



Tema 4: Transmisión de calor con cambio de fase

1. Introducción
2. Ebullición de líquidos
3. Condensación de vapores

Aunque recientemente está aumentando el interés por los cambios de fase: sólido – vapor, a día de hoy, los ejemplos más importantes son los fenómenos asociados a **líquido – vapor: ebullición de líquidos y condensación de vapores**.

En ambos casos, aunque las fases de la sustancia o mezcla de sustancias que cambia de estado son el líquido y vapor, está implicado el intercambio de calor entre un sólido y un fluido:

- **Ebullición:** evaporación en la que el líquido recibe calor desde un sólido que está más caliente.
- **Condensación:** el vapor que condensa, cede calor al sólido que está más frío.

Ambos procesos implican movimiento de fluido (burbujas de vapor y gotas de líquido), por lo que se considera que discurren mediante convección, aunque con características diferentes de los procesos de transporte de calor sin cambio de fase.

Diferencias más significativas:

- Temperatura constante: durante el proceso de cambio de fase, la temperatura del fluido permanece constante. Puede variar algo (poco comparado con los procesos sin cambio de fase). Pueden conseguirse caudales de calor muy altos, aun con diferencias de temperatura muy pequeñas.
- Presencia de dos fases fluidas: el movimiento se describe como flujo bifásico y se requiere conocer las propiedades físicas tanto del líquido como del vapor.
- Variables adicionales a considerar:
 - Calor latente.
 - Tensión superficial de la interfase líquido – vapor.
 - Diferencia de densidad del líquido y vapor.

EJEMPLOS: ciclos de potencia (calderas y condensadores) y refrigeración (evaporadores y condensadores).

✓ Análisis dimensional:

$$h = f [\Delta T, g(\rho_L - \rho_V), \lambda, \sigma, L, \rho, C_p, k, \mu]$$

$$\frac{h \cdot L}{k} = f \left[\frac{c_p \cdot \mu}{k}, \frac{c_p \cdot \Delta T}{\lambda}, \frac{g \cdot (\rho_L - \rho_V) \cdot L^2}{\sigma^2}, \frac{\rho \cdot g \cdot (\rho_L - \rho_V) \cdot L^3}{\mu^2} \right]$$

• **Jakob (Ja):** $Ja = \frac{c_p \cdot \Delta T}{\lambda} \left(\frac{\text{calor sensible}}{\text{calor latente}} \right)$

• **Número similar al Grashof:**

$$\frac{\rho \cdot g \cdot (\rho_L - \rho_V) \cdot L^3}{\mu^2} \left(\frac{\text{Fuerzas de flotación}}{\text{Fuerzas de rozamiento}} \right)$$

• **Bond (Bo):** $Bo = \frac{g \cdot (\rho_L - \rho_V) \cdot L^2}{\sigma^2} \left[\frac{\text{fuerzas de flotación}}{\text{tensión superficial}} \right]$

$$Nu = f(Pr, Ja, Bo, \approx Gr)$$

2.1. Introducción

Ebullición → evaporación sobre una interfaz sólido-líquido.

Temperatura de la superficie sólida (T_s) superior a la temperatura de saturación a la presión del líquido (T_{sat}) → Transferencia de calor desde la superficie al seno del fluido

Ley de enfriamiento de Newton

$$Q = h \cdot A \cdot (T_s - T_{sat}) = h \cdot A \cdot \Delta T_e \quad \Delta T_e : \text{temperatura de exceso}$$

Formación de burbujas en superficie → crecimiento → separación.

Movimiento de burbujas → afecta al movimiento del fluido → gran influencia en la transferencia de calor

Crecimiento y evolución = f(temperatura de exceso, naturaleza de la superficie, propiedades termofísicas del fluido).

TIPOS DE EBULLICIÓN:

En función del tipo de convección:

Ebullición en líquidos estacionarios → líquido en reposo, movimiento debido a convección natural.

Ebullición por convección forzada → el líquido se mueve por la acción de fuerzas externas. Puede haber convección natural más el movimiento inducido por las burbujas

En función de la temperatura del líquido:

Ebullición subenfriada → temperatura del líquido inferior a la de saturación.

Ebullición saturada → temperatura del líquido ligeramente superior a la de saturación.

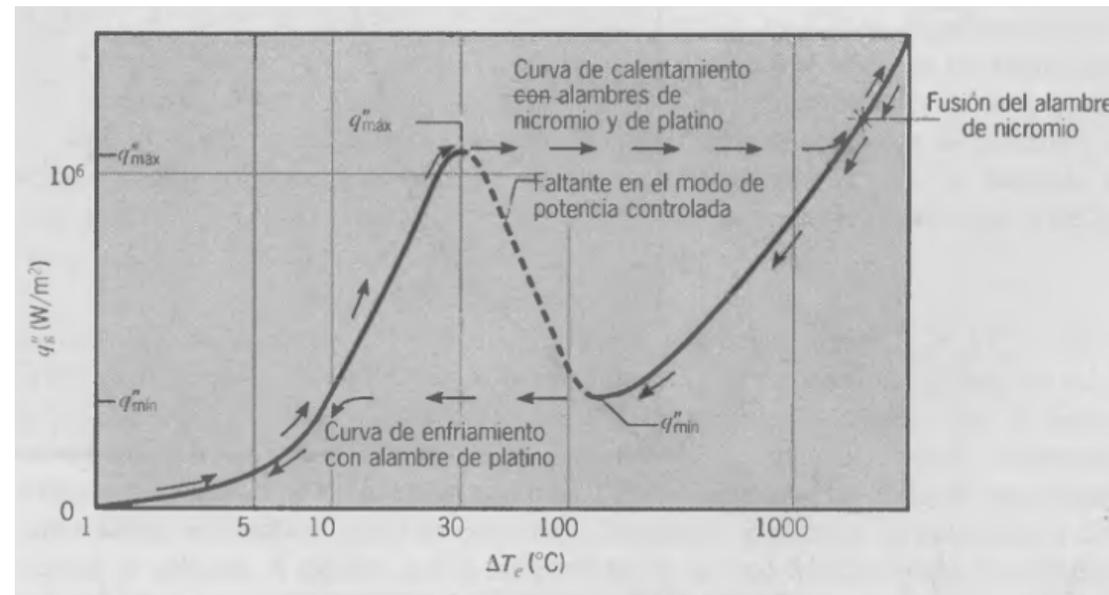
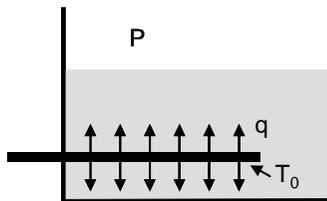
2.2. Ebullición en líquidos estacionarios

Movimiento del fluido → corrientes de convección natural + movimiento de burbujas en el seno del fluido.

Transferencia de calor desde la superficie sólida al seno del fluido → Ley de enfriamiento de Newton

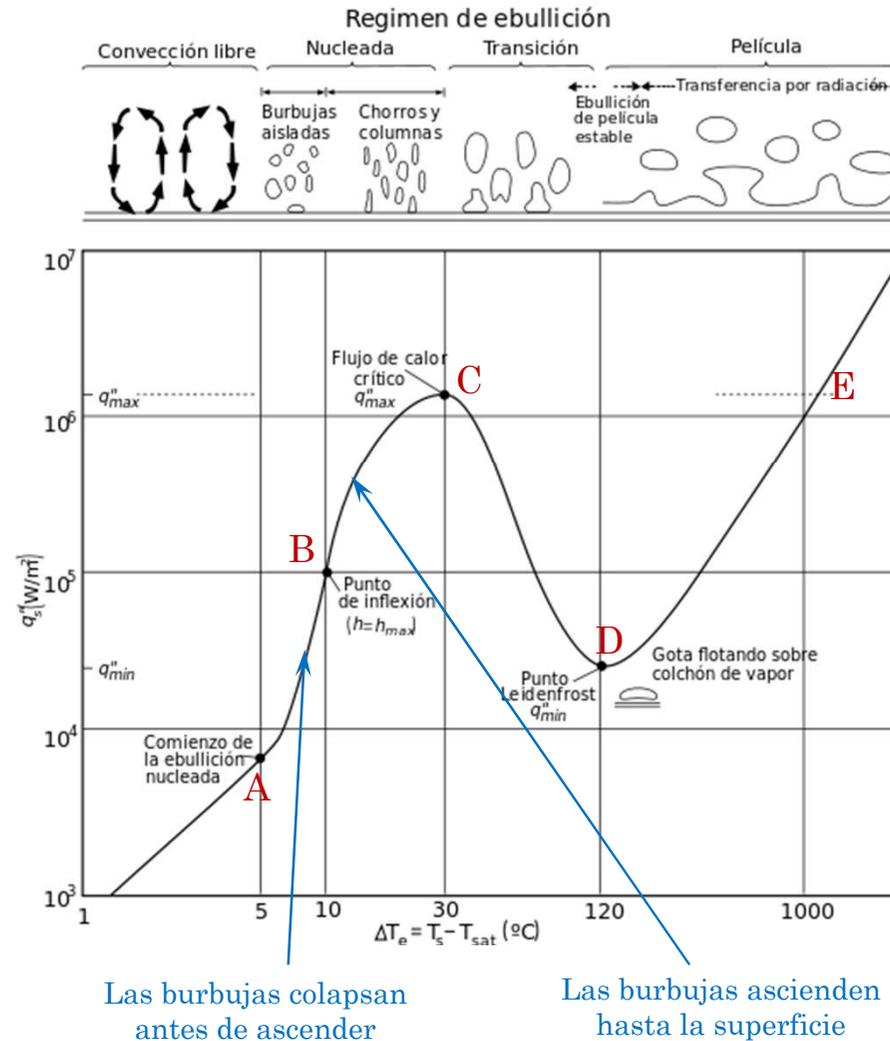
REGÍMENES DE EBULLICIÓN Y CURVA DE EBULLICIÓN

Nukiyama (1934) → experimentación con alambres de nicromio/Pt sumergidos en líquidos y calentados eléctricamente → estudio de los tipos de ebullición. El experimento se realiza midiendo T_e para cada q (se controla la potencia eléctrica del cable)



Curva de ebullición de Nukiyama para agua saturada a 1 atm

Régimen de ebullición = función de la temperatura de exceso.



Curva de ebullición para agua a 1 atm (curva obtenida con control de T_e)

2.2. Ebullición en líquidos estacionarios

REGÍMENES DE EBULLICIÓN Y CURVA DE EBULLICIÓN

Ebullición en convección natural (Inicio → A): La transferencia de calor está controlada por las corrientes de convección natural.

Ebullición nucleada (A → C): Empiezan a formarse pequeñas burbujas en la superficie sólida. Formándose con mayor rapidez a medida que nos desplazamos hacia C. Se distinguen dos zonas:

A → B: las burbujas colapsan antes de llegar a la superficie. TQ controlada por el movimiento del líquido y burbujas.

B → C: las burbujas se elevan hasta la superficie libre. TQ combinado por arrastre de líquido y evaporación. Para valores de la temperatura de exceso elevados, el número de burbujas sobre la superficie es tan elevado que la superficie está parcialmente cubierta con vapor y dificulta el contacto del líquido con la misma → máximo de Q en el punto C → **flujo de calor crítico**.

Problema en los equipos que trabajan controlando q (reactores nucleares o sistemas de calefacción eléctrica) → si se sobrepasa el flujo crítico se puede alcanzar el punto de fusión de la superficie sólida. La mayor parte de los equipos funcionan ligeramente por debajo del flujo de calor crítico.

Régimen deseable → velocidades altas de transferencia de calor con temperaturas de exceso moderadas.

Agua: $\Delta T_e < 30^\circ\text{C}$

Ebullición de transición (C → D): al aumentar la temperatura de exceso, q disminuye → gran parte de la superficie sólida cubierta con una película de vapor → resistencia adicional a la TQ (con baja k en comparación con el líquido).

Situación intermedia entre ebullición nucleada y en película. Régimen inestable y no deseable.

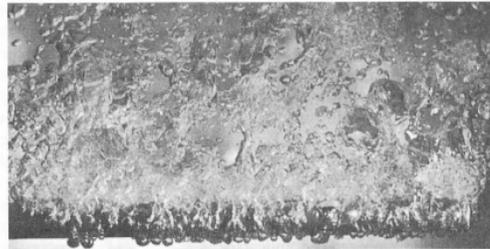
Agua: $30^\circ\text{C} < \Delta T_e < 120^\circ\text{C}$

Ebullición en película (D →): Superficie sólida completamente cubierta por vapor. Flujo de calor mínimo → punto de Leidenfrost. Al aumentar la temperatura de exceso el flujo de calor vuelve a aumentar por efecto del mecanismo de radiación que comienza a cobrar importancia.

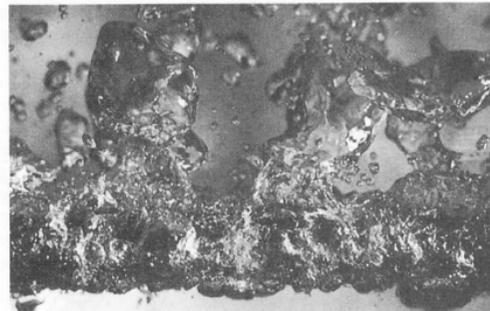
2.2. Ebullición en líquidos estacionarios

REGÍMENES DE EBULLICIÓN Y CURVA DE EBULLICIÓN

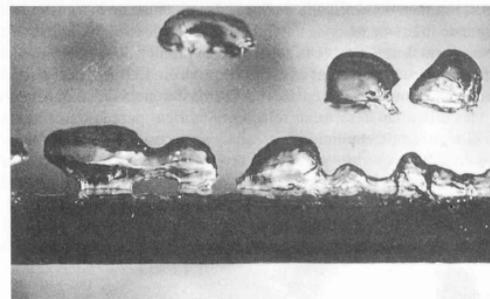
Ebullición de MeOH sobre un cilindro horizontal



EBULLICIÓN NUCLEADA



EBULLICIÓN DE TRANSICIÓN



EBULLICIÓN EN PELÍCULA

2.2. Ebullición en líquidos estacionarios

CORRELACIONES

Ebullición nucleada:

Correlación de Rohsenow:

$$q = \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left[\frac{C_p(T_s - T_{sat})}{C_{sf} h_{fg} Pr_l^n} \right]^3 \quad q \text{ [W/m}^2\text{]} \quad q \propto Ja^3 Pr^{-3n}$$

μ_l = viscosidad del líquido, kg/m · s
 h_{fg} = entalpía de vaporización, J/kg
 g = aceleración gravitacional, m/s²
 ρ_l = densidad del líquido, kg/m³
 ρ_v = densidad del vapor, kg/m³
 σ = tensión superficial de la interfase líquido-vapor, N/m
 C_{pl} = calor específico del líquido, J/kg · °C
 T_s = temperatura superficial del calentador, °C
 T_{sat} = temperatura de saturación del fluido, °C
 C_{sf} = constante experimental dependiente de la combinación superficie-fluido
 Pr_l = número de Prandtl del líquido
 n = constante experimental que depende del fluido

q es independiente de la geometría del sistema y su orientación

Propiedades físicas a temperatura de saturación

Paredes limpias

Error: $q \rightarrow$ hasta 100%; $Te \rightarrow$ 30%

h_{fg} disminuye con T·P \rightarrow al aumentar P aumenta h y por tanto q

2.2. Ebullición en líquidos estacionarios

CORRELACIONES

Ebullición nucleada:

Tensión superficial de la interfase líquido-vapor para el agua

$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \text{N/m}^*$
0	0.0757
20	0.0727
40	0.0696
60	0.0662
80	0.0627
100	0.0589
120	0.0550
140	0.0509
160	0.0466
180	0.0422
200	0.0377
220	0.0331
240	0.0284
260	0.0237
280	0.0190
300	0.0144
320	0.0099
340	0.0056
360	0.0019
374	0.0

*Multiplíquese por 0.06852 para convertir en lbf/ft o por 2.2046 para convertir en lbm/s².

Tensión superficial de algunos fluidos (tomado de Suryanarayana, Ref. 26; basado originalmente en los datos de Jasper, Ref. 14)

Sustancia y rango de temp.	Tensión superficial, $\sigma, \text{N/m}^*$ (T en $^\circ\text{C}$)
Amoniaco, -75 a -40°C :	$0.0264 + 0.000223T$
Benceno, 10 a 80°C :	$0.0315 - 0.000129T$
Butano, -70 a -20°C :	$0.0149 - 0.000121T$
Bióxido de carbono, -30 a -20°C :	$0.0043 - 0.000160T$
Alcohol etílico, 10 a 70°C :	$0.0241 - 0.000083T$
Mercurio, 5 a 200°C :	$0.4906 - 0.000205T$
Alcohol metílico, 10 a 60°C :	$0.0240 - 0.000077T$
Pentano, 10 a 30°C :	$0.0183 - 0.000110T$
Propano, -90 a -10°C :	$0.0092 - 0.000087T$

*Multiplíquese por 0.06852 para convertir en lbf/ft o por 2.2046 para convertir en lbm/s².

Valores del coeficiente C_{sf} y de n para varias combinaciones fluido-superficie

Combinación fluido-superficie de calentamiento	C_{sf}	n
Agua-cobre (pulido)	0.0130	1.0
Agua-cobre (rayado)	0.0068	1.0
Agua-acero inoxidable (pulido mecánicamente)	0.0130	1.0
Agua-acero inoxidable (rectificado y pulido)	0.0060	1.0
Agua-acero inoxidable (recubierto de Teflon picado)	0.0058	1.0
Agua-acero inoxidable (corroído químicamente)	0.0130	1.0
Agua-latón	0.0060	1.0
Agua-níquel	0.0060	1.0
Agua-platino	0.0130	1.0
<i>n</i> -Pentano-cobre (pulido)	0.0154	1.7
<i>n</i> -Pentano-cromo	0.0150	1.7
Benceno-cromo	0.1010	1.7
Alcohol etílico-cromo	0.0027	1.7
Tetracloruro de carbono-cobre	0.0130	1.7
Isopropanol-cobre	0.0025	1.7

2.2. Ebullición en líquidos estacionarios

CORRELACIONES

Flujo de calor crítico:

Correlación de Kukateladze (URSS) – Zuber (EE.UU.):

$$q = C_{cr} h_{fg} \left[\sigma g \rho_v^2 (\rho_l - \rho_v) \right]^{1/4} \quad q \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$C_{cr} \rightarrow$ constante que depende de la configuración geométrica del calentador (tabla en Çengel). Si la longitud característica del sólido $\gg \gg$ diámetro medio de burbuja $C_{cr} \approx 0,149$

Al aumentar $P \rightarrow \rho_v$ aumenta y σ y h_{fg} disminuyen. La variación de q depende de cuál de los parámetros domine. q aumenta hasta 1/3 de la presión crítica. Cuanto mayor sea h_{fg} del fluido mayor será q (como en el caso del agua).

Flujo en punto de Leidenfrost:

Correlación de Zuber (constante determinada por Berenson):

$$q = 0,09 \rho_v h_{fg} \left[\frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{(\rho_l + \rho_v)^2} \right]^{1/4} \quad q \text{ [W/m}^2\text{]}$$

Poco interés industrial.

Válida para placas horizontales grandes. Resultado similar para cilindros horizontales.

Errores de $\sim 50\%$ a presiones moderadas. Mayores errores a presiones elevadas.

2.2. Ebullición en líquidos estacionarios

CORRELACIONES

Flujo en ebullición en película:

Correlación de Bromley:

$$q_{pel} = C_{pel} \left[\frac{g k_v^3 \rho_v (\rho_l - \rho_v) [h_{fg} + 0,4 C_{pv} (T_s - T_{sat})]}{\mu_v D (T_s - T_{sat})} \right]^{1/4} (T_s - T_{sat}) \quad q \text{ [W/m}^2\text{]}$$

C_{pel} :
 cilindros horizontales 0,62
 esferas 0,67

Propiedades del vapor a $T_p [(T_s + T_{sat})/2]$. Propiedades del líquido evaluadas a su T de saturación

Con $T_s > 300^\circ\text{C}$ → comienza a adquirir importancia la transferencia de calor por radiación a través de la película.

Al aumentar el flujo de calor por radiación aumenta la velocidad de producción de vapor → al aumentar el espesor de la capa de vapor aumenta la resistencia a la TQ por convección.

De forma general, para sistemas en que $q_{rad} < q_{pel}$:

$$q = q_{pel} + \frac{3}{4} q_{rad}$$

Para el cálculo de h_{rad} se puede asumir que el vapor es transparente a la radiación, que el líquido y el sólido tiene comportamiento de cuerpo negro y que la disposición es análoga a dos superficies paralelas grandes

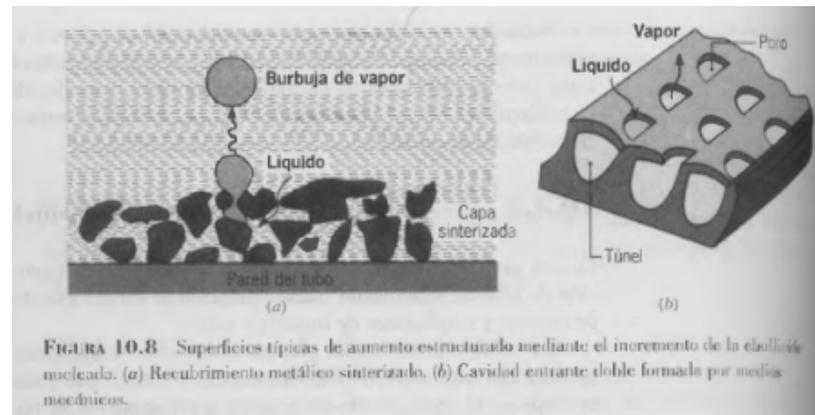
$$q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sat}^4)$$

2.2. Ebullición en líquidos estacionarios

AUMENTO DE LA TRANSMISIÓN DE CALOR

En ebullición nucleada aumenta con el número de puntos de nucleación y la velocidad de nucleación → utilización de sistemas que mejoran la nucleación de burbujas → aumento de las irregularidades de la superficie:

- aumento de la rugosidad superficial → su eficacia disminuye con tpo.
- recubrimientos con materiales porosos.
- cavidades superficiales



Agitación mecánica, vibración superficial, campos electrostáticos, ... → complican los sistemas y comprometen la seguridad.

2.3. Ebullición por convección forzada

FLUJO EXTERNO

Semejante a ebullición en líquidos estacionarios pero con h mayores por el efecto de la convección forzada. Elevación de q_{\max}

Correlaciones → cálculo en función de convección forzada pura + ebullición en líquidos estacionarios → bibliografía

FLUJO INTERNO

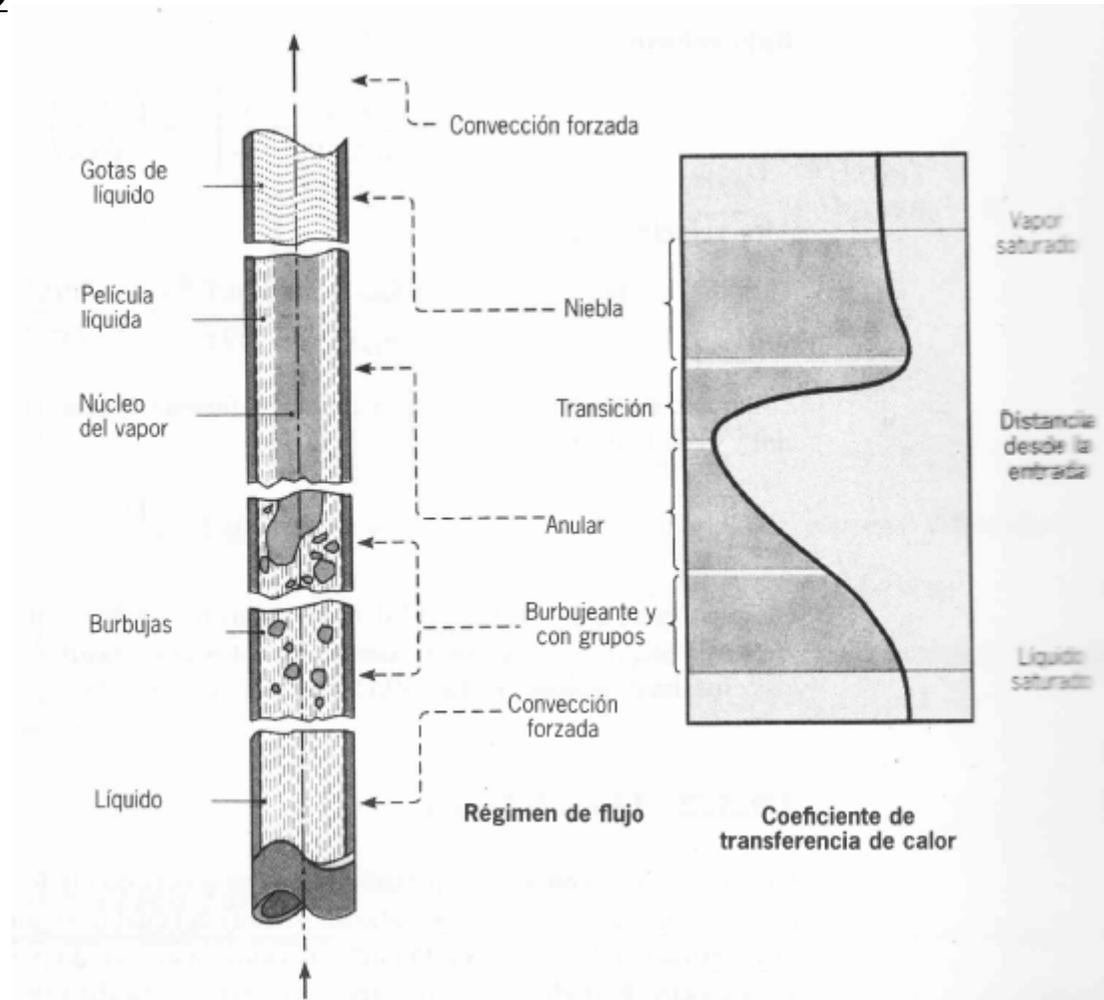
Sistema complejo por la presencia de dos fases que fluyen juntas → FLUJO BIFÁSICO

- ✓ Consideramos un líquido que asciende por el interior de un tubo vertical, cuya pared se encuentra a una temperatura, T_0 , superior a la temperatura de ebullición del líquido, T_s , a la presión que se encuentre.
- ✓ Durante el ascenso, el líquido se va calentando hasta que alcanza T_s y empieza la ebullición formándose burbujas de vapor. La fracción másica de vapor, x , aumenta según asciende el líquido.
- ✓ Debido al rozamiento, la presión en el interior de la conducción va disminuyendo con la consiguiente disminución de la temperatura de saturación y el aumento en la formación de vapor.

Correlaciones → bibliografía

2.3. Ebullición por convección forzada

FLUJO BIFÁSICO



En este caso el proceso consiste en poner en contacto un vapor saturado con una superficie sólida que se encuentra a menor temperatura, T_0 , que el vapor, T_s .

Existen diferentes tipos de contacto en el equipo industrial

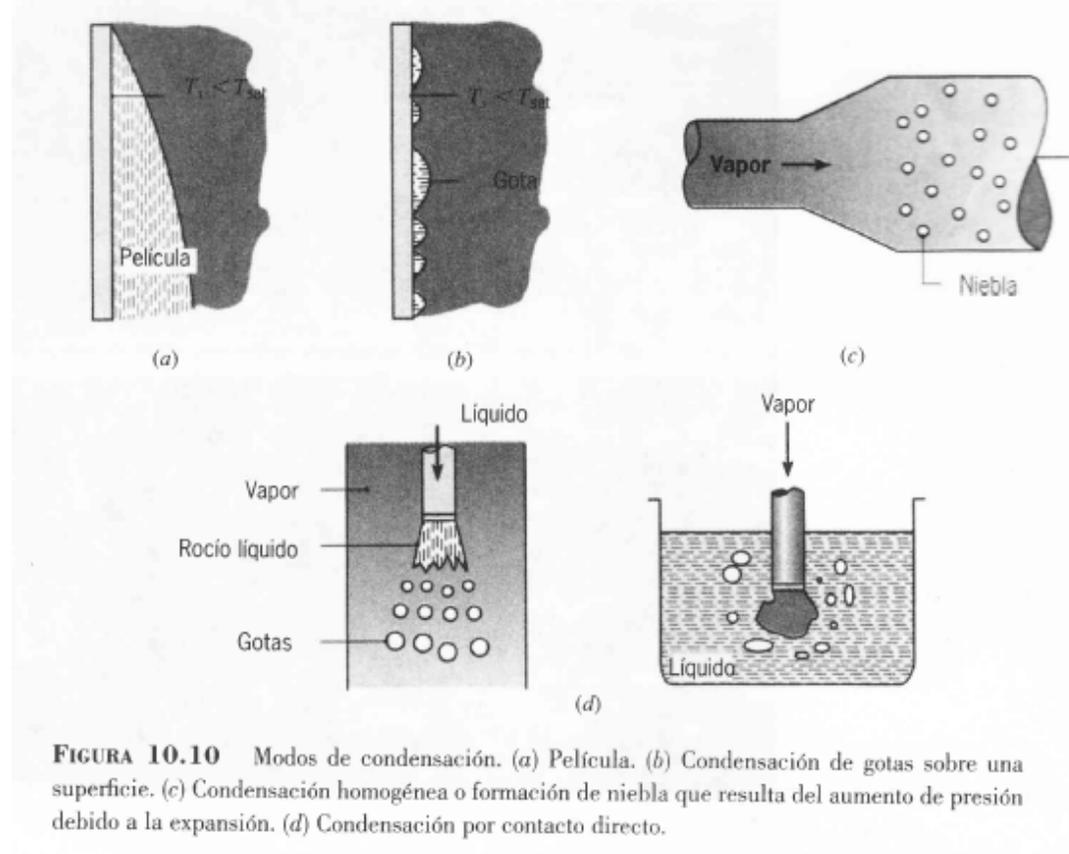
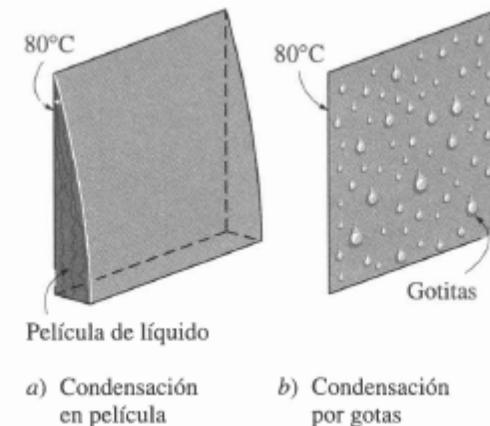
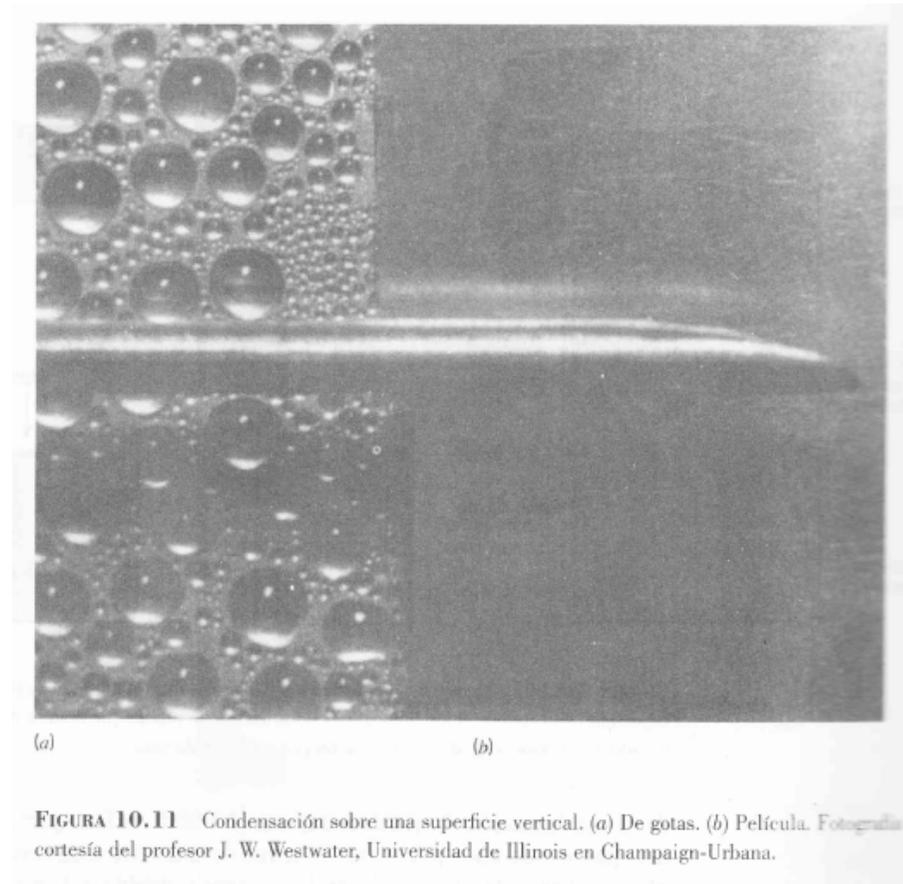


FIGURA 10.10 Modos de condensación. (a) Película. (b) Condensación de gotas sobre una superficie. (c) Condensación homogénea o formación de niebla que resulta del aumento de presión debido a la expansión. (d) Condensación por contacto directo.

Tipos de condensación:

- ✓ Condensación en película. Se forma una película de líquido que recubre totalmente la superficie sólida. Se da cuando el líquido moja bien la superficie. Resistencia adicional a la transmisión de calor → h disminuye.
- ✓ Condensación en gotas. Se forman gotas de líquido sobre la superficie que al alcanzar un determinado tamaño, caen por gravedad. No toda la superficie sólida está recubierta de líquido. Se da preferentemente cuando el líquido no moja bien la superficie → h más elevado que en película.
- ✓ *Los coeficientes de transporte de calor que se consiguen en la condensación en gotas son bastante mayores que en la condensación en película (en este caso la capa de líquido tiene muy poca agitación y dificulta bastante la transmisión de calor: $h_{gotas} = 6 - 8 h_{película}$).*
- ✓ *Interesa condensación por gotas → recubrimientos superficiales que reducen la mojabilidad (siliconas, teflón, ácidos grasos, ...) → su eficacia disminuye con el tiempo dando lugar a condensación en película. La condensación en gotas es difícil de mantener (el aumento de la carga de condensado o el ensuciamiento de la superficie favorecen el primer tipo de condensación).*
- ✓ *Diseño → criterio conservador: situación en la que h es menor → condensación en película*





3.1. Condensación en película

PLACA PLANA VERTICAL

Calor latente de vaporización modificado (Rohsenow): $h_{fg}^* = h_{fg} + 0.68C_{pl}(T_{sat} - T_s) + C_{pv}(T_v - T_{sat})$

Prop. del líquido se evalúan a T_p $[(T_{sat} + T_s)/2]$. h_{fg} y ρ_v evaluado a T_{sat}

Flujo laminar

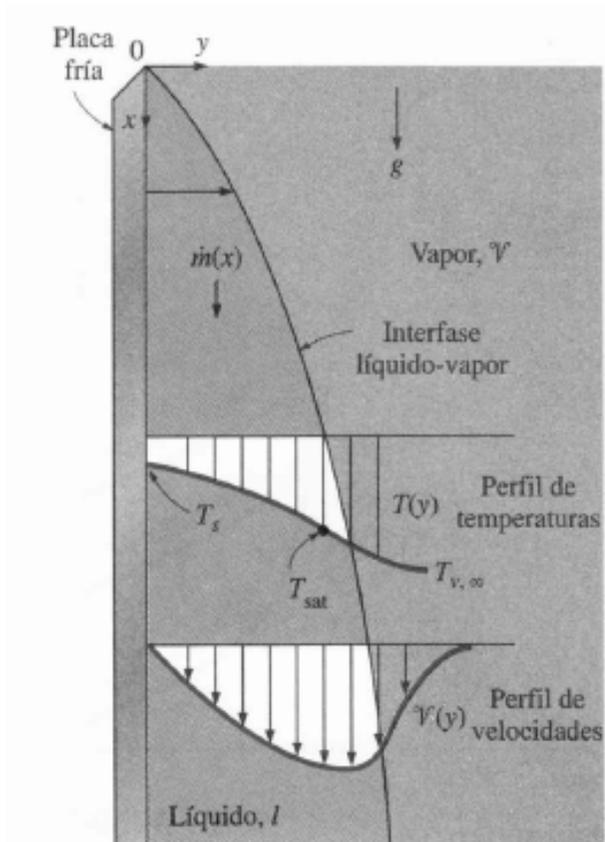
$$h_{vert} = 0.943 \left[\frac{g\rho_l(\rho_l - \rho_v)h_{fg}^* k_l^3}{\mu_l(T_{sat} - T_s)L} \right]^{1/4} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{°C}), 0 < Re < 30 \quad (10-22)$$

en donde

- g = aceleración gravitacional, m/s^2
- ρ_l, ρ_v = densidades del líquido y del vapor, respectivamente, kg/m^3
- μ_l = viscosidad del líquido, $\text{kg/m} \cdot \text{s}$
- $h_{fg}^* = h_{fg} + 0.68C_{pl}(T_{sat} - T_s)$ = calor latente modificado de vaporización, J/kg
- k_l = conductividad térmica del líquido, $\text{W/m} \cdot \text{°C}$
- L = altura de la placa vertical, m
- T_s = temperatura superficial de la placa, °C
- T_{sat} = saturation temperature of the condensing fluid, °C

En caso $\rho_v \ll \rho_l$ (muy habitual) $\rho_l - \rho_v \approx \rho_l$:

$$h_{vert} = 1.47 k_l Re^{-1/3} \left(\frac{g}{\rho_l^2} \right)^{1/3} \quad q \text{ [W/m}^2\text{]}$$



3.1. Condensación en película

PLACA PLANA VERTICAL

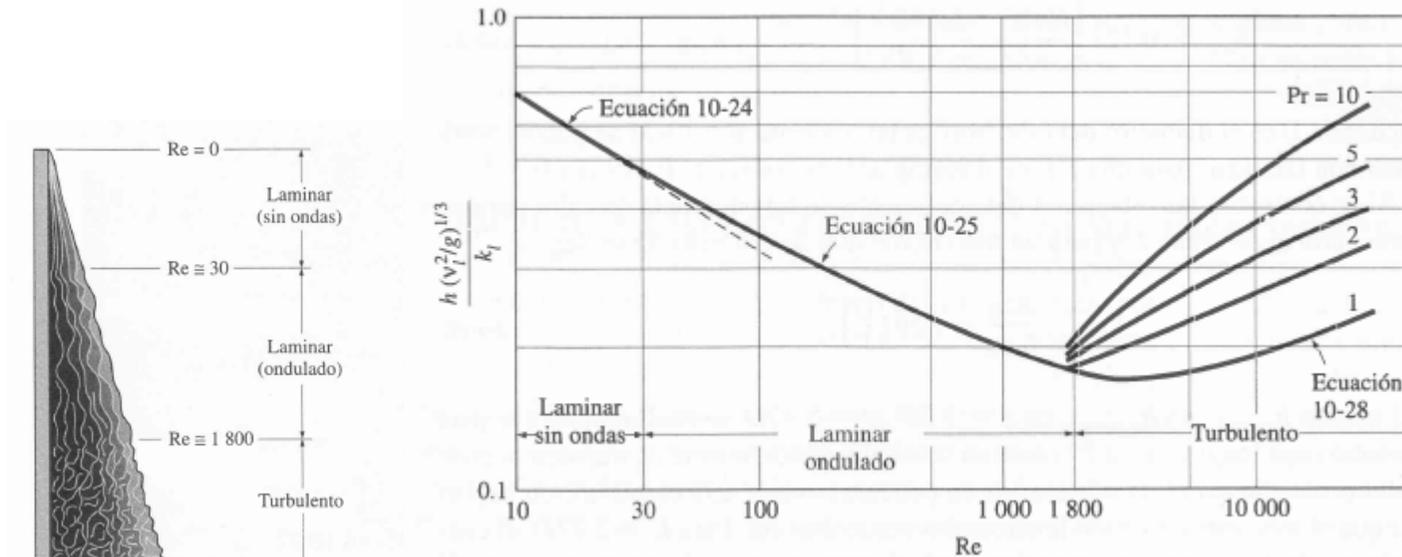
Flujo turbulento

Labuntsov:
$$h_{\text{vert, turbulento}} = \frac{Re k_l}{8750 + 58 Pr^{-0.5} (Re^{0.75} - 253)} \left(\frac{g}{\nu_l^2}\right)^{1/3} \quad Re > 1800, \rho_v \ll \rho_l$$

Propiedades del condensado a T_p

$$Re_{\text{vert, turbulento}} = \left[\frac{0.0690 L k_l Pr^{0.5} (T_{\text{sat}} - T_s) \left(\frac{g}{\nu_l^2}\right)^{1/3}}{\mu_l h_{fg}^*} - 151 Pr^{0.5} + 253 \right]^{4/3}$$

Coefficientes adimensionales para placa plana vertical



3.1. Condensación en película

PLACA PLANA INCLINADA

Ecuación para placa plana vertical (turbulenta) sustituyendo g por $g \cdot \cos\theta$ (θ : ángulo de la placa con la vertical) \rightarrow buenos resultados para $\theta \leq 60^\circ$

Para flujo laminar: $h_{\text{inclinada}} = h_{\text{vert}} (\cos \theta)^{1/4}$

TUBOS VERTICALES (flujo externo)

Si D tubo $\gg \gg$ espesor de película \rightarrow ecuación de placa plana vertical

TUBOS HORIZONTALES (flujo externo)

En el caso de una esfera o un único tubo horizontal:

$$h_{\text{horiz}} = 0.729 \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) h_{fg}^* k_l^3}{\mu_l (T_{\text{sat}} - T_s) D} \right]^{1/4} \quad (\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \quad \frac{h_{\text{vert}}}{h_{\text{horiz}}} = 1.29 \left(\frac{D}{L} \right)^{1/4}$$

0,815 (esfera)

Hilera vertical de N tubos:

$$h_{\text{horiz, } N \text{ tubos}} = 0.729 \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) h_{fg}^* k_l^3}{\mu_l (T_{\text{sat}} - T_s) ND} \right]^{1/4} = \frac{1}{N^{1/4}} h_{\text{horiz, 1 tubo}}$$

Suposiciones:

- el condensado cae en forma de lámina continua
- no se acelera al caer al siguiente tubo
- la lámina de condensado no intercambia calor con los alrededores

Los valores reales son mayores que los predichos por estas correlaciones

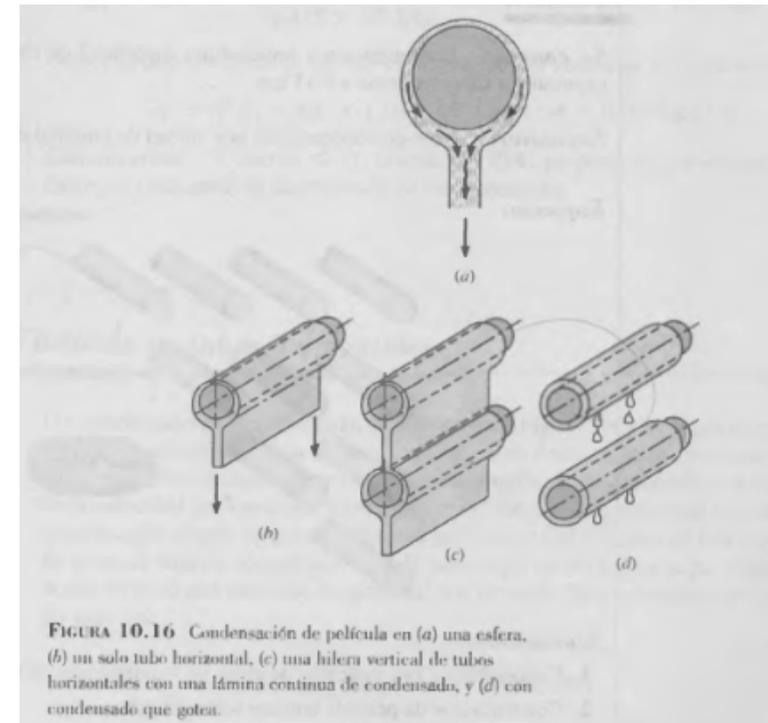
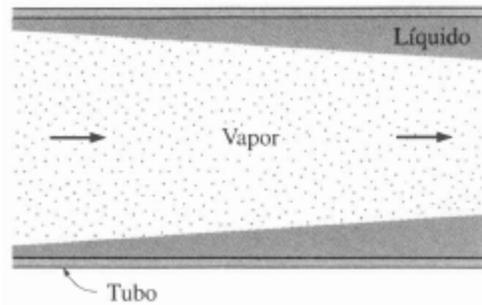


FIGURA 10.16 Condensación de película en (a) una esfera, (b) un solo tubo horizontal, (c) una hilera vertical de tubos horizontales con una lámina continua de condensado, y (d) con condensado que gotea.

3.1. Condensación en película

TUBOS HORIZONTALES (flujo interno)

Velocidad del vapor elevada → análisis complicado



Ecuación de Chato:

$$h_{\text{interno}} = 0.555 \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) k_l^3}{\mu_l (T_{\text{sat}} - T_s)} \left(h_{fg} + \frac{3}{8} C_{pl} (T_{\text{sat}} - T_s) \right) \right]^{1/4}$$

$$Re_{\text{vapor}} = \left(\frac{\rho_v \dot{V}_v D}{\mu_v} \right)_{\text{admisión}} < 35\,000$$

Para velocidades de vapor más elevadas → bibliografía

3.2. Condensación en gotas

Difícil de mantener. Tratamiento de superficies (Teflón, Ag, Au, Rh, Pd, Pt), pérdida de material con el tiempo o formación de depósitos, óxidos, que reducen la eficacia.

Utilización de aditivos en el vapor (ceras y ácidos grasos).

Correlación de Griffith
(vapor agua-Cu)

$$h_{\text{por gotas}} = \begin{cases} 51\,104 + 2\,044 T_{\text{sat}}, & 22^\circ\text{C} < T_{\text{sat}} < 100^\circ\text{C} \\ 255\,310, & T_{\text{sat}} > 100^\circ\text{C} \end{cases} \quad h \text{ [W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C]}$$

h en este caso suele ser muy elevado, por lo que no controla T.Q. en cambiadores → no se necesitan correlaciones con gran precisión