

GUÍA 3 - Fluidodinámica

Problema 1

2° Cuatrimestre - 2024

Enunciado

Se requiere diseñar un plato de una torre fraccionadora. Los datos operativos son los siguientes:

- Caudal de vapor: 96,7 m³/h (G^V)
- Caudal de líquido: 10,66 m³/h (L^V)
- Densidad de vapor: 45 kg/m³ (ρ_G^m)
- Densidad de líquido: 560 kg/m³ (ρ_L^m)
- Tensión superficial de líquido: 3 dyn/cm (σ)

Se fijan las siguientes condiciones de diseño:

- Espaciado entre platos: 450 mm (18 in) (t)
- Altura del vertedero: 50 mm (2 in) (h_w)
- Diámetro de orificio: 40 mm (1 1/2 in) (d_h) (para plato de válvulas)

INFORMACIÓN ADICIONAL

Si la válvula está parcialmente abierta:

$$h_D = 1,35 \cdot e \cdot \frac{\rho_m}{\rho_l} + 272 \cdot K_1 \cdot V_h^2 \cdot \frac{\rho_g}{\rho_l} [=] \text{ mm}$$

Si la válvula está totalmente abierta:

$$h_D = 272 \cdot K_2 \cdot V_h^2 \cdot \frac{\rho_g}{\rho_l} [=] \text{ mm}$$

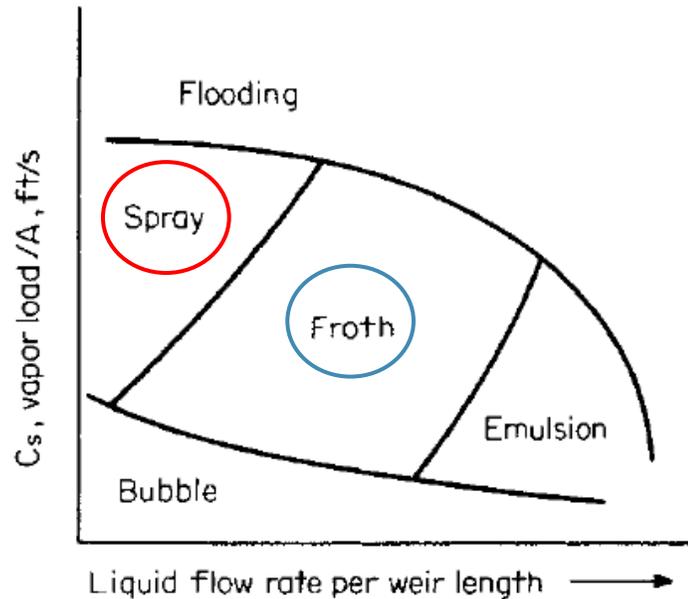
Siendo, $e = \text{espesor del plato}$

$\rho_m = \text{densidad del material del plato}$

Se deberá elegir entre las siguientes válvulas:

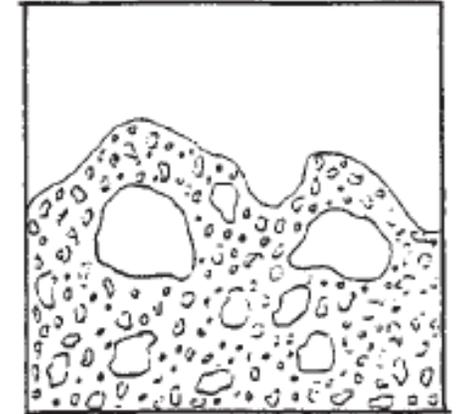
Válvula	K_1	e (mm)			
		1.88	2.67	3.4	6.35
		K_2			
Glitch V ₁	0.2	1.05	0.92	0.82	0.5
Glitch V ₄	0.1	0.5	0.39	0.3	-

Intro Teórica – Regímenes de Flujo

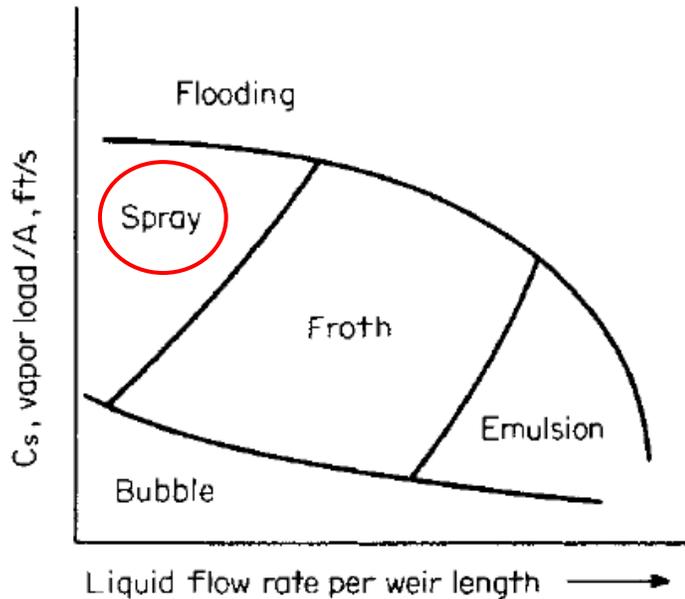


Régimen de espuma (o "mixto")

- Régimen más común con la fase líquida continua.
- En cada orificio se forman burbujas que viajan rápidamente en el líquido.
- Tienen diversas formas, tamaños y velocidades.
- La superficie de la espuma es móvil y no forma un nivel parejo. Suele estar cubierta de gotas.
- A medida que la carga de gas se incrementa, el fenómeno de *jetting* (chorro, eyección) reemplaza el burbujeo en algunos orificios.
- Generalmente, cuando el fenómeno se alcanza entre el 45% y el 70% de los orificios, el régimen cambia a *spray* (disperso).

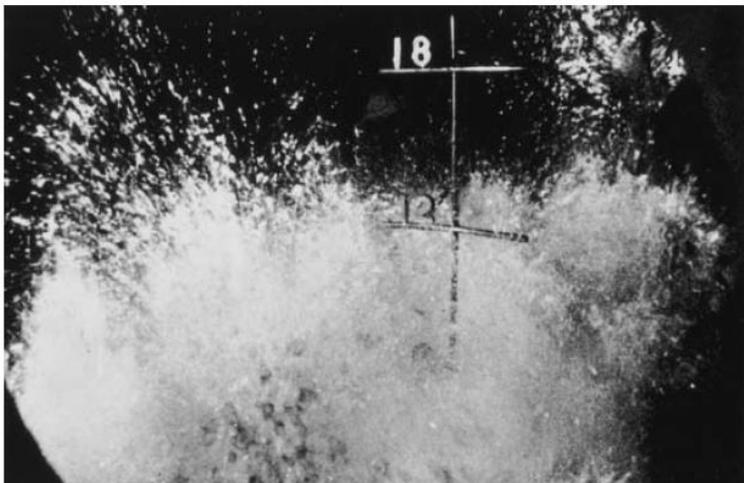
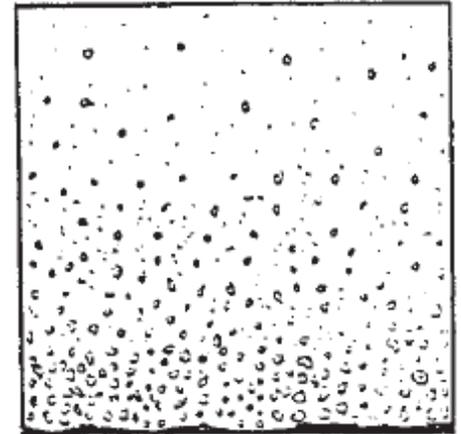


Intro Teórica – Regímenes de Flujo

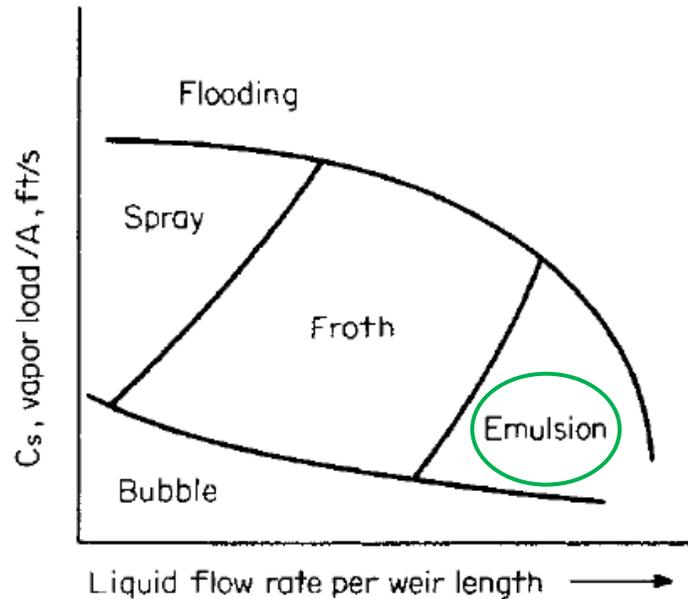


Régimen *spray* (o "de gotas")

- La altura de líquido en el plato es pequeña y es fácilmente atomizada por el gas que circula a alta velocidad.
- La dispersión se convierte en una nube de gotas de varios tamaños.
- Las gotas se mantienen "elevadas" por encima del plato siguiendo trayectorias libres: algunas pueden alcanzar el plato superior, mientras que otras vuelven al seno del líquido.
- Régimen con gas como fase continua y líquido disperso

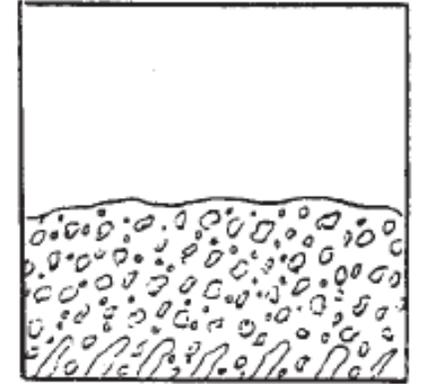


Intro Teórica – Regímenes de Flujo



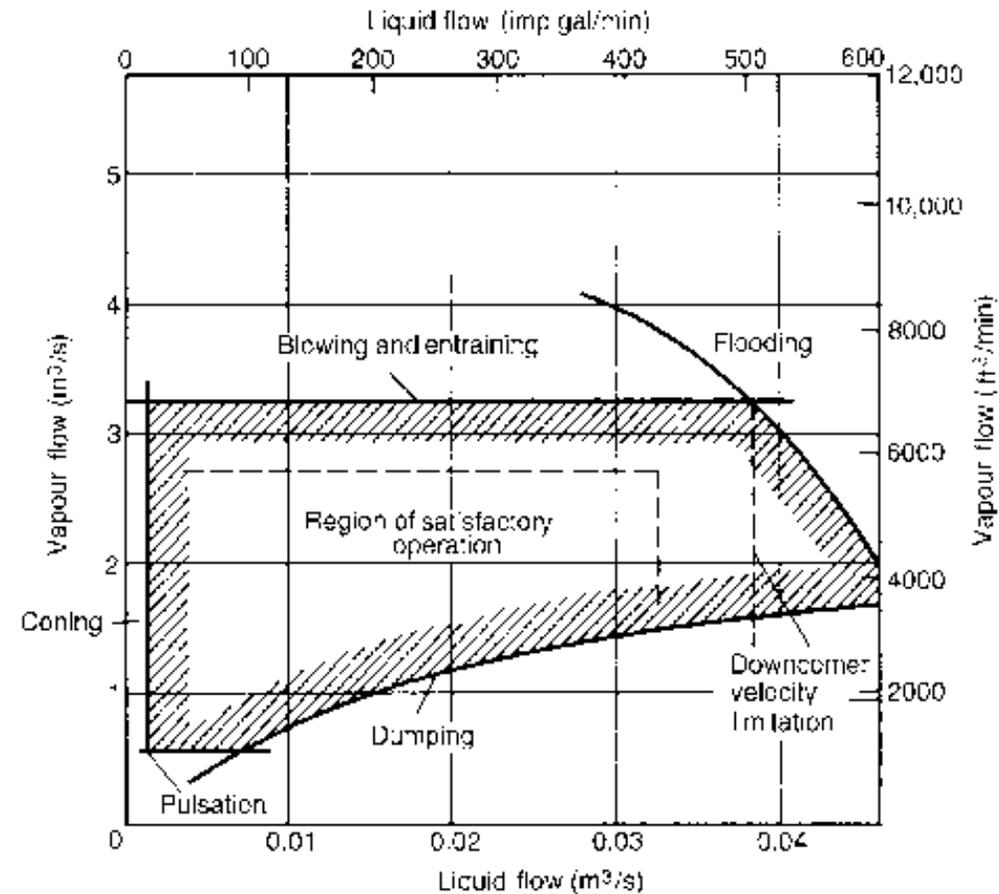
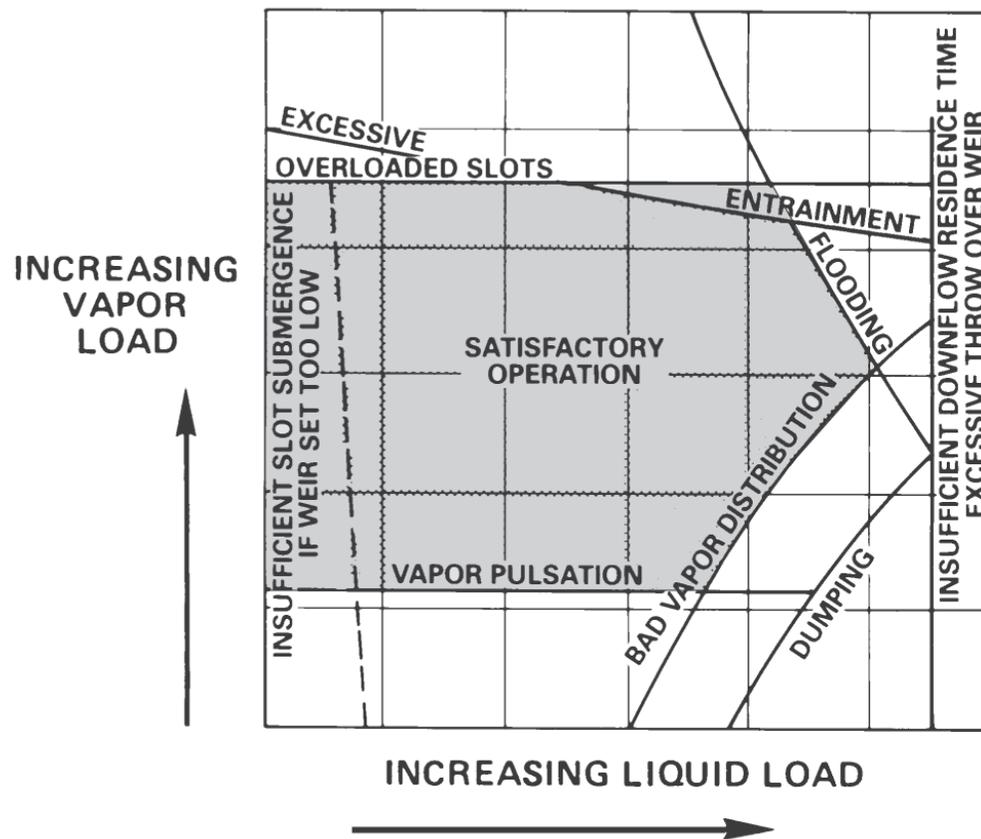
Régimen *emulsión*

- Elevada velocidad del líquido que rompe el “enjambre” de burbujas que sale de los orificios.
- La mayor parte del gas se emulsifica como pequeñas burbujas dentro del líquido.
- La mezcla se comporta como un fluido uniforme bifásico.
- En la práctica industrial, este régimen es el más común en operaciones de alta presión y alta carga de líquido.



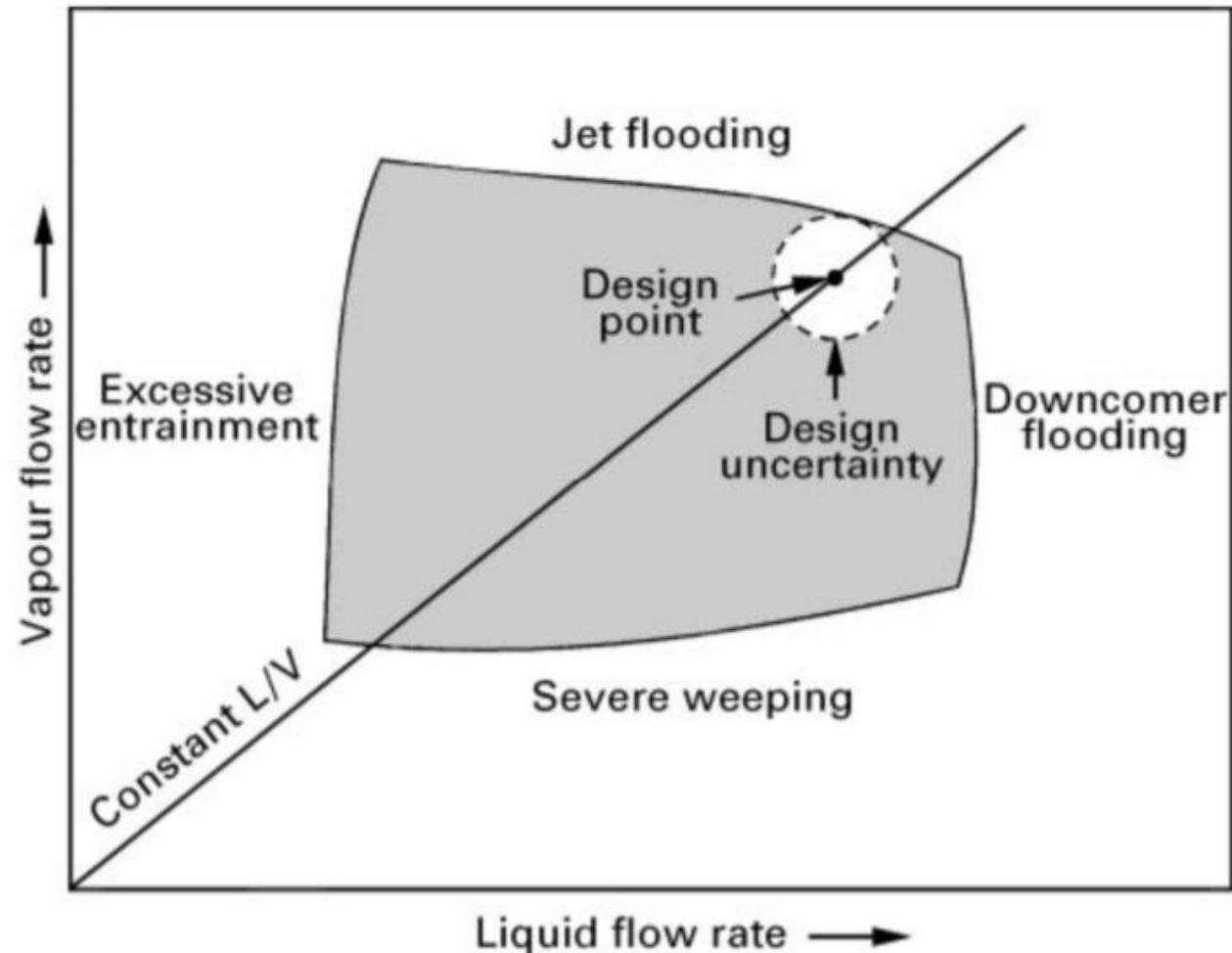
Intro Teórica – Operación estable

Gráficos



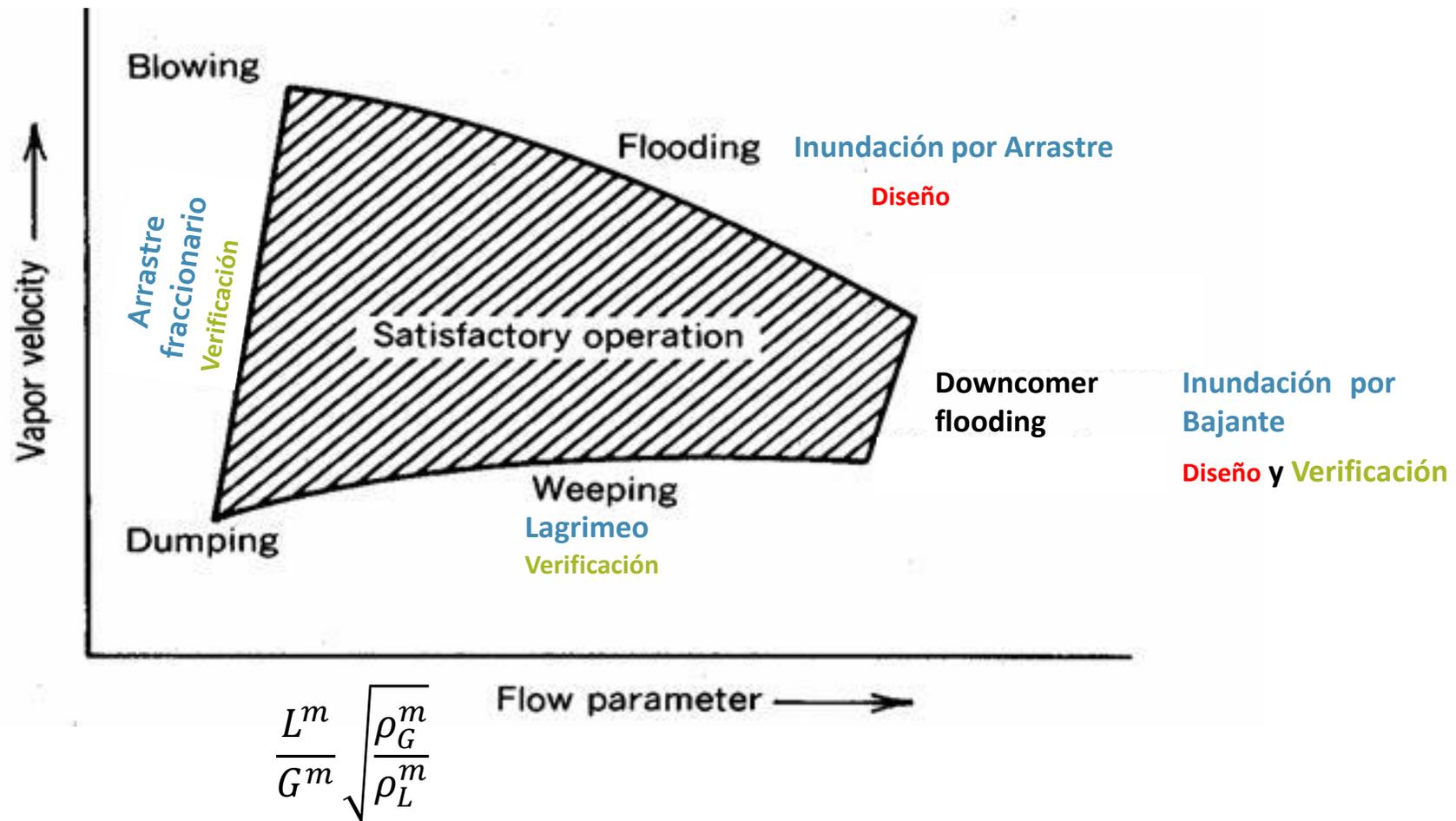
Intro Teórica – Operación estable

Gráficos



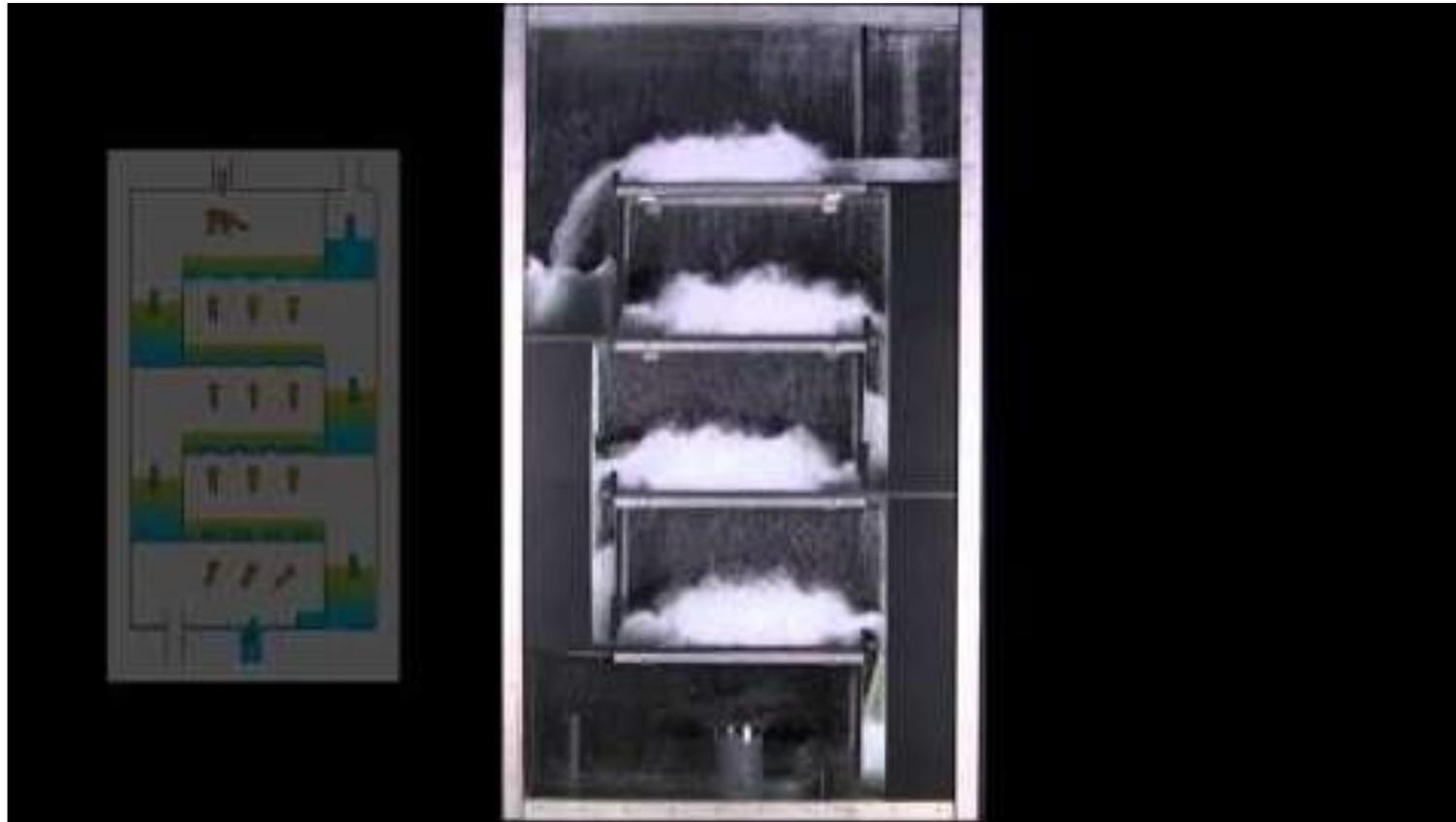
Intro Teórica – Operación estable

Gráficos



Intro Teórica – Operación estable

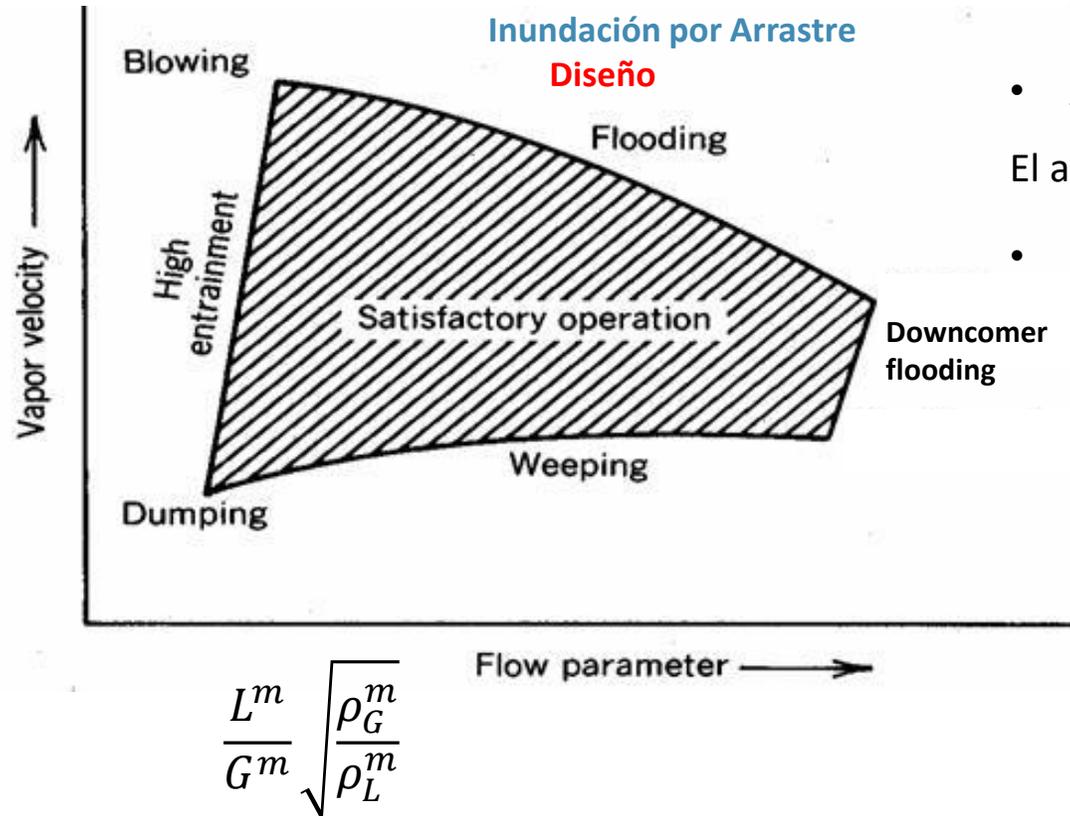
Video



https://www.youtube.com/watch?v=D0H9FWsk_Ck

Inundación por arrastre – Intro Teórica

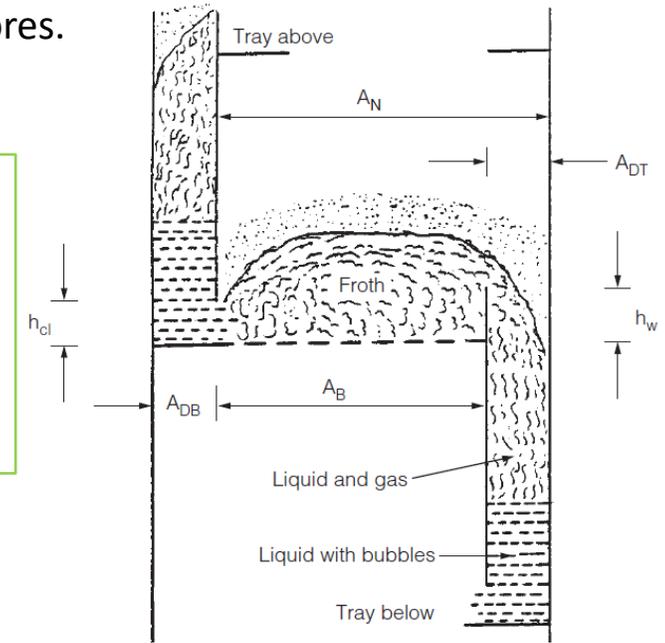
Gráfico



Características y Descripción del fenómeno

- Es el límite superior de capacidad de procesamiento de gas en columnas de platos.
- A mayor velocidad de gas, mayor altura de la espuma → El arrastre se produce cuando se alcanza el plato superior.
- Se acumula líquido en platos superiores.

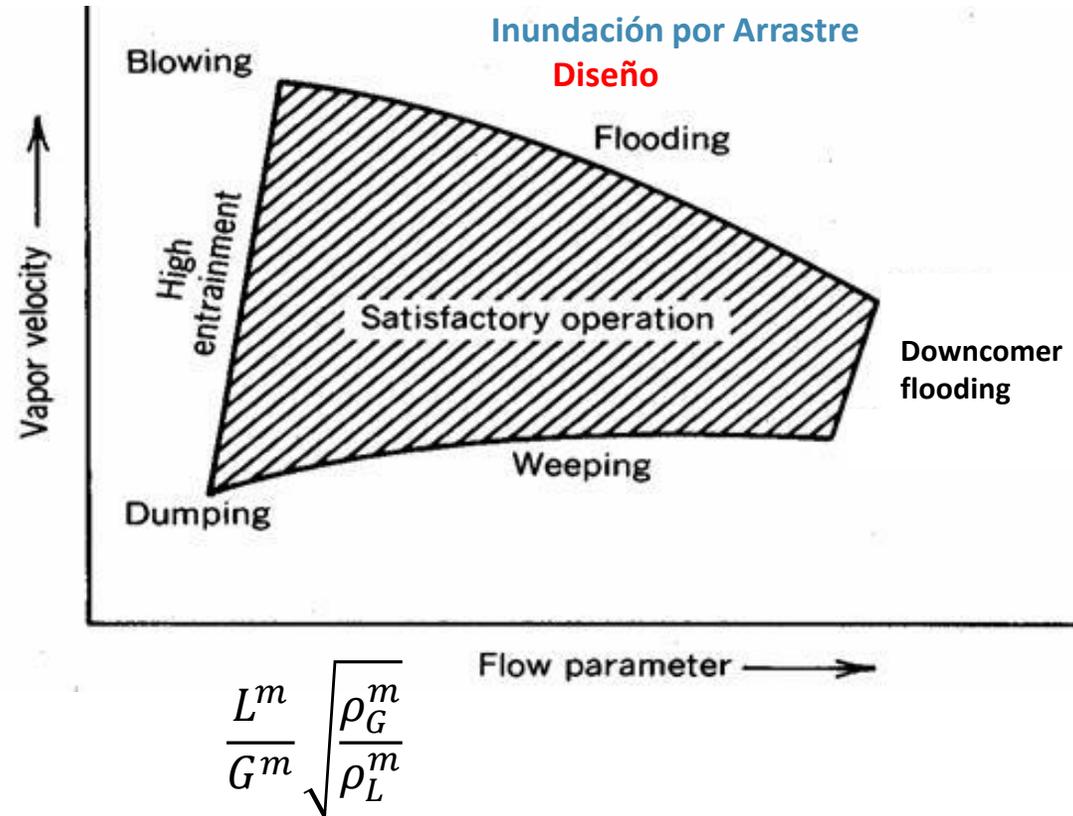
Se **diseña** para cumplir con los requerimientos del proceso, operando entre un **70% y 90%** de la inundación por arrastre.



Inundación por arrastre – Intro Teórica

Gráfico

Video

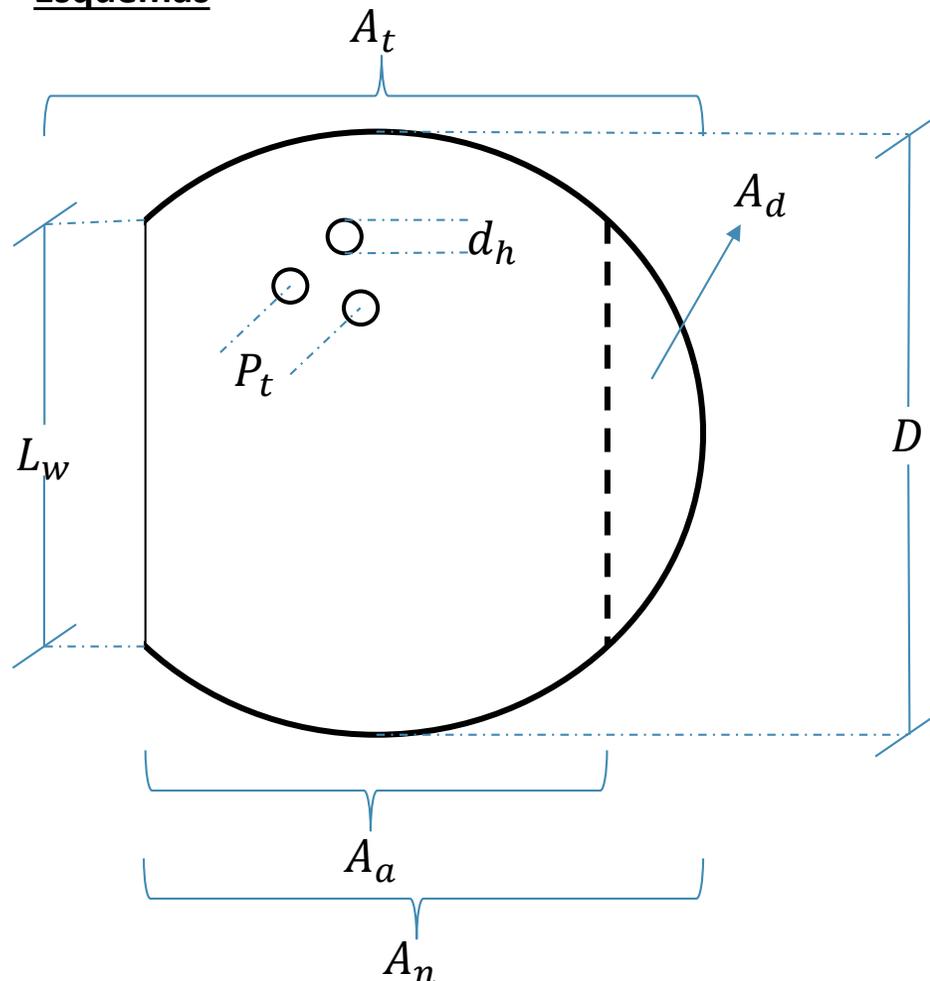


<https://www.youtube.com/watch?v=I6G8yGBpX5I>

Inundación por arrastre – Intro Teórica

Diseño de platos

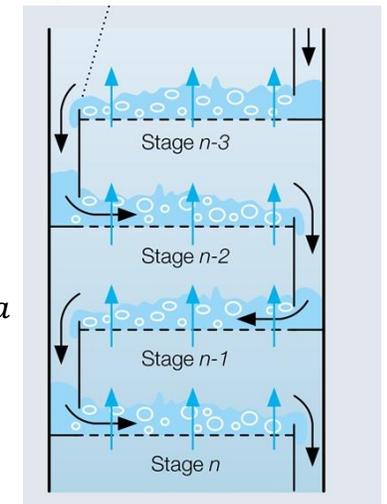
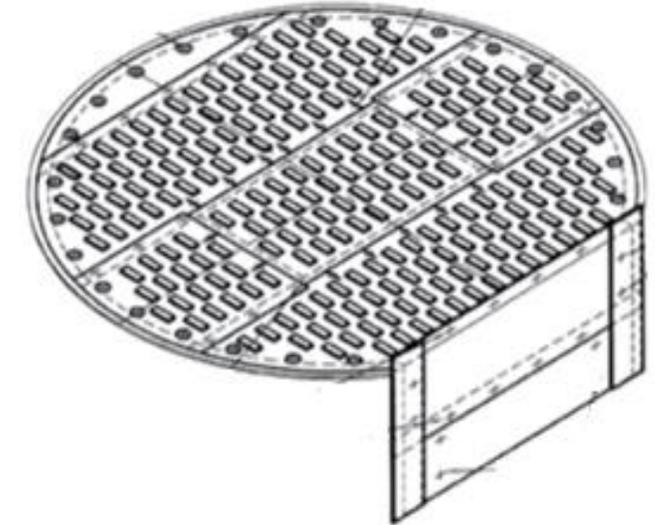
Esquemas



Nomenclatura y Simbología

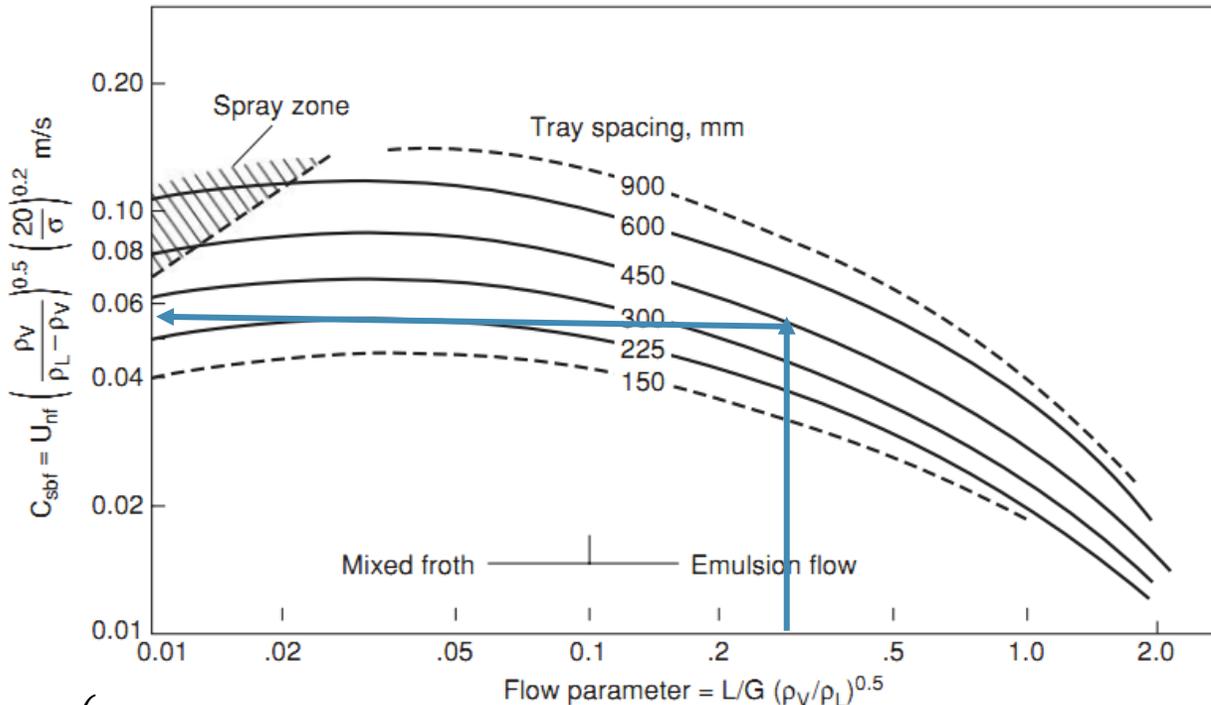
- D : Diámetro del plato.
- L_w : Longitud del vertedero (*weir*)
- d_h : Diámetro del orificio (*hole*).
- P_t : Distancia entre centros (*pitch*).
- N_h : Número de orificios.
- A_o : Área de un orificio: $A_o = \frac{\pi d_h^2}{4}$
- A_h : Área de todos los orificios: $A_h = N_h A_o = N_h \frac{\pi d_h^2}{4}$
- A_d : Área del conducto descendente (*downcomer*)
- A_a : Área activa: Es para el pasaje de burbujas
- A_n : Área neta. Área del metal del plato: $A_n = A_d + A_a$
- A_t : Área total. Es la sección de la torre

$$A_t = \frac{\pi D^2}{4} = A_n + A_d = A_a + 2A_d$$



Inundación por arrastre - Diseño

Gráfico de Souders-Brown



$$\begin{cases} [\rho_L^m] = \text{másicas} \\ [\rho_V^m] = \text{másicas} \\ \sigma = \text{dyn/cm} \end{cases}$$

- Busco que el gas circule a una velocidad **menor** a la de inundación

Para completar el plato, vamos a tomar algunos criterios geométricos típicos.

Procedimiento

- Para cada velocidad de flujo, el parámetro de Souders-Brown (C_{SB}) es tal que las partículas líquidas decantan.

Nosotros usaremos el parámetro de **INUNDACIÓN** (C_{SBf}).

- Se calcula el parámetro de flujo (F_{LG}) con **caudales máxicos**:

$$F_{LG} = \frac{L^m}{G^m} \sqrt{\frac{\rho_G^m}{\rho_L^m}} = 0,389$$

- Se interseca con la curva de iso-espaciado de plato (en este caso, es dato $t = 450$ mm) y se lee el valor del parámetro de inundación:

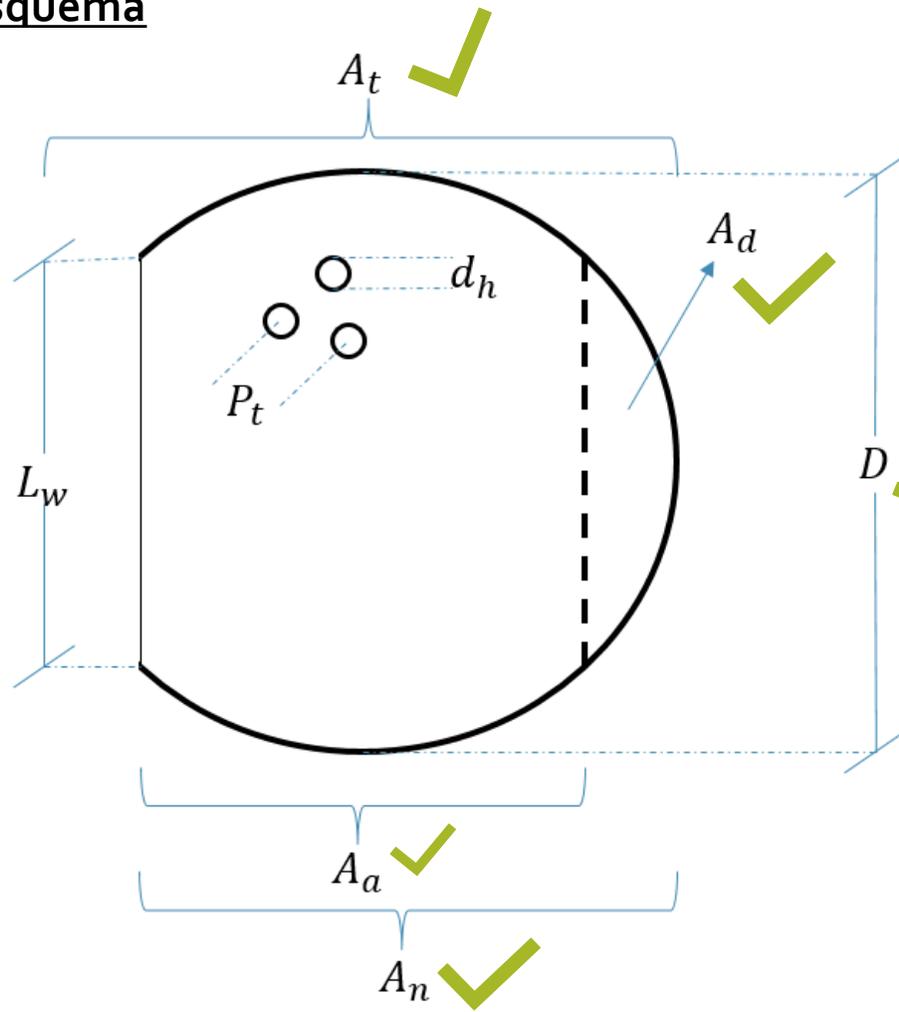
$$C_{SBf} = 0,0528 \text{ m/s}$$

- Se conocen todos los parámetros, excepto la velocidad **del gas neta** de inundación (u_{nf}). Se despeja:

$$u_{nf} = 0,122 \text{ m/s}$$

Inundación por arrastre - Diseño

Esquema



Procedimiento y criterios

- Se aplica el factor de seguridad ($SF = 0,8$): $u_n = u_{nf} \cdot SF = 0,098 \text{ m/s}$
- Se calcula el área neta $A_n = \frac{G^m}{\rho_m \cdot u} = 0,275 \text{ m}^2$
- La relación entre área del downcomer y área neta debe estar comprendida entre: $0,1 < \frac{A_d}{A_n} < 0,12$

Vamos a tomar 0,11. Con lo cual: $A_d = 0,11 \cdot A_n = 0,03 \text{ m}^2$

- Se calcula el diámetro de la torre para alojar todas esas áreas:

$$A_t = A_n + A_d = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$D = 0,623 \text{ m}$$

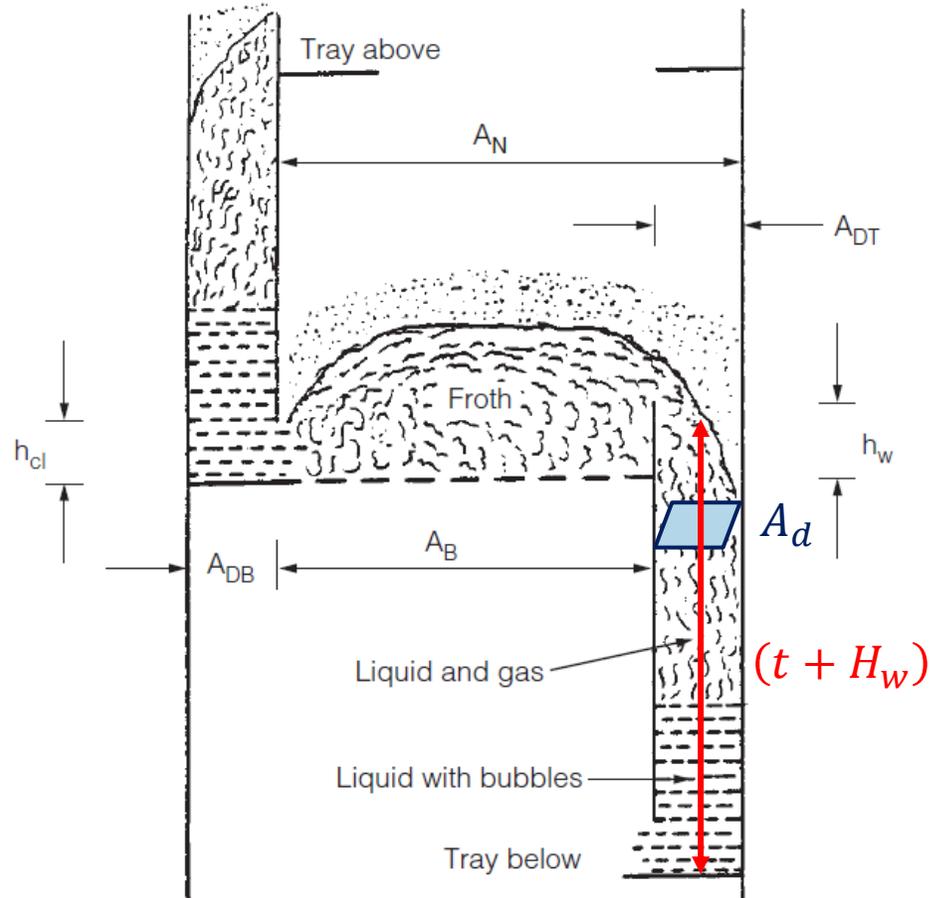
- Se debe elegir un área tal que: $\frac{A_h}{A_a} \geq 0,1$

Tomaremos 0,1. Con lo cual: $A_h = 0,1 \cdot A_a = 0,1 \cdot (A_n - A_d)$

$$A_h = 0,0245 \text{ m}^2$$

Verificación tiempo de residencia

Esquemas



Procedimiento y criterios

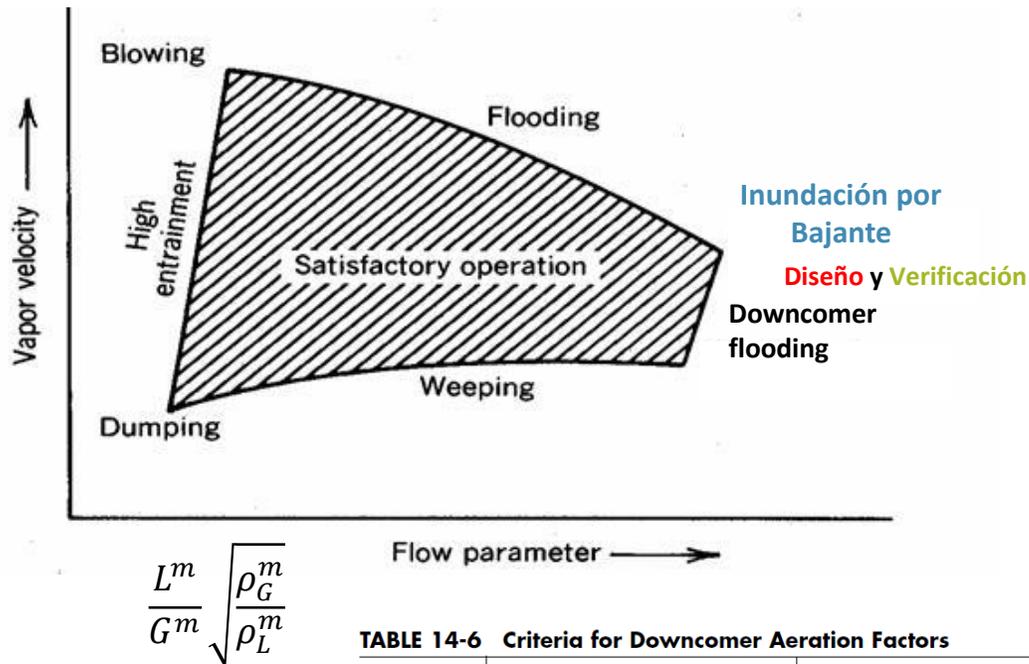
- Contando con las dimensiones del downcomer, se recomienda verificar que el tiempo de residencia en el mismo sea mayor a 5 segundos

Volumen downcomer

$$\theta_{res} = \frac{A_d * (t + H_w)}{L} = 5,1s > 5s$$

Inundación por Bajante - Intro Teórica

Gráfico



Características y Descripción del Fenómeno

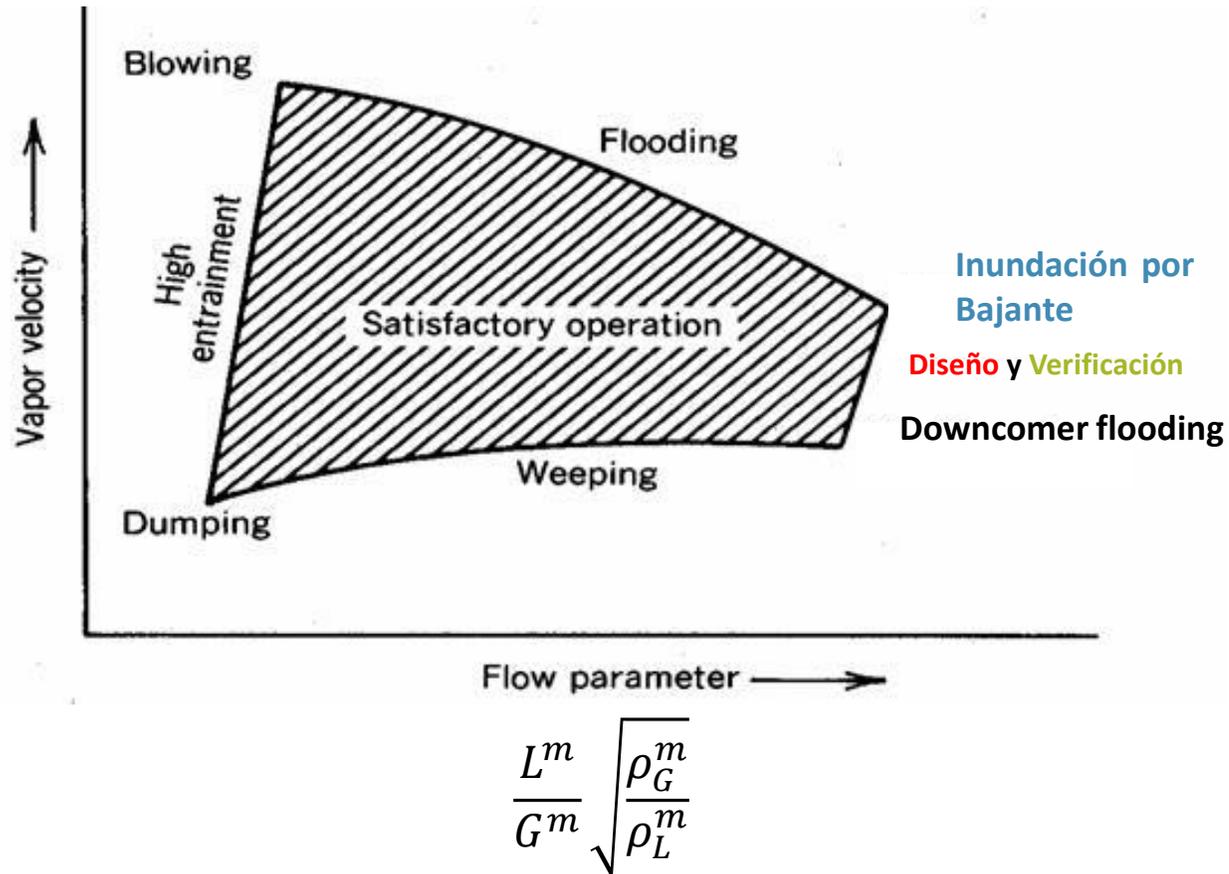
- Cada torre tiene un rango operativo estable de relación de caudales de líquido y gas. Ante aumento excesivo del caudal de líquido:
 - los conductos de bajada verán superada su capacidad,
 - se comenzará a acumular líquido dentro de la torre,
 - aumentará la pérdida de carga en la torre
- Cuando el nivel de líquido en el conducto de bajada llega hasta el plato superior, se dice que **la torre está inundada**.
- Esto producirá mezclado, arrastre e inestabilidades en el flujo.
- En sistemas tendientes a la formación de espuma, la inundación ocurre más fácilmente y las consecuencias podrían agravarse.

TABLE 14-6 Criteria for Downcomer Aeration Factors

Foaming tendency	Bolles' criterion ^o		Glitsch's criterion [†]		Fair et al.'s criterion [†]	
	Examples	ϕ_{dc}	Examples	ϕ_{dc}	Examples	ϕ_{dc}
Low	Low-molecular-weight hydrocarbons [§] and alcohols	0.6	$\rho_C < 1.0 \text{ lb/ft}^3$	0.6	Rapid bubble rise systems, such as low gas density, low liquid viscosity	0.5
Moderate	Distillation of medium-molecular-weight hydrocarbons	0.5	$1.0 < \rho_C < 3.0 \text{ lb/ft}^3$	0.5		
High	Mineral oil absorbers	0.4	$\rho_C > 3.0 \text{ lb/ft}^3$	0.4	Slow bubble rise systems, such as high gas density, high liquid viscosity, foaming systems	0.2 – 0.3
Very high	Amines, glycols	0.3				

Inundación por Bajante - Intro Teórica

Gráfico



Video

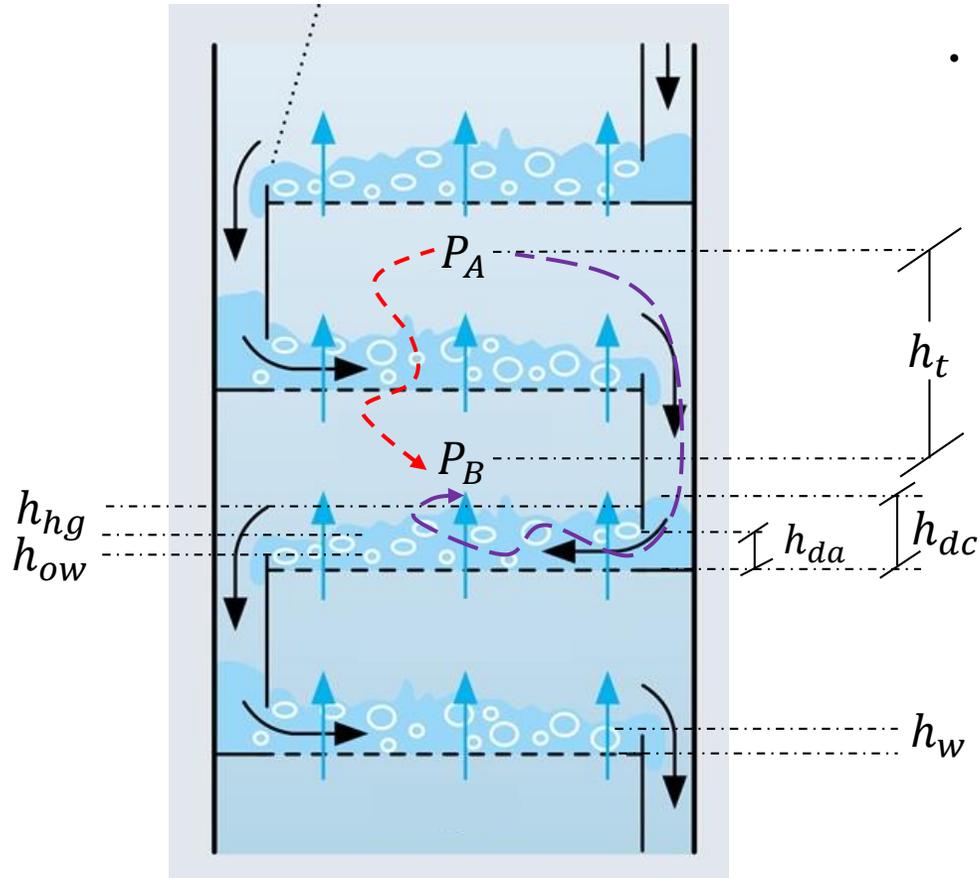


<https://www.youtube.com/watch?v=QFGKwD49oNs&t>

Inundación por Bajante – Intro Teórica

Balance de Presiones

Esquema



Matemáticas y definiciones

- Definiremos distintas “alturas”. Algunas geométricas (físicas) y otras solo representarán pérdidas de carga en las fases. Haremos un BEM a través de dos trayectorias posibles (y como es un circuito cerrado de un campo conservativo, deben arrojar el mismo resultado):

➤ Según el **camino rojo**, tenemos que: $\frac{P_B - P_A}{\rho_L^m g} \stackrel{\text{def}}{=} h_t$

➤ Según el **camino violeta**: a partir de la P_B en la fase gas, se desestima la columna de gas hasta la interfaz, se considera la interfaz en equilibrio térmico, químico y mecánico y por lo tanto la presión del lado líquido de la interfaz será igual a P_B .

Se analizan entonces las pérdidas de carga que enfrenta el flujo de líquido desde el plato superior hasta llegar a esta interfase:

$$\frac{P_A}{\rho_L^m g} + h_{dc} = h_{da} + (h_w + h_{ow}) + h_{hg} + \frac{P_B}{\rho_L^m g}$$

- Reordenando:

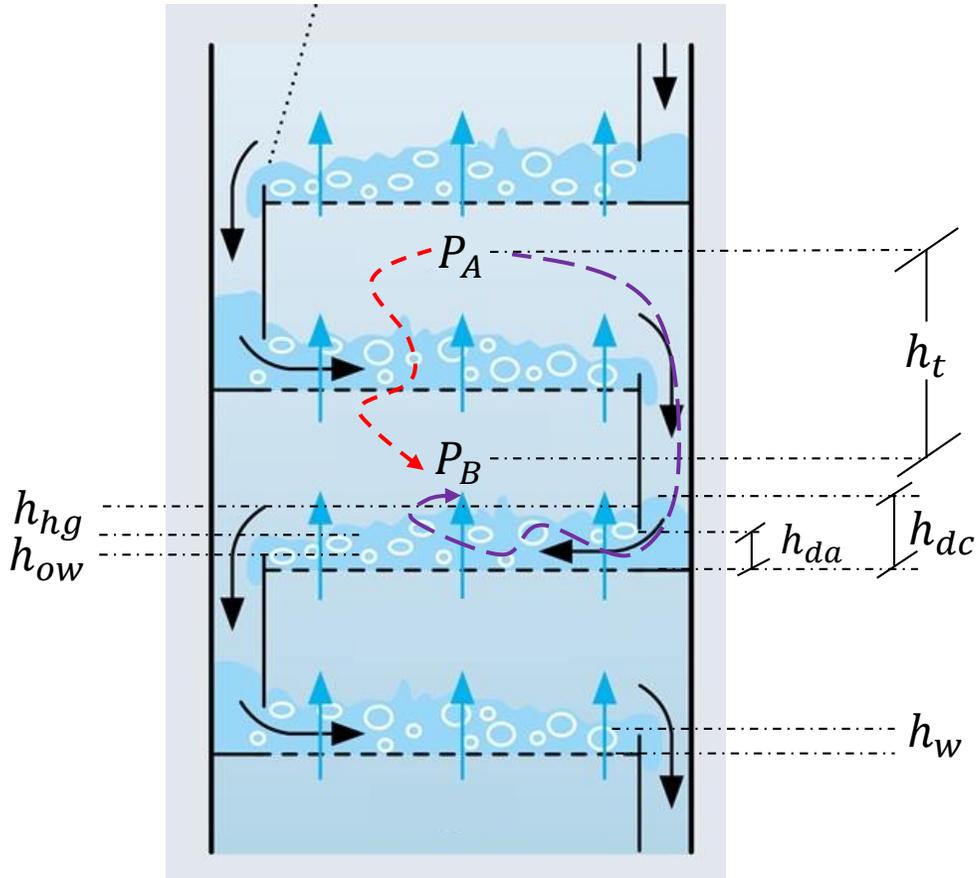
$$h_{dc} = \frac{P_B}{\rho_L^m g} - \frac{P_A}{\rho_L^m g} + h_{da} + (h_w + h_{ow}) + h_{hg}$$

$$h_{dc} = h_t + h_{da} + (h_w + h_{ow}) + h_{hg}$$

Inundación por Bajante – Intro Teórica

Balance de Presiones

Esquema



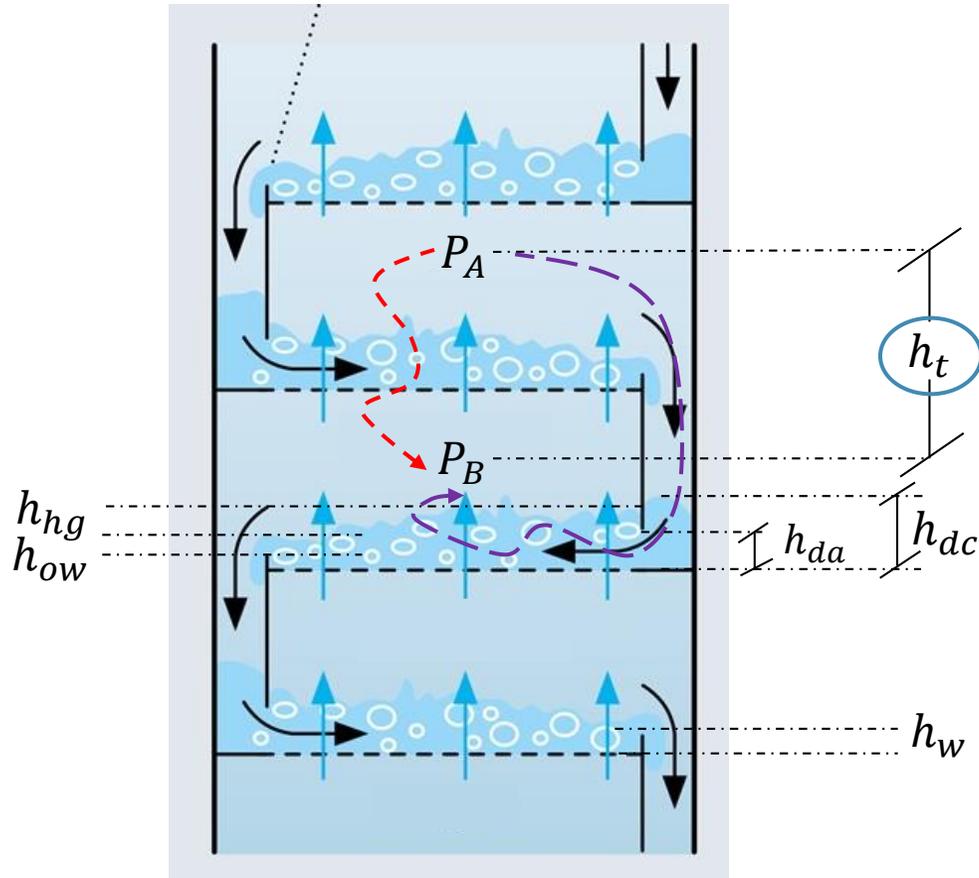
$$h_{dc} = h_t + h_{da} + (h_w + h_{ow}) + h_{ng}$$

Nomenclatura y simbología

- h_t : Pérdida de carga en el plato expresada en alturas (*tray*)
- h_{dc} : Altura de líquido en el conducto de bajada (*downcomer*)
- h_{da} : Pérdida de carga por expansión (*downcomer aperture*)
- h_{ng} : Altura de gradiente hidráulico (*hydraulic gradient*)
- h_w : Altura del vertedero (*weir*)
- h_{ow} : Altura de la cresta sobre el vertedero (*over weir*)

Inundación por Bajante – Verificación

Esquema



Análisis de h_t

$$h_t \stackrel{\text{def}}{=} h_D + h'_L$$

Nomenclatura y simbología

- h_t : Pérdida de carga en el plato (*tray*)
- h_D : Pérdida de carga en el plato seco (*dry*)
- h'_L : Pérdida de carga en la masa de líquido (*liquid*)

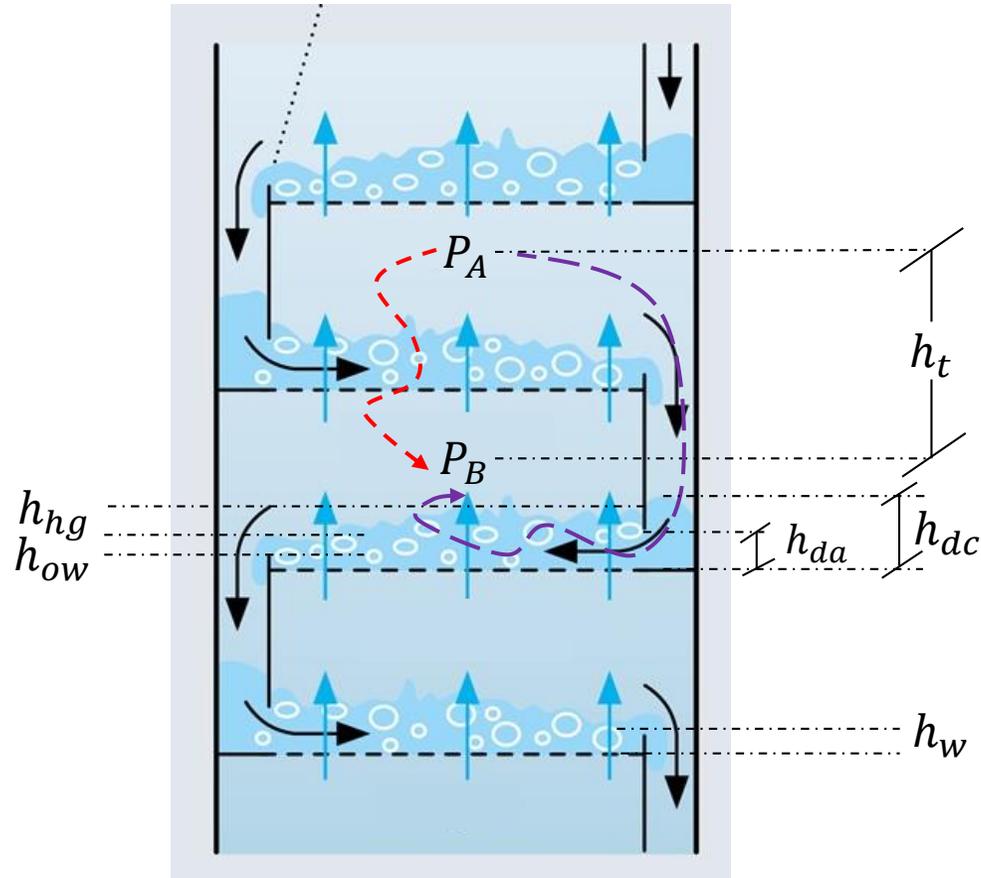
$$h_t = h_D + h'_L = h_d + \beta \cdot h_{LS} = h_d + \beta \cdot \left(h_w + h_{ow} + \frac{1}{2} h_{ng} \right)$$

Nomenclatura y simbología

- h_{LS} : Pérdida de carga por el sello hidráulico (*hydraulic seal*)
- β : Factor de aireación.

Inundación por Bajante – Verificación

Esquema



$$h_t = h_d + h'_L = h_D + \beta \cdot h_{LS} = h_d + \beta \left(h_w + h_{ow} + \frac{1}{2} h_{hg} \right)$$

Pérdida de carga en el plato seco:

Como dato del proveedor se sabe que:

- Válvula parcialmente abierta: $h_D = 1,35 \cdot e \cdot \frac{\rho_m}{\rho_L} + 272 \cdot K_1 \cdot V_h^2 \cdot \frac{\rho_G^m}{\rho_L^m} [=] \text{ mm}$
- Válvula está totalmente abierta: $h_D = 272 \cdot K_2 \cdot V_h^2 \cdot \frac{\rho_G^m}{\rho_L^m} [=] \text{ mm}$

Se deberá elegir entre dos válvulas:

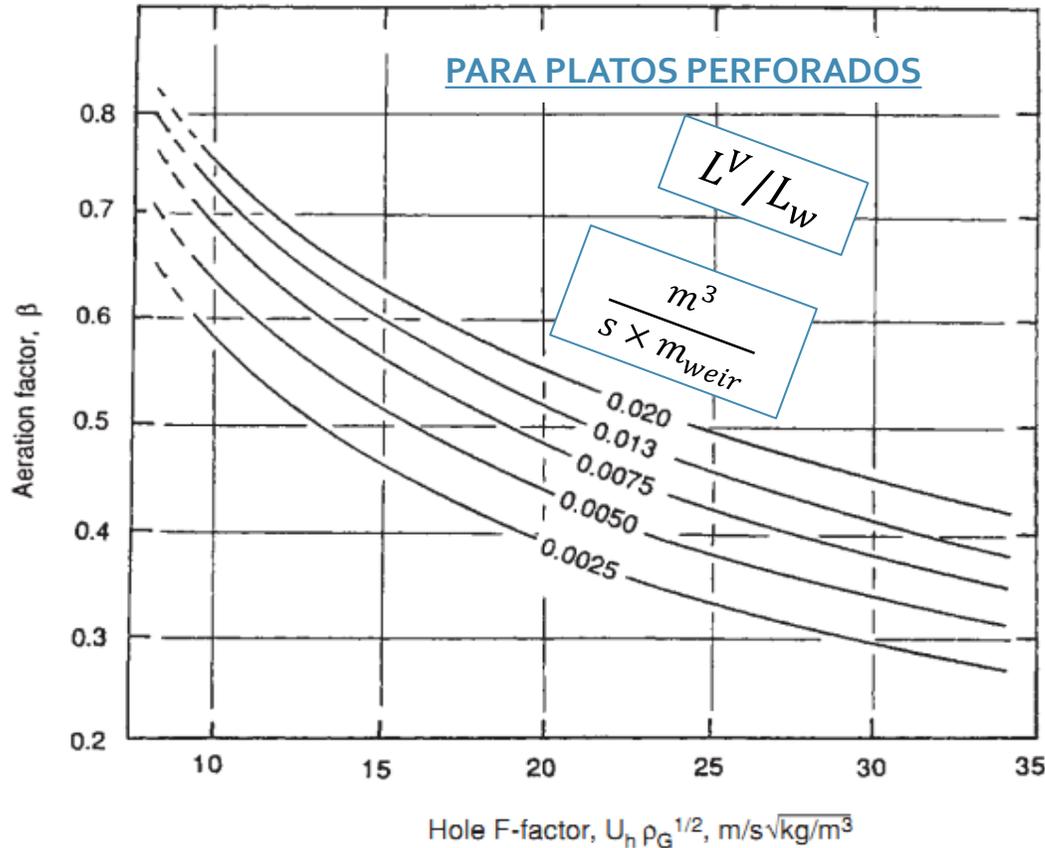
Válvula	K_1	e (mm)			
		1,88	2,67	3,4	6,35
		K_2			
Glitch V1	0,2	1,05	0,92	0,82	0,5
Glitch V4	0,1	0,5	0,39	0,3	-

- Elegimos la válvula de mayor DP para tener idea de órdenes de magnitud.
- Se recomienda $0,4 < e/d_h < 0,7$. Lo más cerca, sería tomar $e = 6,35 \text{ mm}$, $\rho_m = 7850 \text{ kg/m}^3$

$$h_D = 125,4 \text{ mm}$$

Inundación por Bajante – Verificación

Gráfico



$$h_t = h_d + h'_L = h_D + \beta \cdot h_{LS} = h_d + \beta \cdot \left(h_w + h_{ow} + \frac{1}{2} h_{ng} \right)$$

Factor de aireación:

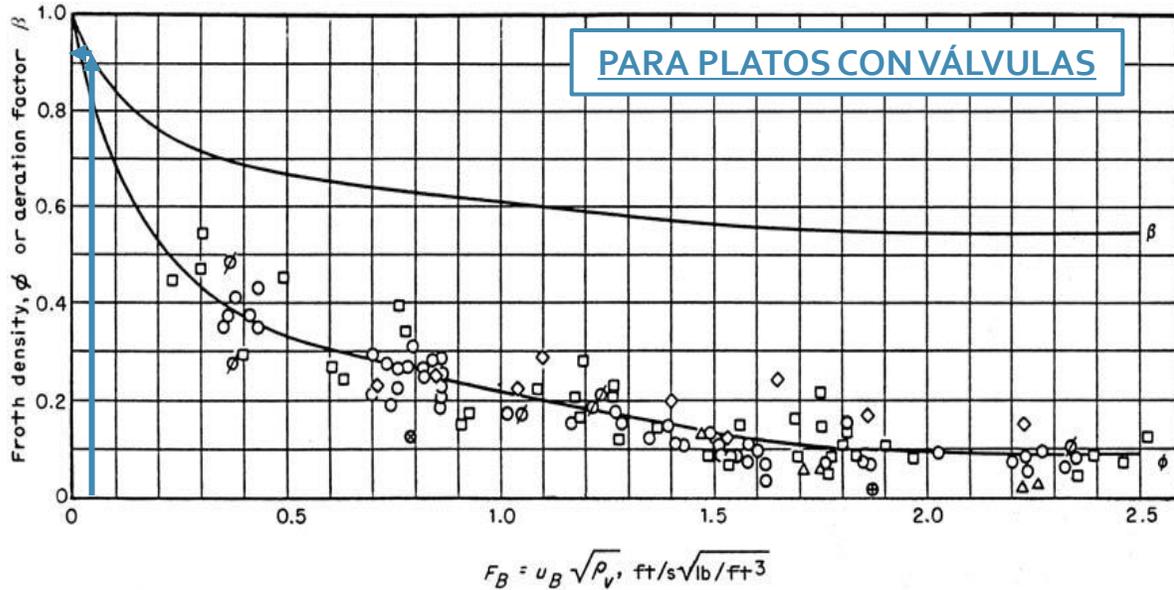
- Responde a la presencia de gas en el líquido.
- La velocidad debe tomarse respecto del área de agujeros A_h .

Usaremos otro gráfico para poder obtener el factor de aireación, pues este no es para platos con válvulas



Inundación por Bajante – Verificación

Gráficos



$$h_t = h_d + h'_L = h_D + \beta \cdot h_{LS} = h_d + \beta \cdot \left(h_w + h_{ow} + \frac{1}{2} h_{hg} \right)$$

Factor de aireación:

- Responde a la presencia de gas en el líquido.
- La velocidad debe tomarse respecto del Área Activa A_a : el subíndice B indica que es por la zona de burbujeo (bubbling).

$$\begin{cases} u_b = 0,036 \text{ ft/s} \\ F_b = 0,06 \text{ ft/s} \sqrt{\text{lb/ft}^3} \\ \beta = 0,9 \end{cases}$$

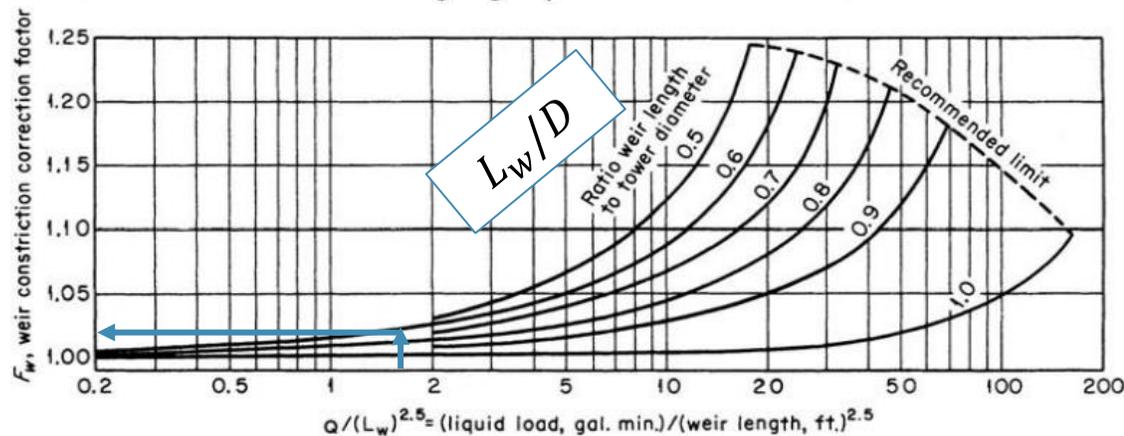
Sello hidráulico h_{LS} :

- La altura del vertedero es dato: $h_w = 50 \text{ mm}$.
- La altura de la cresta sobre el rebosadero se calcula con una ecuación y un gráfico:

$$h_{ow} = 664 \cdot \left(\frac{L^V}{L_w} \right)^{2/3} \cdot F_w \quad \begin{matrix} [L^V] = \text{m}^3/\text{s} \\ [L_w] = \text{m} \\ [h_{ow}] = \text{mm} \end{matrix}$$

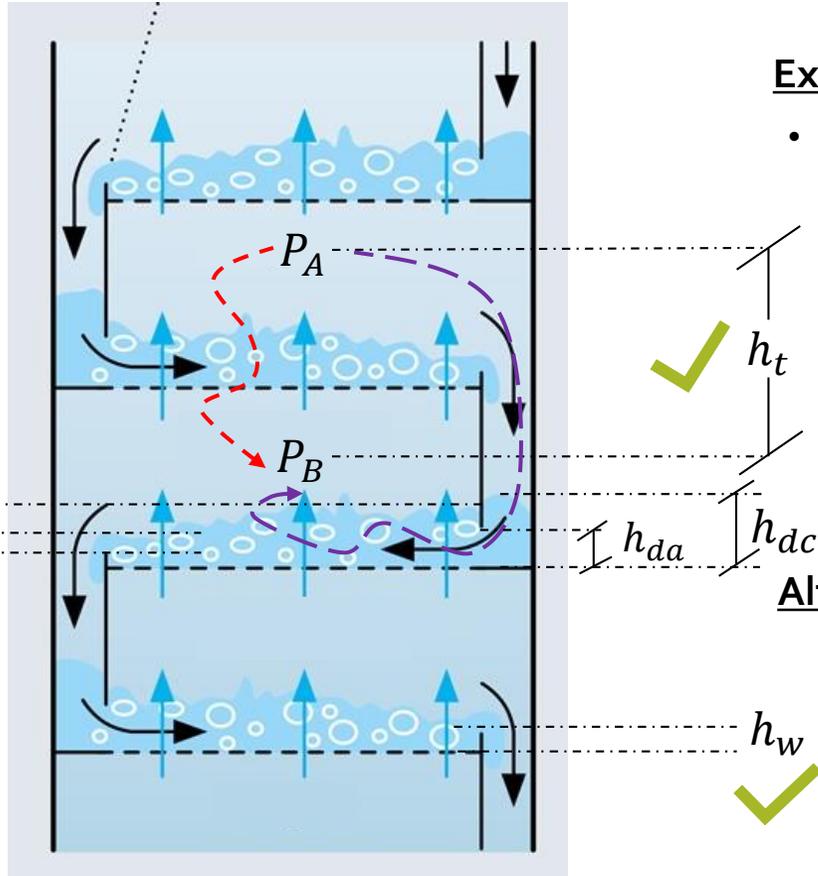
$$h_{ow} = 25,59 \text{ mm}$$

- La pérdida de carga h_{hg} es nula para platos con orificios.
- Como no tenemos información para estas válvulas, vamos a considerar que es desestimable frente a los otros factores



Inundación por Bajante – Verificación

Esquema



Balance de Presión

$$h_t + h_{da} + (h_w + h_{ow}) + h_{hg} = h_{dc}$$

Expansión brusca h_{da} :

- Pérdida de carga del líquido para pasar a través de la luz entre la proyección del vertedero y el plato inferior:

$$h_{da} = 165,2 \cdot \left(\frac{L^V}{A_{da}} \right)^2$$

$$[L^V] = \text{m}^3/\text{s} \quad [A_{da}] = \text{m}^2 \quad [h_{da}] = \text{mm}$$

$$A_{da} = L_w \cdot (h_w - 5 \text{ a } 15 \text{ mm}) = 0,0158 \text{ m}^2$$

$$h_{da} = 5,80 \text{ mm}$$

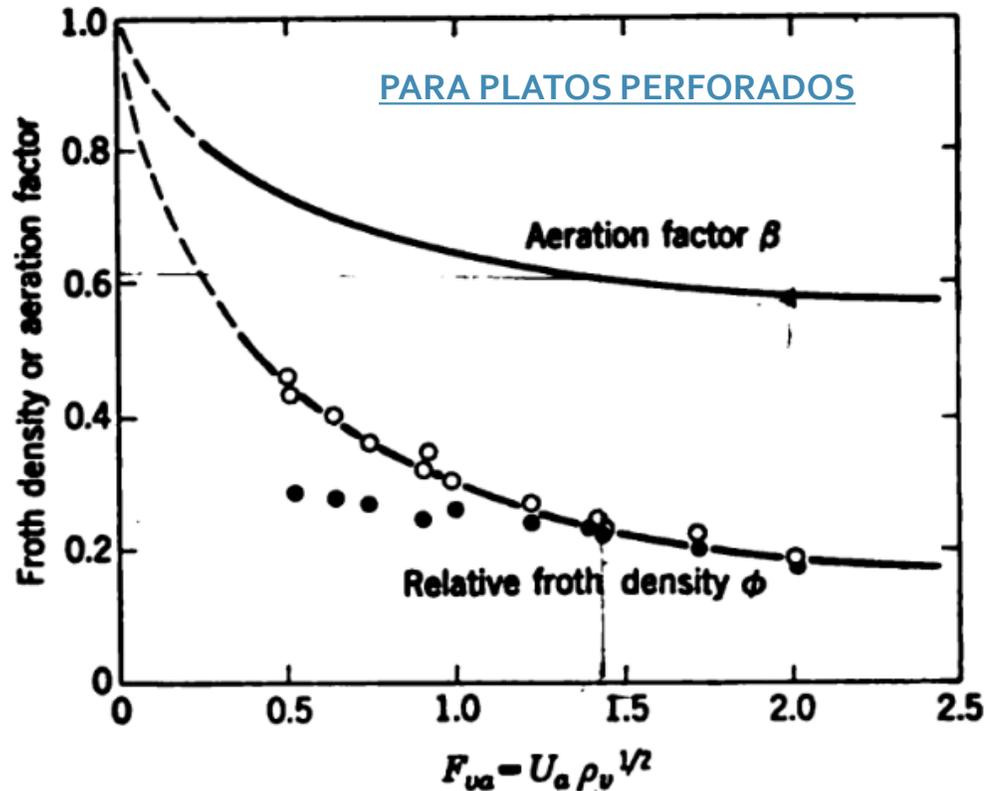
Altura del downcomer h_{dc} :

$$\begin{aligned} h_t + h_{hg} + h_{da} + (h_w + h_{ow}) &= \left[h_d + \beta \left(h_w + h_{ow} + \frac{1}{2} h_{hg} \right) \right] + h_{da} + (h_w + h_{ow}) = \\ &= \left[125,4 + 0,9 \left(50 + 25,6 + \frac{1}{2} \cdot 0 \right) \right] + 5,8 + (50 + 25,6) = (125,4 + 68,04) + 5,8 + (50 + 25,6) \end{aligned}$$

$$h_{dc} = 274,9 \text{ mm}$$

Inundación por Bajante – Verificación

Gráfico



Aeration factor for sieve and bubble-cap trays. {Part a from B. D. Smith, Design of Equilibrium Stage Processes, Copyright © 1963, by McGraw-Hill. Inc.

$$\frac{h_{dc}}{\phi} < t$$

Factor de espuma Φ :

- Aumento de nivel del downcomer debido a la presencia de espuma.
- Es uno de los factores que más impacta en el cálculo de alturas. Se debe tener cuidado a la hora de evaluarlo.
- La velocidad del gas está basada en el área activa (A_a).
- Las unidades son:

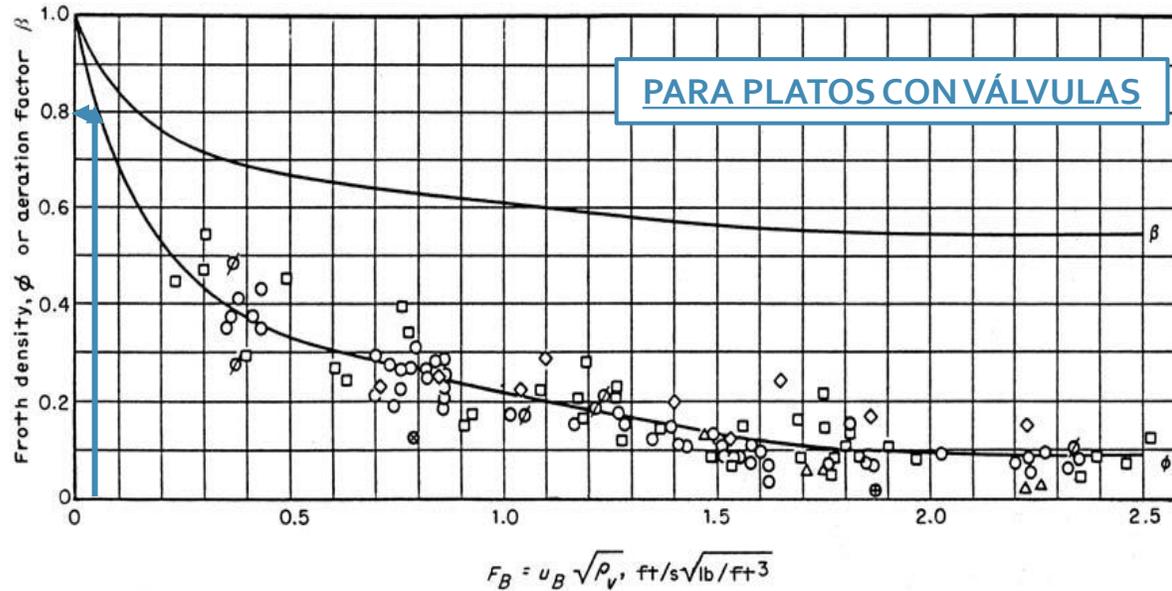
$$[U_a] = \text{ft/s} \quad [\rho_v] = \text{lb/ft}^3 \quad [h_{da}] = \text{mm}$$

Usaremos otro gráfico para poder obtener el factor de espuma, pues este no es para platos con válvulas



Inundación por Bajante – Verificación

Gráfico



$$\frac{h_{dc}}{\phi} < t$$

Factor de espuma Φ :

- Aumento de nivel del downcomer debido a la presencia de espuma.
- La velocidad debe tomarse respecto del Área Activa A_a . El subíndice B indica que es por la zona de burbujeo (*bubbling*).

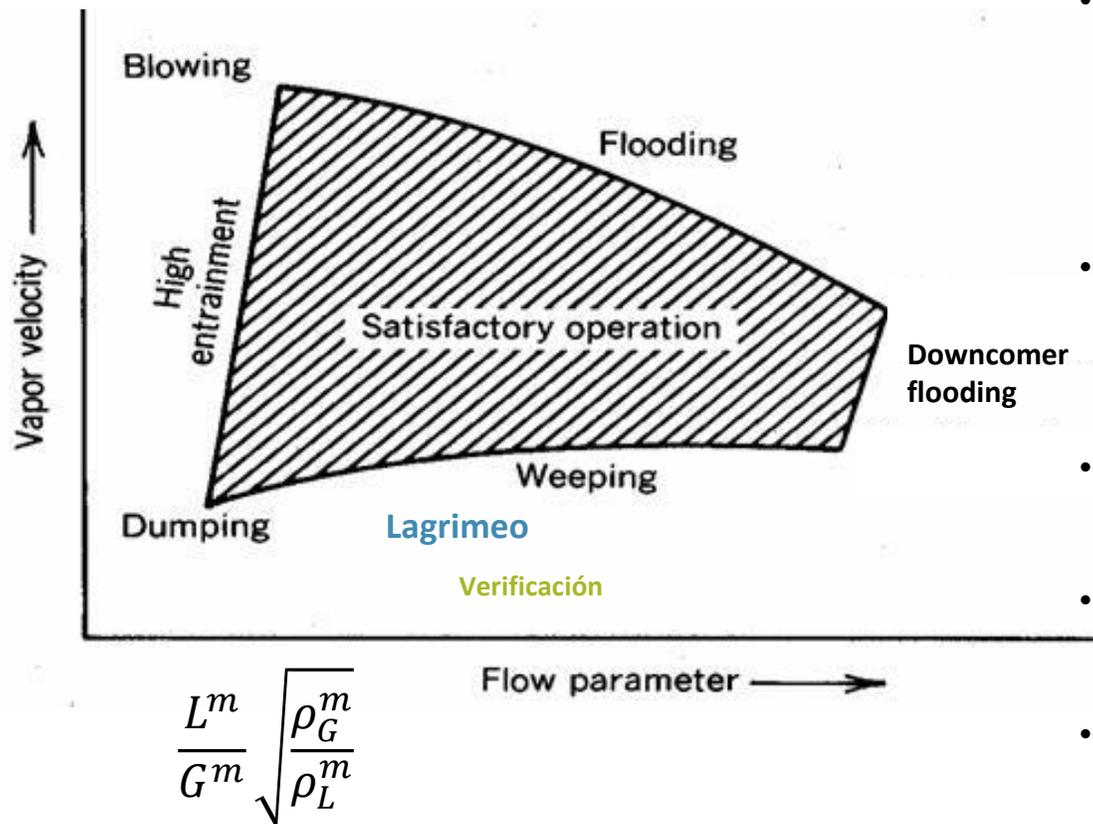
$$\begin{cases} u_B = 0,036 \text{ ft/s} \\ F_b = 0,06 \text{ ft/s} \sqrt{\text{lb}/\text{ft}^3} \\ \phi = 0,8 \end{cases}$$

$$\frac{h_{dc}}{\phi} = 343,6 \text{ mm} < t$$

VERIFICA! (con más de un 20% de margen)

Lagrimeo – Intro Teórica

Gráfico

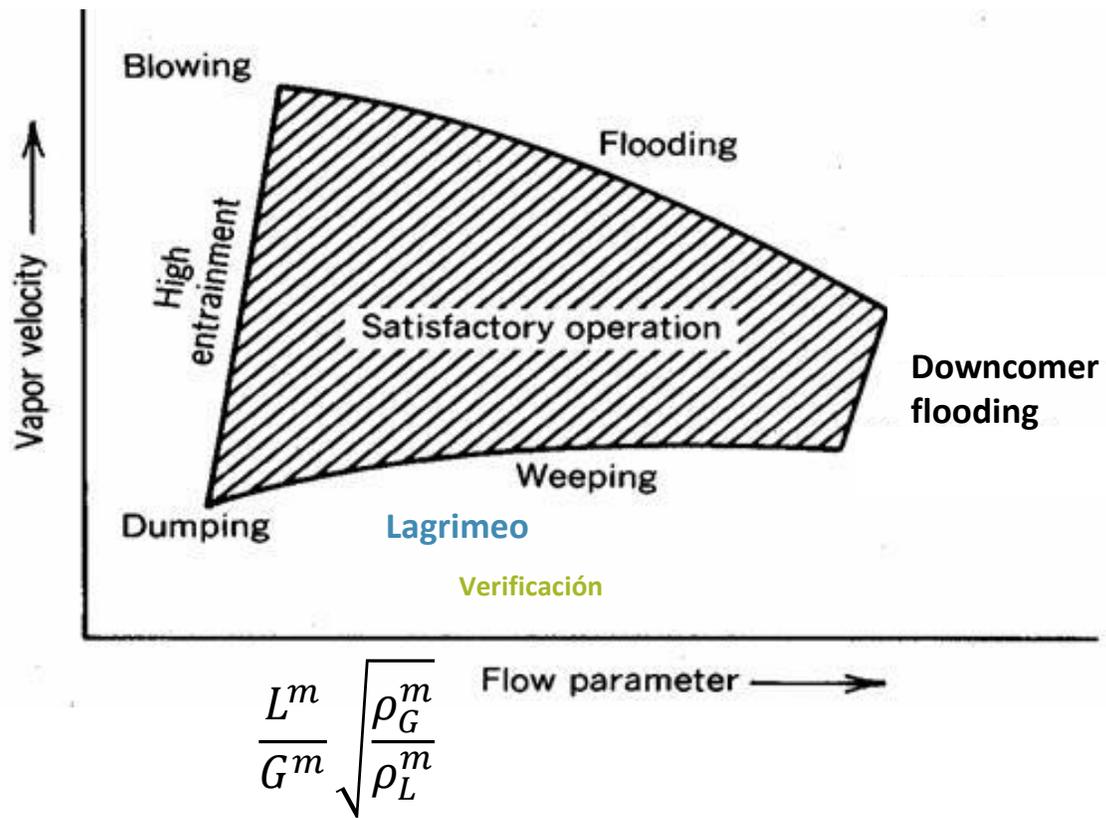


Características y Descripción del Fenómeno

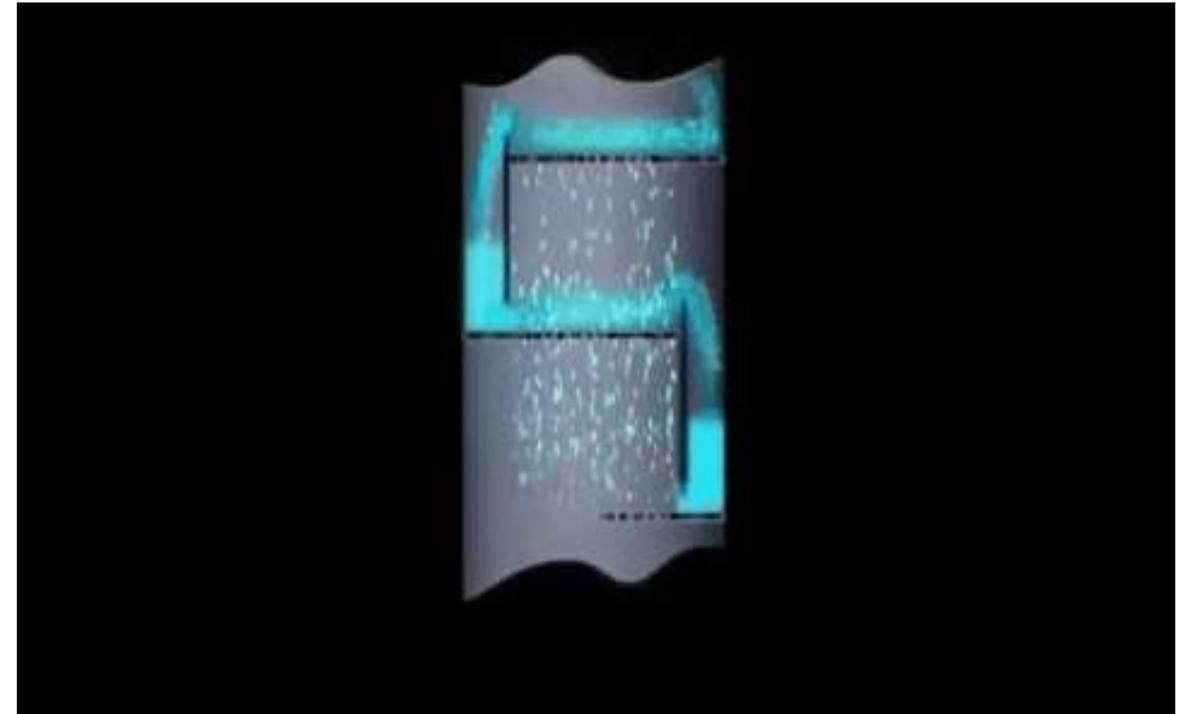
- Existe lagrimeo cuando el líquido desciende al plato inferior a través de los orificios, cortocircuitando la zona de contacto. Baja la eficiencia de la torre.
- Existe un balance de cantidad de movimiento entre el nivel de líquido en el plato y el flujo convectivo del gas que sube → el lagrimeo ocurre cuando el flujo a través de los orificios no es suficiente para soportar la altura estática del líquido y espuma en el plato.
- En **etapa de diseño**, el principal factor que afecta el lagrimeo es el Área de agujeros (A_h) → Cuanto mayor es, menor es el DP del gas a través del plato (h_t), y por lo tanto menor la altura de líquido que puede soportar.
- El punto de lagrimeo se considera como el límite inferior de diseño para el caudal de gas.
- En **etapa operativa**, mayores caudales de líquido y mayores niveles en los platos aumentan el riesgo de lagrimeo.
- Se dice que siempre hay algo de lagrimeo debido a oscilaciones en el caudal de líquido circulante, aunque esto no tiene gran impacto en la eficiencia del plato.

Lagrimeo – Intro Teórica

Gráfico



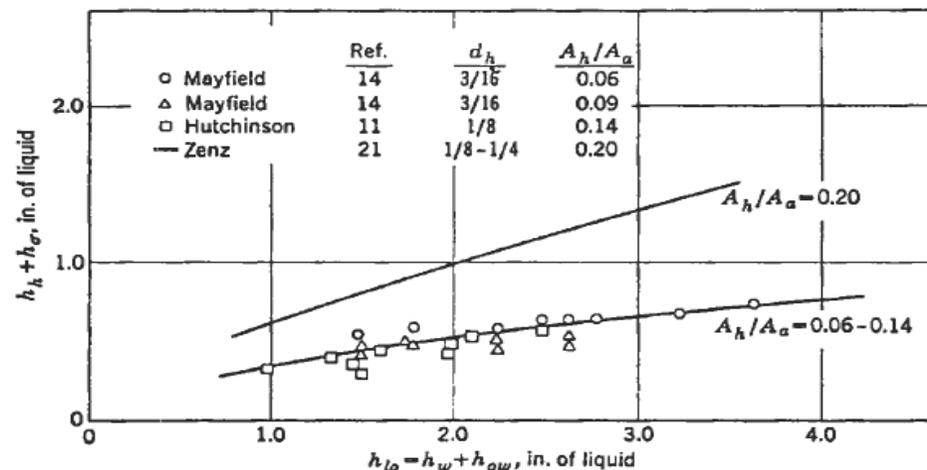
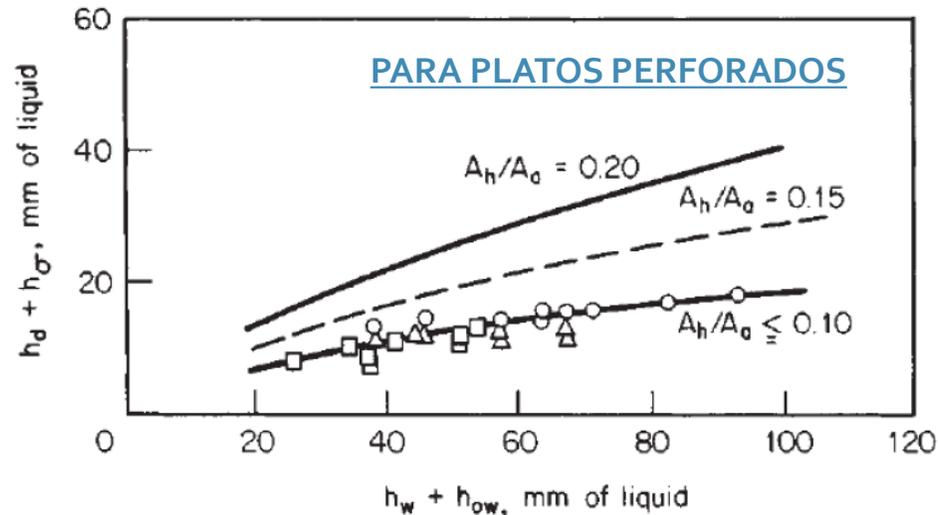
Video



https://www.youtube.com/watch?v=6Olr_lliW-k

Lagrimeo – Verificación

Gráficos



Procedimiento

- *Abscisas:* Los valores ya fueron calculados anteriormente.
- *Ordenadas:* se requiere conocer:
 - la pérdida de carga en el plato seco (h_d): ya calculada
 - la pérdida de carga que debe vencer la superficie de la gota que se forma en los agujeros del plato para caer. Se calcula según:

$$h_\sigma = 409 \cdot \left(\frac{\sigma}{d_H \cdot \rho_L^m} \right)$$

$$[\sigma] = \text{mN/m} \quad [d_h] = \text{mm} \quad [\rho_L^m] = \text{kg/m}^3 \quad [h_\sigma] = \text{mm}$$

- Con la abscisa y la ordenada se entra al gráfico y se obtiene un punto.
- Si queda por encima de la línea de $A_h/A_a \rightarrow$ No lagrimea (apreciablemente)

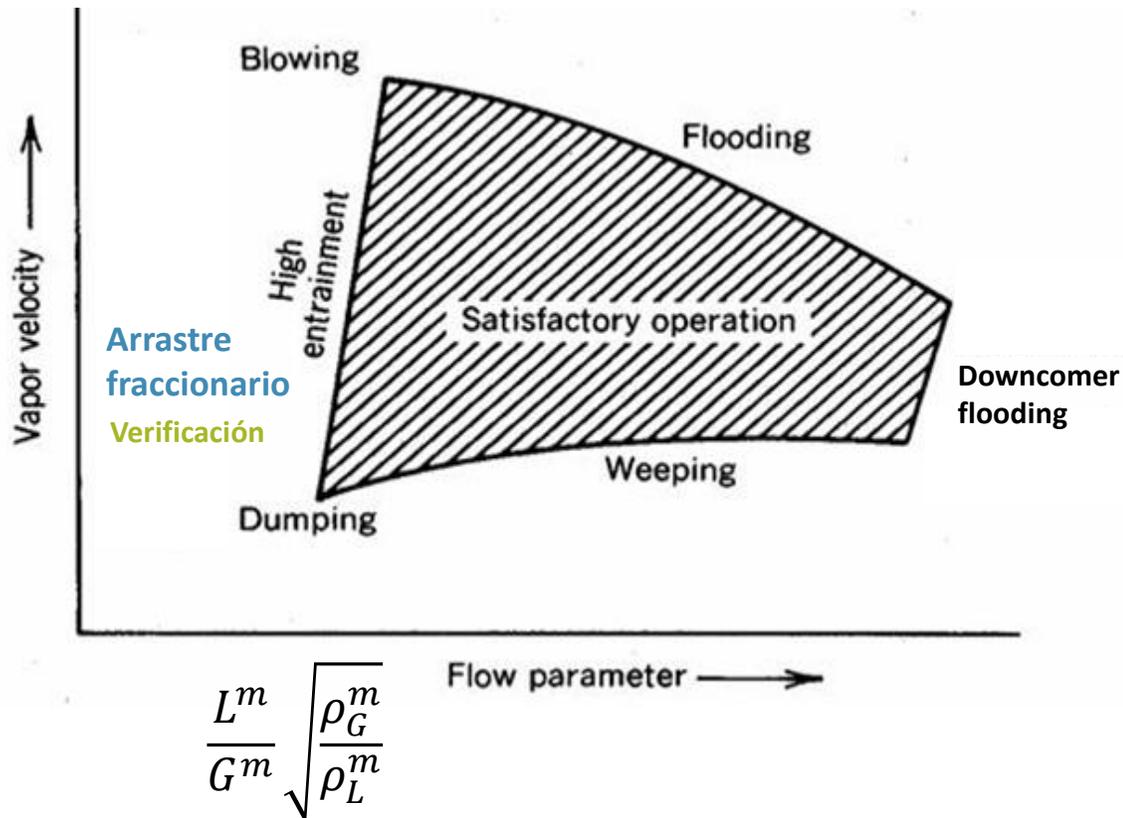
El lagrimeo se debe verificar para platos perforados.

Nuestro ejercicio cuenta con plato de válvulas \rightarrow

no se realiza esta verificación (se considera que no lagrimea)

Arrastre Fraccionario – Intro Teórica

Gráfico

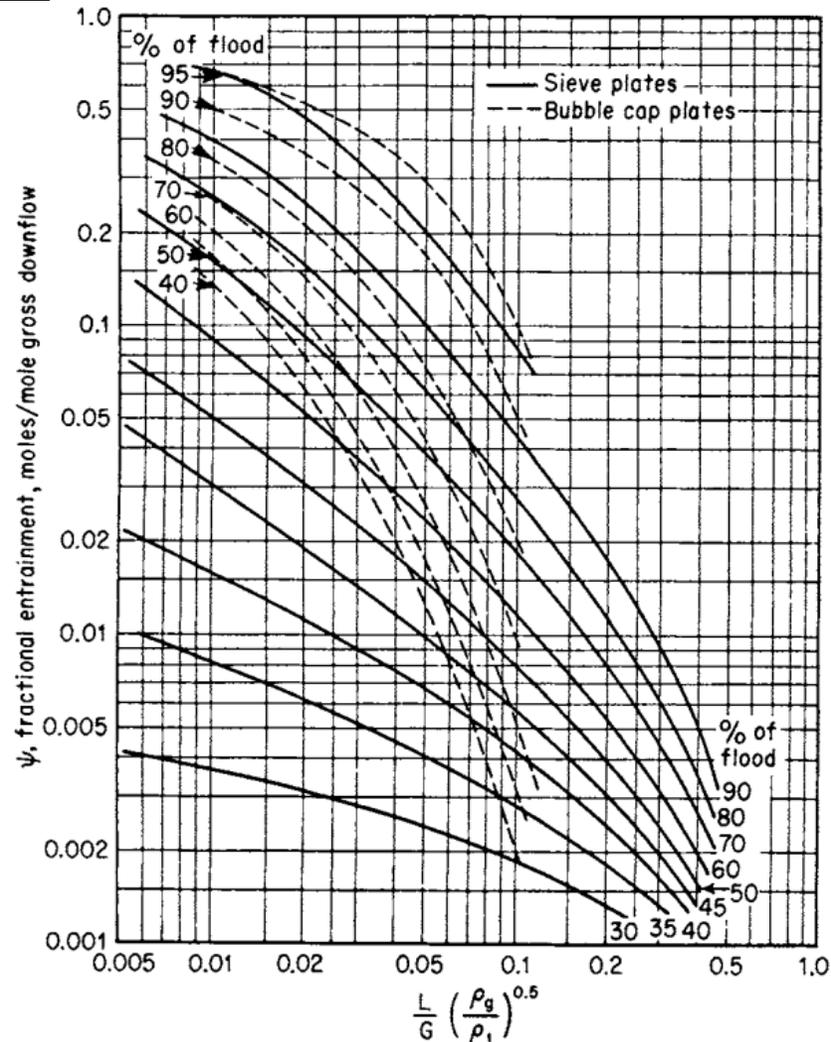


Características y Descripción del Fenómeno

- Arrastre de pequeñas gotas de líquido hacia el plato superior, mezclando dos líquidos con composiciones distintas.
- Empeora la transferencia, bajando la eficiencia de los platos.
- En sistemas de baja presión, la velocidad del gas no tiene impacto apreciable en el arrastre → más difícil de “controlar”.
- Si a caudal constante de gas, se aumenta el caudal de líquido: el arrastre primero disminuye debido a que se dificulta más la generación de gotas. Si se aumenta demasiado el líquido el arrastre comienza a ser más importante, ya que se disminuye la distancia efectiva entre los platos.
- El arrastre disminuye:
 - A mayor espaciado entre platos (más distancia para que las gotas puedan caer)
 - A mayor tamaño de orificios

Arrastre Fraccionario – Verificación

Gráfico



Procedimiento

- *Abscisas:* los valores ya fueron calculados anteriormente.
- *Ordenadas:* El valor de ψ se define como:

$$\psi = \frac{e}{L + e}$$

$$e = \text{caudal de líquido arrastrado} \left(\frac{\text{mol}}{\text{tiempo}} \right)$$

$$L = \text{Caudal de líquido que baja por la torre, sin considerar el arrastre} \left(\frac{\text{mol}}{\text{tiempo}} \right)$$

- El porcentaje de inundación se definió previamente en la etapa de diseño por inundación por arrastre.
- Se entra con el valor de abscisas hasta la curva de inundación, y se lee el valor de ψ en ordenadas.

No se recomienda trabajar con valores de $\psi > 0,1$
(implica mucho arrastre y por lo tanto una operación con baja eficiencia del plato)



¿PREGUNTAS?