

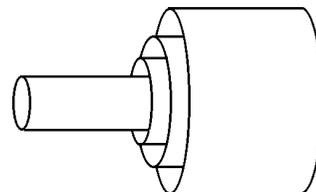
Tubo dentro de otro tubo (curvado, enrollado) (1-1)



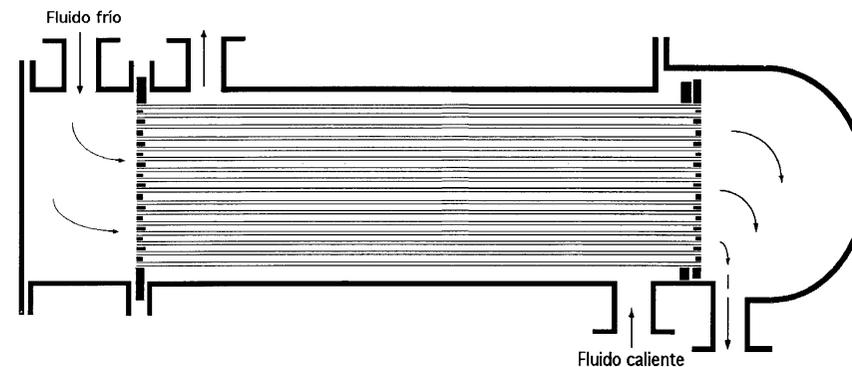
Equi o contracorriente

No apto para grandes caudales

- Tubos concéntricos
- Haces de tubos



<http://libros.redsauce.net/IngenieriaTermica/Teoria/PDFs/15.pdf>

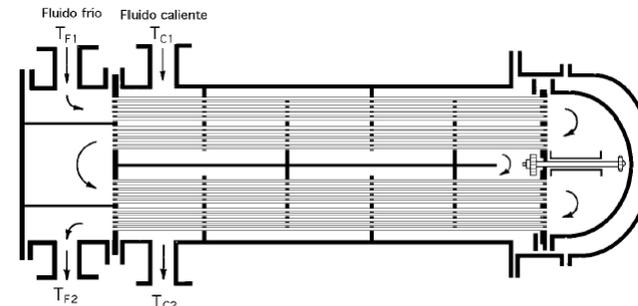
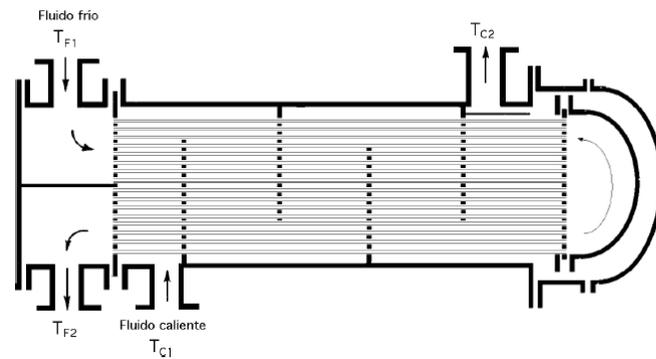


6.- Intercambiadores de calor (VIII)

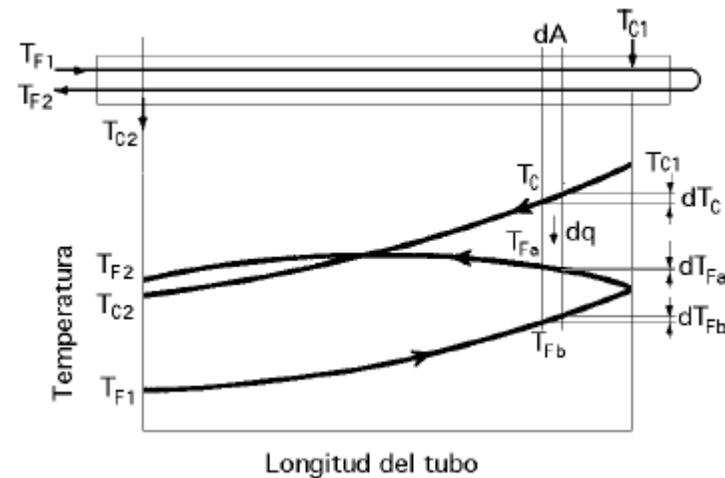
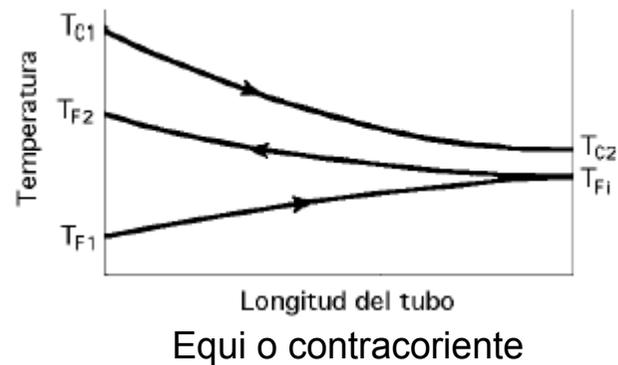
Tipos básicos de intercambiadores de calor (V)

Intercambiador de carcasa y tubos (II)

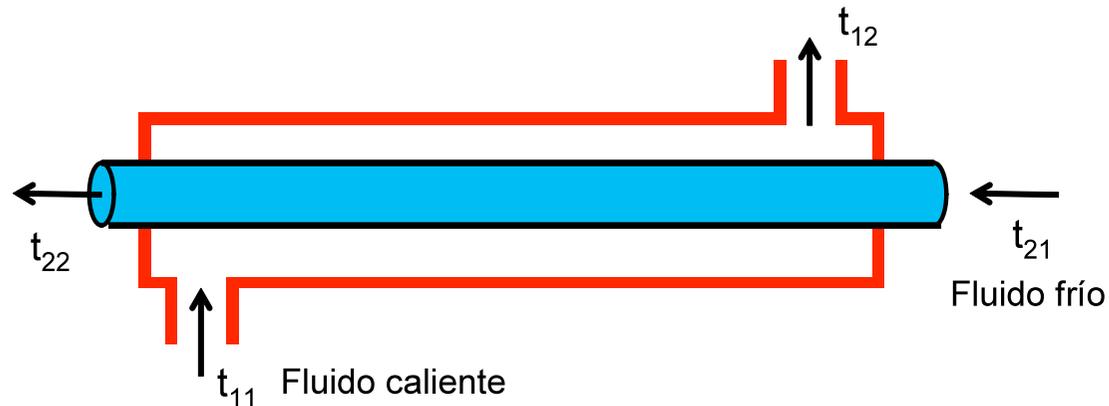
– Lado de los tubos: aumentar N° pasos



<http://libros.redsauce.net/IngenieriaTermica/Teoria/PDFs/15.pdf>



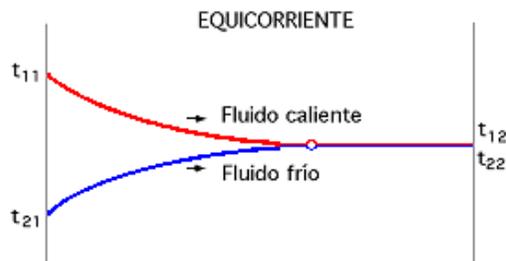
6.- Intercambiadores de calor (IX)



La diferencia de T a lo largo de la pared, Δt , es variable, se llama LMTD (*Logarithmic Mean Temperature Difference*)

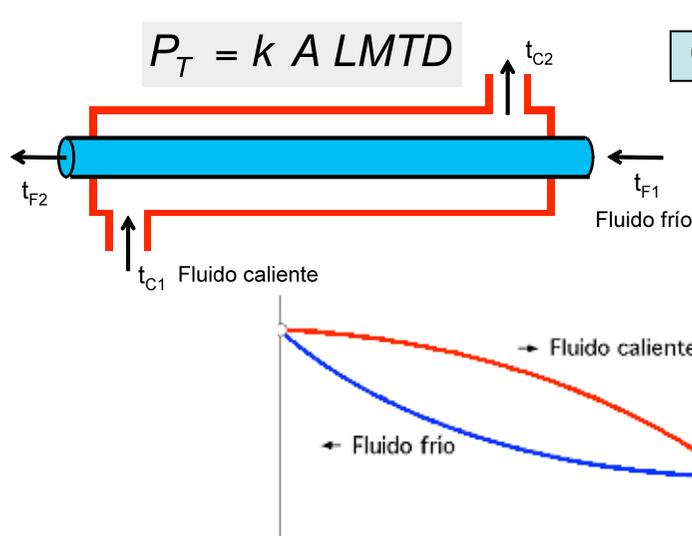
$$\Delta t = \frac{\Delta t_i - \Delta t_o}{\ln \left(\frac{\Delta t_i}{\Delta t_o} \right)}$$

la diferencia de T de ambos fluidos a la entrada y salida del fluido caliente $\begin{cases} \Delta t_i = t_{11} - t_{22} \\ \Delta t_o = t_{12} - t_{21} \end{cases}$

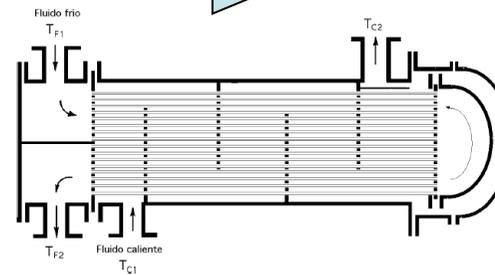


$$P_T = k A LMTD$$

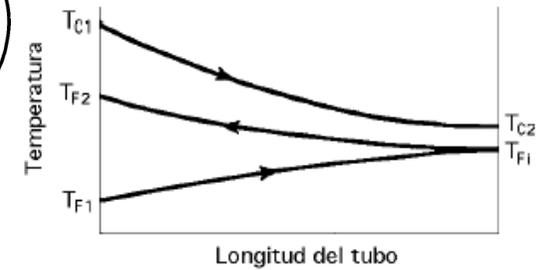
6.- Intercambiadores de calor (X)



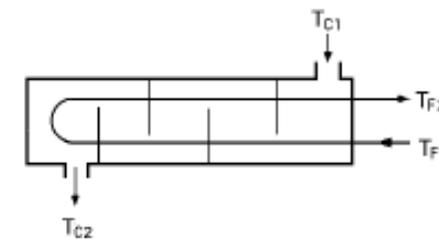
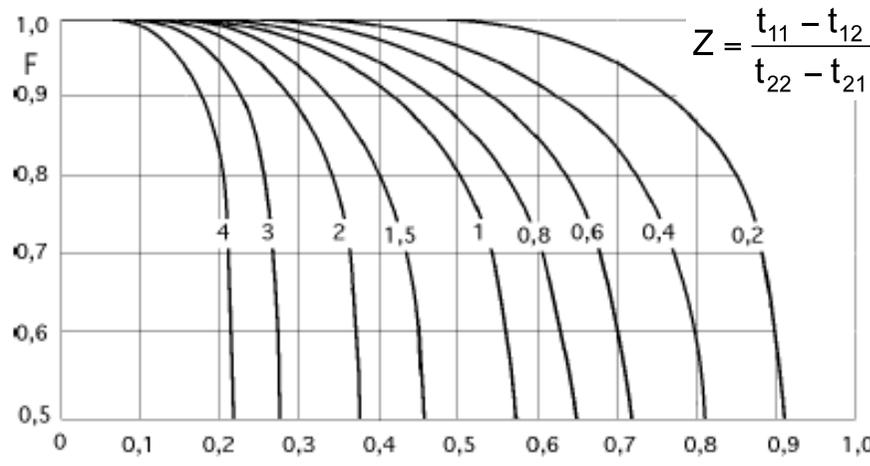
Geometría compleja



$P_T = k A F LMTD$



<http://libros.redsauce.net/IngenieriaTermica/Teoria/PDFs/15.pdf>



6.- Intercambiadores de calor (XI)

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

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

$$P_T = m_1 * c_{p1} * (t_{11} - t_{12}) = m_2 * c_{p2} * (t_{22} - t_{21}) \Rightarrow P_{m\acute{a}x} = (m_i * c_p)_{m\acute{i}n} (t_{11} - t_{21})$$

$$\eta_t = \frac{m_1 * c_{p1} * (t_{11} - t_{12})}{(m_i * c_p)_{m\acute{i}n} (t_{11} - t_{21})} = \frac{m_2 * c_{p2} * (t_{22} - t_{21})}{(m_i * c_p)_{m\acute{i}n} (t_{11} - t_{21})}$$

Equicorriente

$$\eta_T = \frac{1 - e^{-NTU \left(1 + \frac{C_{m\acute{i}n}}{C_{m\acute{a}x}}\right)}}{\left(1 + \frac{C_{m\acute{i}n}}{C_{m\acute{a}x}}\right)}$$

Contracorriente

$$\eta_T = \frac{1 - e^{-NTU \left(1 - \frac{C_{m\acute{i}n}}{C_{m\acute{a}x}}\right)}}{1 + \frac{C_{m\acute{i}n}}{C_{m\acute{a}x}} e^{-NTU \left(1 - \frac{C_{m\acute{i}n}}{C_{m\acute{a}x}}\right)}}$$

$$NTU_{\text{Número de unidades de transferencia}} = \frac{\text{Capacidad calorífica del intercambiador}}{\text{Capacidad calorífica del flujo}} = \frac{k * A}{(m_i * c_p)_{m\acute{i}n}} = \frac{k * A}{C_{m\acute{i}n}}$$

6.- Intercambiadores de calor (XII)

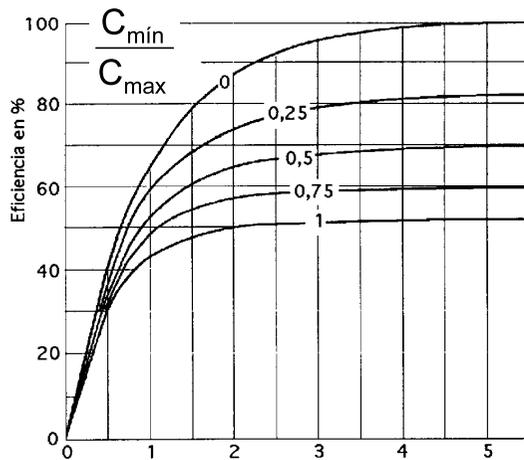
Equicorriente

$$\eta_T = \frac{1 - e^{-NTU \left(1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)}}{\left(1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)}$$

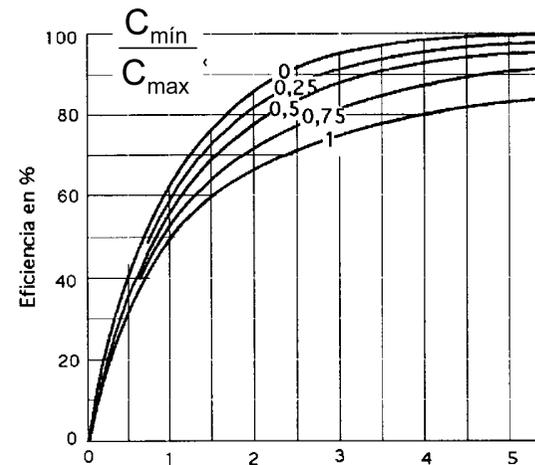
Contracorriente

$$\eta_T = \frac{1 - e^{-NTU \left(1 - \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)}}{1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}} e^{-NTU \left(1 - \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right)}}$$

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



$$NTU_{\max} = \frac{k A}{C_{\min}}$$



$$NTU_{\max} = \frac{k A}{C_{\min}}$$