



## Tema 6. Convección natural y forzada

1. CONCEPTOS BÁSICOS
2. COEFICIENTES INDIVIDUALES DE TRANSMISIÓN DE CALOR
  - 2.1. Cálculo de los coeficientes individuales de transmisión de calor
    - 2.1.1. Flujo interno sin cambio de fase: Convección forzada
      - A.- Conducciones cilíndricas
      - B.- Conducciones no cilíndricas
    - 2.1.2. Flujo externo sin cambio de fase: Convección forzada
      - A.- Placas planas
      - B.- Geometría cilíndrica
      - C.- Geometría esférica
    - 2.1.3. Otras correlaciones de interés en convección forzada
    - 2.1.4. Cálculo de los coeficientes individuales de transmisión de calor en convección natural
      - A.- Correlaciones para el cálculo de los coeficientes de transmisión de calor por convección natural



## Tema 6. Convección natural y forzada

### 1. CONCEPTOS BÁSICOS

- Mecanismo complejo de transporte de calor en el seno de fluidos en movimiento.
- Fundamento: Desplazamiento de grupos o enjambres de moléculas que se mezclan con otras a diferente temperatura.

**TIPOS DE CONVECCIÓN:** En función de la causa que provoca el movimiento del fluido.

- **Convección natural:** Movimiento debido a cambios de densidad en el fluido, provocados por diferencias de T.
- **Convección forzada:** Movimiento causado por fuerzas externas.

Ambas pueden coexistir.

Velocidad de tpte. de Q por C. Nat. <<< Velocidad de tpte. de Q. por C. Forz. (a menudo se despr. C.N.)

Convección natural

Convección forzada

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

Cartagena99

| Q | Q |

| Q | Q |



ECUACIÓN DE TRANSPORTE DE CALOR POR CONVECCIÓN:

Ecuación de tipo empírico:

q\_c = h\_c (T\_1 - T\_2)

q: flujo de calor por convección

T\_1 y T\_2: T mayor y menor del sistema

h\_c : coeficiente individual de transmisión de calor por convección (J/m^2 s K). Expresa la capacidad de un fluido para transportar Q por convección.

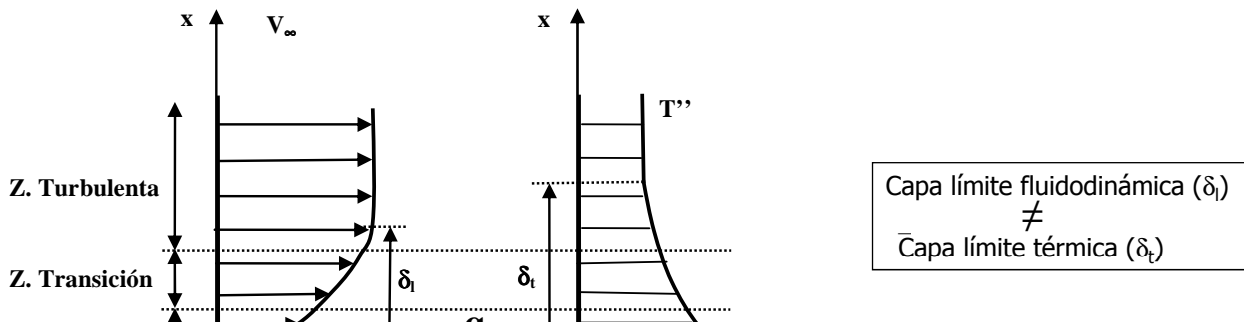
h\_c = f( fluido, T, condiciones de flujo)

Coefficientes individuales de transmisión de calor por convección.

Table with 3 columns: Fluido, Tipo de convección, h (J·m^-2·s^-1·K^-1). Rows include Air (Natural/Forzada), Water (Liquid/Ebullition/Condensation), and Superheated steam.



Transmisión de calor entre un sólido y un fluido que circula paralelo a su superficie



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

(A perpendicular al flujo de calor)





2.1. CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES INDIVIDUALES DE TRANSMISIÓN DE CALOR

• Empleo de ecuaciones basadas en la teoría de la capa límite. Solamente resultados válidos para geometrías sencillas por lo que se trata de una solución limitada.

• Utilización de ecuaciones basadas en analogías entre fenómenos de transporte. Principalmente en este caso se utilizan analogías entre el transporte de cantidad de movimiento y el de calor.

- Empleo de correlaciones experimentales.
  - Son las más empleadas (gráficas o ecuaciones).
  - El problema está en la elección de la correlación más adecuada.
  - Sólo válidas para determinados intervalos de las variables de que dependen dichas correlaciones.

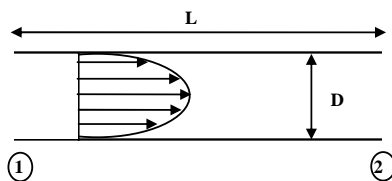
• Medida experimental. Es un procedimiento poco corriente y muy pocas veces se utiliza.



2.1.1. FLUJO INTERNO SIN CAMBIO DE FASE: CONVECCIÓN FORZADA

A.- CONDUCCIONES CILÍNDRICAS

A.1.- RÉGIMEN LAMINAR (Re < 2100)



$$m \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) = h \cdot (\pi \cdot D \cdot L) \cdot (T_D - T)_{m.a.}$$

Área lateral

h: coeficiente de transmisión de calor individual medio

(T<sub>D</sub> - T)<sub>m.a.</sub>: media aritmética de las diferencias entre la T de la pared y la del fluido en las secciones 1 y 2.

$$m \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) = h \cdot (\pi \cdot D \cdot L) \cdot (T_D - T)_{m.a.}$$

□ Considerando la conductividad calorífica del fluido k

Número de Graetz:

$$Gz = \frac{m \cdot C_p}{k \cdot L}$$



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

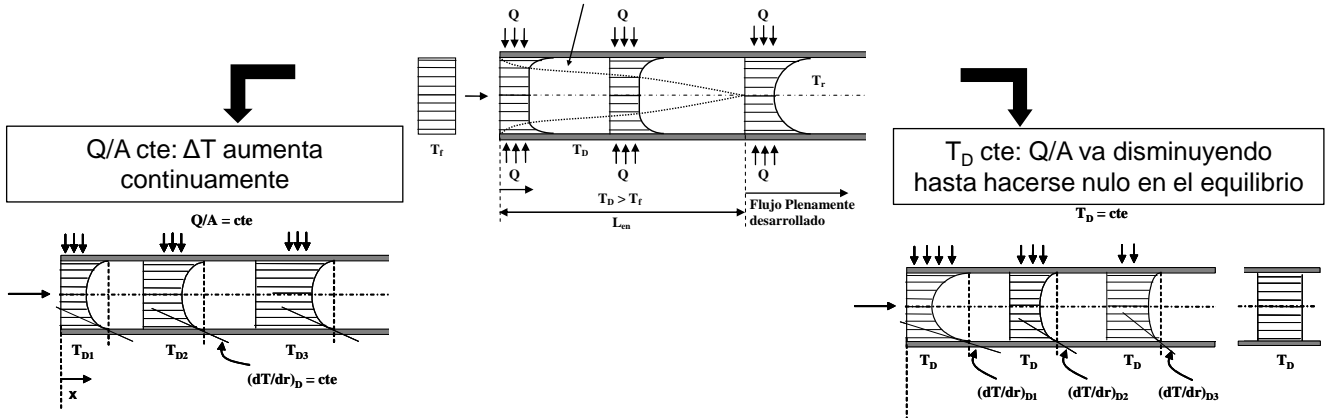
ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

$$z^+ = \frac{z \cdot k}{\nu} = \frac{r \cdot \nu}{Gz}$$



### A.1.1. - Perfiles de temperatura y velocidad plenamente desarrollados

- El flujo plenamente desarrollado se alcanza una vez superada la longitud de entrada térmica ( $L_{en}$ ).
- A partir del valor de  $L_{en}$ , el perfil de temperaturas está plenamente desarrollado.
- Las capas límites fluidodinámicas y térmica coinciden en el centro ocupando toda la conducción.



Para  $L/D \gg (x/D)_v$  y  $(x/D)_T$

$$\left(\frac{x}{D}\right)_v = 0,05 \cdot Re \therefore \left(\frac{x}{D}\right)_T = 0,05 \cdot Re \cdot Pr$$

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} = (Nu_\infty)_{q_0} = 4,36$$

Cuando  $z+ > 1$ : Perfil de T plenamente desarrollado

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} = (Nu_\infty)_{T_0} = 3,66$$



### A.1.2.- Perfiles de temperatura y velocidad no plenamente desarrollados

- El fluido empieza a intercambiar calor prácticamente desde su entrada en la conducción.
- Las capas límite fluidodinámica y térmica se desarrollan simultáneamente.
- Coeficientes de transmisión de calor individuales superiores a los de flujo plenamente desarrollado.

$$Gz < 100 \quad Nu = \frac{h \cdot D}{k} = \left( 3,66 + \frac{0,085 \cdot Gz}{1 + 0,047 \cdot Gz^{2/3}} \right) \left( \frac{\mu}{\mu_b} \right)^{0,14}$$

$$Gz > 100 \quad Nu = \frac{h \cdot D}{k} = Gz^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_b} \right)^{0,14}$$

**CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70**

---

**ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70**





### A.2.- RÉGIMEN TURBULENTO (Re > 10000)

- No es posible su estudio analítico como en el caso del flujo laminar interno: *Correlaciones empíricas*
- Flujos turbulentos internos de moderada velocidad y moderada variación de temperatura: Comportamiento de los fluidos en cuanto a transmisión de calor similar al caso del flujo laminar interno (en función del número de Nusselt).
- Condiciones límites de mayor interés práctico:  $T_D$  constante y  $q_D$  constante.
- Siempre  $(Nu_\infty)_{q_D} > (Nu_\infty)_{T_D}$ , aunque muy inferior al caso de régimen laminar (3,66 y 4,36, respectivamente).
- Si no se advierte lo contrario, nos referiremos siempre a Nu en régimen turbulento.

### Cálculo coeficientes de transmisión de calor en régimen turbulento

Variables que afectan al coeficiente de transmisión de calor individual local, h:

- Dependientes de la conducción: diámetro, D; longitud, L y naturaleza de la superficie.
- Dependientes del fluido: conductividad calorífica, k; calor específico,  $C_p$ ; viscosidad,  $\mu$  y densidad,  $\rho$ .
- Dependientes de la velocidad relativa del fluido respecto a la conducción: velocidad media, V.

$$Nu = \left( \frac{D \cdot h}{k} \right) = \Phi(Re^c, Pr^a)$$



### Correlaciones determinadas a partir de datos experimentales:

- Ecuación de Dittus-Boelter

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n$$

#### Condiciones:

- Propiedades del fluido evaluadas a la temperatura media aritmética de las temperaturas del fluido en los puntos considerados.
- $Re > 10000$
- $0,7 < Pr < 100$
- $n = 0,4$  para calefacción y  $0,3$  para enfriamiento
- $L/D > 60$

- Ecuación de Colburn

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{1/3}$$

#### Condiciones:

- $L/D > 60$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70

Cartagena99



### A.3.- RÉGIMEN DE TRANSICIÓN (2100 < Re < 10000)

- Evaluación de los coeficientes de transmisión de calor para Re = 2100 y Re = 10000, mediante las oportunas correlaciones e interpolar para el número de Reynolds que corresponda.
- Para líquidos muy viscosos fluyendo en conducciones de pequeño diámetro y moderadas variaciones de T:

$$Nu = 0,116 \cdot (Re^{2/3} - 125) \cdot Pr^{1/3} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{D}{L} \right)^{2/3} \right] \cdot \left( \frac{\mu}{\mu_D} \right)^{0,14}$$

### B.- CONDUCCIONES NO CILÍNDRICAS

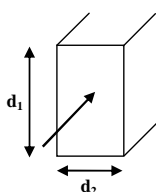
- Empleo del diámetro hidráulico  $D_H$  (o diámetro equivalente,  $D_e$ ), definido como:  $D_H = 4 \cdot R_H = 4 \frac{A}{P}$

$R_H$  : Radio hidráulico  
 A : Área de la sección transversal de la corriente  
 P : Perímetro de mojado.

• Nu y Re calculados con el  $D_H$

### B.1.- SECCIÓN TRANSVERSAL RECTANGULAR

- Para conducciones con secciones rectangulares, se utilizará la siguiente expresión para determinar el  $D_H$  y el número de Nusselt:



$$D_H = 4 \frac{A}{P} = 4 \frac{d_1 \cdot d_2}{2d_1 + 2d_2} = 2 \frac{d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2}$$

$$Nu = 0,023 \cdot \left[ 1 + \left( \frac{D}{L} \right)^{0,7} \right] \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu}{\mu_D} \right)^{0,14}$$

En general:  $h_{rect} \approx h_{tubos}$



### B.2.- SECCIÓN TRANSVERSAL ANULAR

- Transmisión de calor a través de: La pared interna, la pared externa o ambas.
- Considerar dos coeficientes de transmisión de calor individuales:  $h_i$  (superficie externa del tubo interno)  
 $h_e$  (superficie interna del tubo externo)

$$D_H = d_e - d_i$$

$$(Nu)_i = \frac{h_i \cdot D_H}{k} = 0,02 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{1/3} \cdot \left( \frac{d_e}{d_i} \right)^{0,53}$$

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
 LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

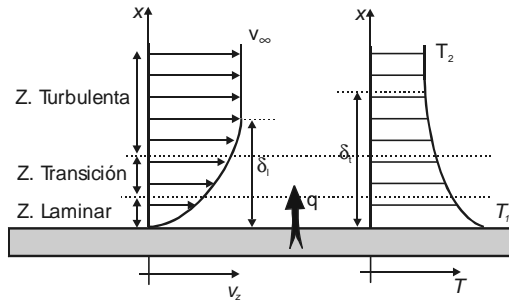
---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
 CALL OR WHATSAPP: 689 45 44 70





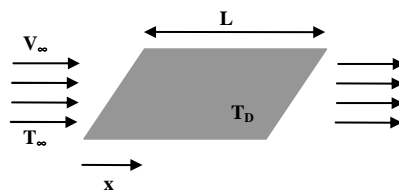
2.1.2. FLUJO EXTERNO SIN CAMBIO DE FASE: CONVECCIÓN FORZADA



- Sobre la superficie de los sólidos se forma la capa límite fluidodinámica y la capa límite térmica...
• Fórmulas y correlaciones para los coeficientes de transmisión de calor...
• Se tratarán los casos generales de transmisión de calor en flujos externos sobre:
- Placas planas horizontales
- Cuerpos cilíndricos
- Esferas
- Otros casos: bloques de tubos, superficies prolongadas con aletas o clavos...



A.- PLACAS PLANAS



x\_p: Distancia desde el borde de la superficie sólida a la que se inicia la capa límite térmica.

Re\_L = (V\_infinity \* L \* rho) / mu (1000 < Re\_L < 5 \* 10^5)

Correlaciones habitualmente empleadas:

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

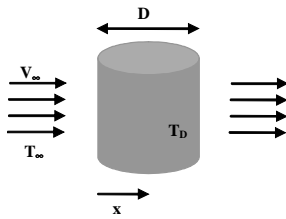
---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70





B.- GEOMETRÍA CILÍNDRICA



-Gases (amplio intervalo de Re)

Nu = A · Re\_D^n · Pr^0,3

Re\_D = (V\_infinity · D · rho) / mu

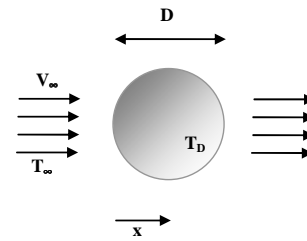
Table with columns: Re\_D, A, n, Nu para aire. Rows show ranges for Re\_D and corresponding Nu values.

-Líquidos (Re = 0,1 -300):

Nu = (0,35 + 0,56 · Re\_D^0,52) · Pr^0,3

Si no se especifica, las propiedades físicas del fluido se evaluarán a T media de película Tp = (T\_D + T\_infinity)/2

C.- GEOMETRÍA ESFÉRICA



- Gases: Re < 325 Nu = 2 + 0,6 · Re^0,5 · Pr^1/3; 325 < Re < 70000 Nu = 0,46 · Re^0,6 · Pr^1/3

- Líquidos: Nu = (0,97 + 0,68 · Re^0,52) · Pr^1/3



2.1.3. OTRAS CORRELACIONES DE INTERÉS EN CONVECCIÓN FORZADA

•Flujo interno + Conducción cilíndrica + convección forzada

1. Flujo desarrollado.

Table with columns: Ec. Dittus-Boelter, Ec. Sieder-Tate, Ec. Kays-London. Each row contains conditions and the corresponding Nu\_D equation.

Table with columns: Ec. de Sleicher-Rouse, Analogías, Ec. Nusselt. Each row contains conditions and the corresponding Nu\_D equation.

CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70







•Flujo externo + tubo + convección forzada

Cilindros regulares (Sección circular) y flujo perpendicular	
Ecuación de Zukauskas.	
Gas y líquido, propiedades a $T_f$ . $n = 0,37$ ( $Pr > 10$ ), $n = 0,36$ ( $Pr > 10$ ) C y m: Tabla 19-3. $0,7 < Pr < 500$ ; $1 < Re_D < 10^6$	$Nu_D = C \cdot Re_D^m \cdot Pr^n \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_0}\right)^{1/4}$
Ecuación de Churchill y Bernstein	
Gas y líquido, propiedades a $T_f$ . $Re_D, Pr > 0,2$	$Nu_D = 0,3 + \frac{0,62 \cdot Re_D^{1/2} \cdot Pr^{1/3}}{[1 + (0,4/Pr)^{2/3}]^{1/4}} \cdot \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5}$
Ecuación de Quarmby y Al-Fakhri (Cilindros cortos: $L/D \leq 4$ )**	
Gases (aire), propiedades a $T_f$ . $7 \cdot 10^4 < Re_D < 2,2 \cdot 10^5$	$Nu_D = 0,123 \cdot Re_D^{0,651} + 0,00416 \left(\frac{D}{L}\right)^{0,85} \cdot Re_D^{0,792}$



Coef. de ec. de Zukauskas

$Re_D$	C	m
1 - 40	0,75	0,4
40 - $1 \cdot 10^3$	0,51	0,5
$1 \cdot 10^3$ - $2 \cdot 10^5$	0,26	0,6
$2 \cdot 10^5$ - $1 \cdot 10^6$	0,076	0,7

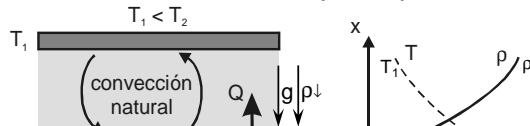


2.1.4. CÁLCULO COEFICIENTES INDIVIDUALES DE TRANSMISIÓN DE CALOR: CONVECCIÓN NATURAL

Transporte debido a corrientes producidas por cambios de densidad de un fluido en reposo por la existencia de perfiles de temperatura o concentración.

EJEMPLOS: Refrigeración de líneas y equipos eléctricos, radiadores de vapor y agua calientes, pérdidas de calor en equipos y tuberías (en ocasiones combinado con radiación).

Fluido confinado entre dos placas planas



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70

$\rho = \rho(\partial T)_p$





A- CORRELACIONES PARA EL CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE TRANSMISIÓN DE CALOR EN CONVECCIÓN NATURAL

•Flujo externo + tubo o placa vertical + convección natural

Gryzagoridis (Cilindro y placa plana verticales)	
$10 < Gr_L Pr < 10^8$	$Nu_L = 0,68 \cdot Pr^{1/2} \frac{Gr_L^{1/4}}{(0,952 + Pr)^{1/4}}$
McAdams (Cilindro y placa plana vertical)	
Turbulento $Gr_L > 10^9$	$Nu_L = 0,13 \cdot (Gr_L \cdot Pr)^{1/3}$

•Flujo externo + tubo horizontal + convección natural

Cilindro horizontal (Churchill-Chu)	
$Ra_D < 10^{12}$	$Nu_D = \left[ 0,60 + \frac{0,387 \cdot Ra_D^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2$

Si no se especifica, las propiedades físicas del fluido se evaluarán a T media de película  $T_p = (T_D + T_\infty)/2$



CLASES PARTICULARES, TUTORÍAS TÉCNICAS ONLINE  
LLAMA O ENVÍA WHATSAPP: 689 45 44 70

---

ONLINE PRIVATE LESSONS FOR SCIENCE STUDENTS  
CALL OR WHATSAPP:689 45 44 70