

# FLOTACIÓN

---

## FUNDAMENTOS E CASOS PRÁCTICOS



Marzo 2023

## **Autor**

*Gumersindo Feijoo*

Grupo de Biotecnología Ambiental. Departamento de Enxeñaría Química

Centro Interdisciplinar de Tecnoloxías Ambientais (CRETUS)

Universidade de Santiago de Compostela

Correo-e: [gumersindo.feijoo@usc.gal](mailto:gumersindo.feijoo@usc.gal)

LinkedIn & Twitter: @feijoo\_costa

Portal de Investigación: [GUMERSINDO FEIJOO COSTA - Universidade de Santiago de Compostela \(usc.gal\)](http://GUMERSINDO_FEIJOO_COSTA_-_Universidade_de_Santiago_de_Compostela_(usc.gal))

### **Páxinas web:**

Biogroup: [www.usc.gal/biogroup](http://www.usc.gal/biogroup)

CRETUS: [www.usc.gal/cretus](http://www.usc.gal/cretus)



## Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
2. FLOTACIÓN NATURAL	2
3. FLOTACIÓN FORZADA	4
3.1. Variábeis de diseño na flotación forzada	6
3.2. Diseño de tanques de flotación	11
4. CASOS PRÁCTICOS	13
5. REFERENCIAS	21

# 1. INTRODUCCIÓN

## FLOTACIÓN

A flotación é unha operación unitaria de separación sólido-líquido na que se separan partículas sólidas ou líquidas de menor densidade que a da fase líquida a tratar.

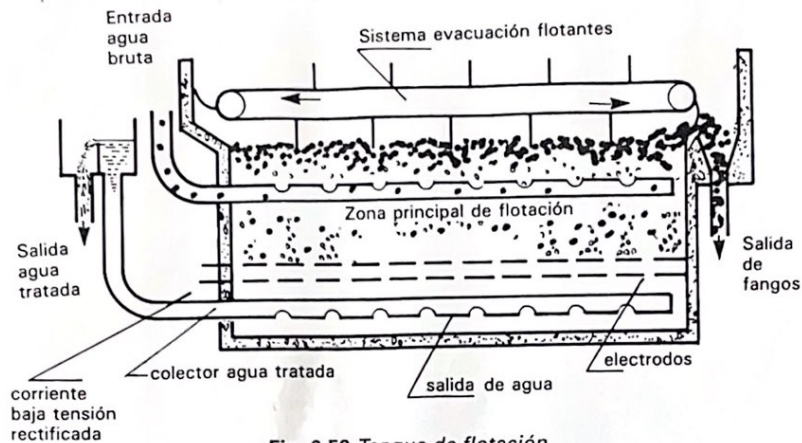


Fig. 6-59 Tanque de flotación

Os tipos de flotación tamén poden clasificarse en función do grado de interacción entre as partículas ó igual que sedimentación. Poderíamos falar de flotación sinxela de partículas discretas, flotación difusa de partículas floculadas, flotación por zonas e flotación por compresión.

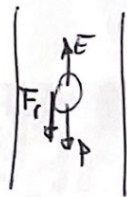
Mais neste caso unha clasificación dos procesos de flotación en dous grandes grupos:

- a.- Flotación natural
- b.- Flotación forzada

## 2. FLOTACIÓN NATURAL.

Producese este tipo de flotación cando a densidade das partículas sólidas é menor que a da auga ou fase líquida a tratar. A súa utilidade reduceuse a procesos de desaceitado e desengrasado de augas (petroquímica e derivados, etc).

Neste caso o deseño baséase no mesmo desenvolvemento que en sedimentación (aplicación da lei de Stokes) no que o tempo de residencia e a dinámica de partículas discretas son os parámetros a ter en conta:



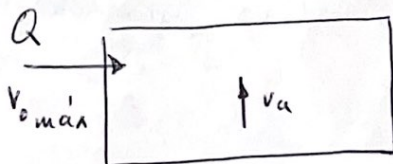
$$v_a = \frac{(\rho_F - \rho_S)}{18 \mu_F} g D^2 \frac{1}{C_v}$$

$v_a$ : velocidade ascensional

$\rho_F$ : peso específico do auga

$\rho_S$ : peso específico da grasa ou aceite

$C_v$  parámetro equivalente a esfericidade, que nos sinala o grado de deformación da partícula.  $C_v \geq 1.00$



$$A_T = \frac{Q_m}{v_{0\max}}$$

$$A_L = \frac{Q}{v_a} \text{ (F)}$$

sendo:

American Petroleum Institute  
(ec. empírica).

$$F = F_1 \cdot F_2$$

$F_1 = 1,2$  (factor compensa corloarui-  
tos)

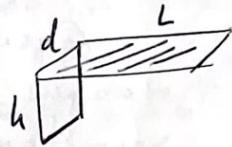
$F_2$ : compensa a turbulencia e depende  
da relación  $v_0/v_a$

$F_2$	1,45	1,37	1,27	1,14	1,07
$v_0/v_a$	20	15	10	6	3

- por tanto; a lonxitude e a profundidade  
do tanque de flotación serán:

$$A_L = \frac{V}{h} \cdot F = \frac{Q}{v_a} \cdot F = d \cdot L$$

$$A_T = \frac{Q}{v_0} = d \cdot h$$



co que:

$$L = \frac{Q/v_a \cdot F}{d} = \frac{Q/v_a \cdot F}{Q/v_0 \cdot h} = F \cdot \frac{v_0}{v_a} \cdot h$$

fixando  $h$  temos  $L$ , pasaba igual co  
sedimentador.- desareador.

### 3. FLOTACION FORZADA.

Na flotación forzada introducese no tanque de flotación burbullas de gas (xeralmente aire), co que as partículas líquidas ou sólidas adhírense ás burbullas de tal xeito que a forza ascendente é tal que produce a súa subida a superficie. Deste xeito consegue-se separar partículas de densidade superior á do líquido.

En función de como se engadan estas burbullas temos diferentes tipos de flotación forzada:

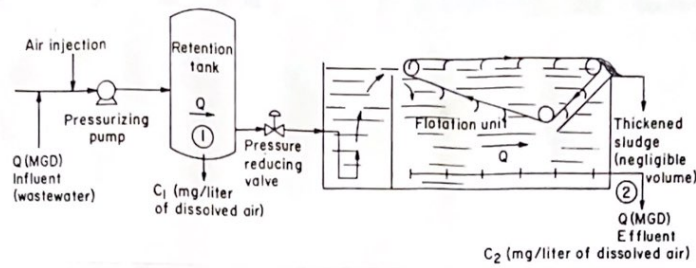
#### a. FLOTACION POR AIREACION A PRESION ATMOSFERICA.

Consiste na inserción directa de aire no tanque de flotación mediante difusores que permitan a formación de finas burbullas (mm).  
O seu baixo rendimento só fai recomendable a súa utilización en sólidos de moi baixa densidade (deterxentes, etc) ou pra mellorar os procesos de flotación natural na separación de aceites, graxas, etc.

#### b. FLOTACION POR AIRE DISOLTO.

Neste caso (figura) presurízase (2-4 atm) a fase líquida xunto con aire e permítese un tempo retención nun tanque presurizado tal que conquira a saturación. O líquido saturado con aire despresurízase até presión atmosférica co que se desprenden finas burbu-

Das de aire.



### c.- FLOTACIÓN POR VALEIRO

Consiste este proceso en saturar o augado de aire nun tanque previo de aireación ou directamente no conduto de aspiración das bombas, e se introduce unha cuberta (cilíndrica) pechada tal que se aplica un valeiro parcial na superficie da masa líquida. Deste xeito o aire disolto abandona a solución en forma de micro burbujas arrastrando as partículas sólidas, coa formación dunha espuma que se elimina mediante un rascador superficial.

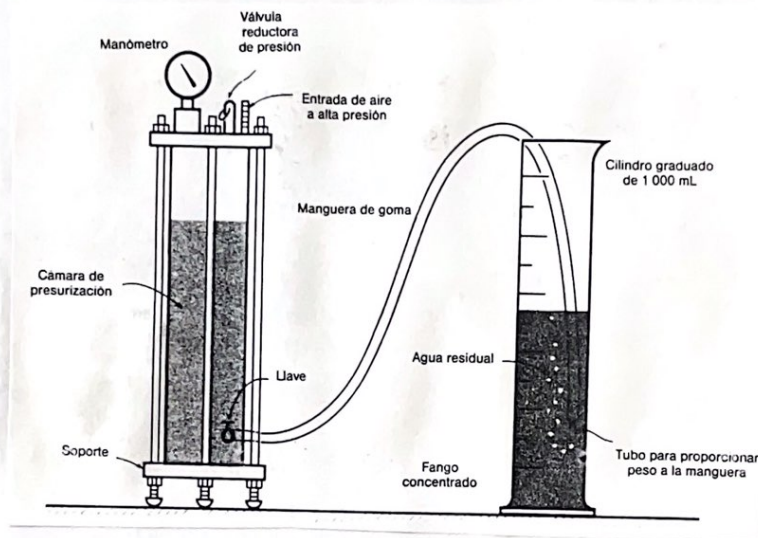
### d.- ELECTROFLOTACIÓN

Existe igualmente como electrocoagulación en sedimentación. Neste caso é posible realizar unha electrólisis en augas suficientemente mineralizadas (drenaxe ácido de mina: pranto do Ferrol pra eliminar o polvo do carbón), ~~que~~ mediante unha corrente eléctrica que circula por uns electrodos sumerxidos, o que orixina o desprendemento de finísimas burbujas de hidroxeno e oxixeno, un efecto ascensional produce altos rendementos.

### 3.1

## (A) Variáveis de diseño na flotación forzada

A eficiencia dun sist. de flotación por aire disolto depende principalmente do valor da relación entre os kilogramos de aire e os de sólidos requeridos pra conseguir un determinado grao de clarificación. Este parámetro A/S variará pra cada tipo de suspensión e podese determinar experimentalmente:



Por exemplo, no espesamento de fangos dunha EDAR os valores de A/S varían entre 0,005 á 0,060.

Por tanto, os parámetros de diseño serán conc. de sólidos, cantidade de aire, velocidade ascensional e carga de sólidos.

### Cálculo de A/S

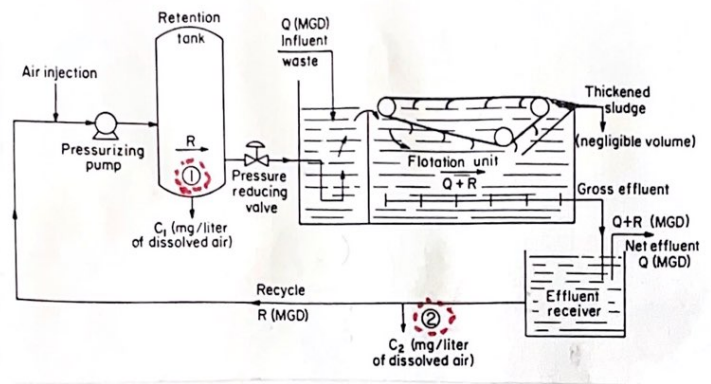
$$A/S = \frac{\text{kg/día de aire liberado pola "despresurización"}}{\text{kg/día de sólidos no influente.}}$$

onde:

$$A = A_1 - A_2 \quad (\text{Balance de materia})$$

$A_1$  kg/dia de aire dissolto no tanque pressurizado

$A_2$  kg/dia de aire dissolto na corrente de saída ou na corrente de recirculação ② segundo o modo de operação



- Sim recirculação

$$A_1 = Q \left( \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \right) \times C_1 \left( \frac{\text{kg aire}}{\text{m}^3} \right) = Q C_1 \frac{\text{kg aire}}{\text{dia}}$$

ou ben

$$A_2 = Q \cdot C_2$$

co que:  $A = A_1 - A_2 = Q (C_1 - C_2) \frac{\text{kg}}{\text{dia}}$  de aire despressurizado

- con recirculação (figura)

Neste caso se satira o caudal de recirculação  $R$ , xa que o  $Q$  a tratar vertese directamente no tanque de flotación

$$A = A_1 - A_2 = R (C_1 - C_2) \text{ kg/día aire despresurizado.}$$

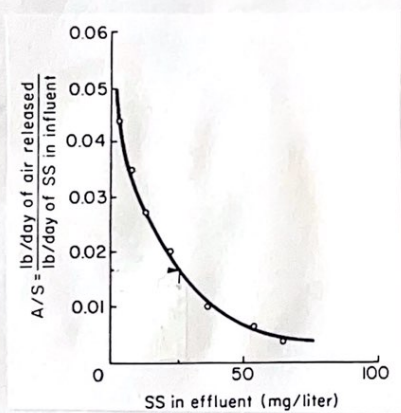
- Si a conc. de sólidos en suspensión  $x_0$  influente a tratar es  $x_0$  ( $\text{kg/m}^3$ ), tenemos que:

$$S = Q \left( \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right) \cdot x_0 \left( \frac{\text{kg SS}}{\text{m}^3} \right) = Q x_0 \frac{\text{kg SS}}{\text{día}}$$

por consiguiente:

$$(A/S)_{\text{sin recirculación}} = \frac{R (C_1 - C_2)}{Q x_0} = \frac{C_1 - C_2}{x_0}$$

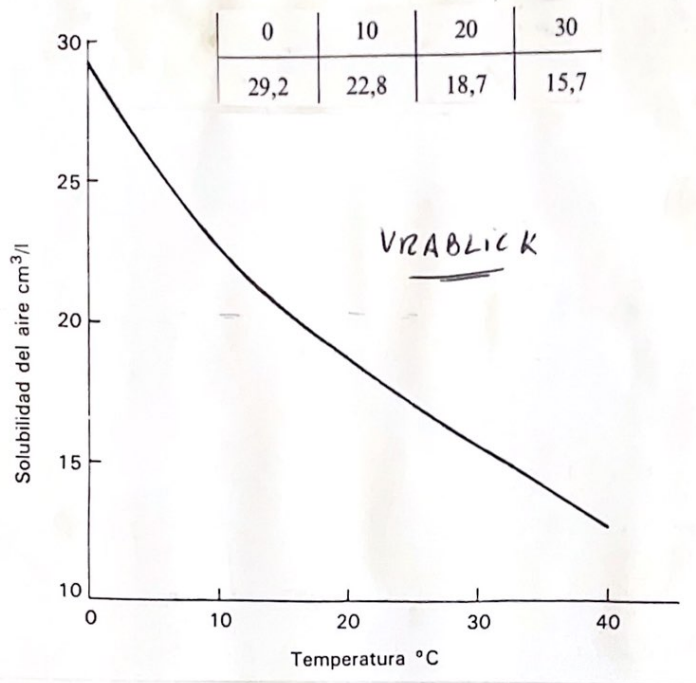
$$(A/S)_{\text{con recircula}} = \frac{R (C_1 - C_2)}{Q x_0} = \frac{R}{Q} \times \frac{C_1 - C_2}{x_0}$$



"Correlación entre A/S e SS no efluente clarificado"  
EDAR

### Introducción do concepto de solubilidad $S_a$

Normalmente a solubilidad do aire ven expresado en termos de  $\text{cm}^3$  de aire/litro de auga. Na figura seguinte señálanse os valores de  $S_a$  en función da  $T^a$  a presión atmosférica.



$$S_a \frac{\text{cm}^3 \text{ aire}}{\rho \text{ agua}} \cdot P_a \frac{\text{mg aire}}{\text{cm}^3 \text{ aire}} = C_2 \frac{\text{mg aire}}{\rho \text{ agua}}$$

$\downarrow$   
 $1,2 \text{ mg/cm}^3 \quad \left. \begin{array}{l} 1 \text{ atm} \\ 20 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right\}$

$$C_2 = 1,2 \cdot S_a$$

O valor de  $C_1$  pode-se calcular mediante o coeficiente  $\phi$ , que se define como a relação entre as ~~concentrações~~ solubilidades de aire na agua no tanque de retenção (1) e na saída do efluente clarificado (2) na recirculação:

$$\phi = \frac{C_1}{C_2} = \frac{P_1}{P_2} = \frac{P_1}{1 \text{ atm}} = P_1$$

\* Lei de Henry:  $f_i^{\text{id}} = x_i f_i^0 = x_i \cdot (k_i)$  → rte da lei de Henry

\* A lei de Henry permite calcular a fugacidade de uma componente em solução se não mais que conhecer a sua composição.

- condições ideais e 100% saturação:

$$\hat{f}_i = P \quad \left. \begin{array}{l} \text{ideal} \\ k_i = 1 \end{array} \right\} \quad x_i = \frac{\hat{f}_i}{k_i} = P$$

Logo:

$$C_1 = \phi C_2 = \left( \frac{P}{P_1} \right) C_2 \quad \left. \begin{array}{l} P_1 = P_{\text{manométrica}} + 101,35 \text{ kPa} \\ \text{(absoluta)} \\ 101,35 \text{ kPa} \end{array} \right\}$$

NOTA  
no caso de não existir saturação é importante definir factor  $f$ , que vai a depender do tanque de retenção. A 20°C e as pressões de pressurização utilizadas nos sistemas de flotação (2-4 atm) os valores de  $f$  variam entre 0,5 e 0,8.

por tanto:

$$C_1 = f P \cdot C_2 = f P (1,2 \text{ Sa})$$

$$\frac{A/S}{\text{sem recirculação}} = 1,2 \text{ Sa} (fP - 1) / x_0$$

$$\frac{A/S}{\text{com recirculação}} = (R/Q) \times 1,2 \text{ Sa} (fP - 1) / x_0$$

onde:

$$(A/s) = \text{ml aire} / \text{mg sólidos}$$

$$s_a = \text{ml/l}$$

$$0,5 < f < 0,8$$

$$P(\text{atm}) = \frac{P(\text{kPa}) + 101,35}{101,35}$$

$$x_0 \dots \text{mg/l.}$$

$$Q \text{ ou } R : \text{m}^3/\text{día.}$$

3.2

## (B) Diseño de tanques de flotación

Sin Recirculación

Datos:  $t^a$  (por ende  $s_a$ ),  $x_0$ ,  $f$ ,  $(A/s)$ , carga superficial (2-4 gal/min ft<sup>2</sup>).

Paso 1: cálculo de presión de presurización tank.

$$(A/s) = 1,2 s_a (fP - 1) / x_0$$

$$P = \left( \frac{1}{f} \right) \left[ \frac{(A/s) \cdot x_0}{1,2 s_a} + 1 \right]$$

Paso 2:

$$c_s = \frac{Q}{A_L}$$

ou

$$c_s' = c_s \cdot \rho_s = \frac{Q}{A_L} \cdot \rho_s$$

caudal ~~relativo~~  
en peso

$$A_L = \frac{Q \text{ m}^3/\text{d}}{c_s \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}} \Rightarrow A_L (\text{m}^2)$$

Paso 3

$$A_L = \frac{Q}{v_a} \Rightarrow v_a = \frac{Q}{A_L} \text{ # velocidade ascensional.}$$

onde:

$$L = F \cdot \frac{v_0 \cdot h}{v_a} \quad \text{problema que hai que saber } v_a$$

ou ben, consideramos un tempo de residencia, ou EDAR soe ser de 20-30 min:

$$Z = \frac{V}{Q} \Rightarrow \underline{V = Z \cdot Q} \text{ m}^3$$

$$V = A_L \cdot h \Rightarrow h = \frac{V}{A_L} \text{ m}$$

$$\begin{aligned} A_T &= d \cdot h \\ A_L &= d \cdot L \end{aligned} > L = \frac{A_L}{d} = \frac{A_L}{A_T} \cdot h$$

fixas  $d$  ou  $L$  e tes o sist. definido

Con recirculación

Paso 1 Se pode fixar P ou R, dependerá da avaliación dos tes de bombeo con recirculación, sistemas de presurizado e de construción do tanque con querir óptimo. Supoñamos que fixamos P:

Paso 2

$$R = (A/s) \cdot Q \cdot x_0 / 1,2 S_a (fP - 1) \Rightarrow A_L = \frac{Q + R}{C_s}$$

## 4. CASOS PRÁCTICOS

### PROBLEMAS DE FLOTACIÓN

1. Proxectar un espesador pro flotación, con e sin recirculación presurizada pra espesar os sólidos dun líquido mistura de fango activado dende 0,3 a 4% aproximadamente. Supoñense a aplicacións das seguintes condicións.

Relación óptima A/S = 0,008 ml/mg.

Temperatura = 20 °C.

Solubidade do aire = 18,7 ml/l.

Presión do sistema de recirculación (manométrica) = 275 kPa.

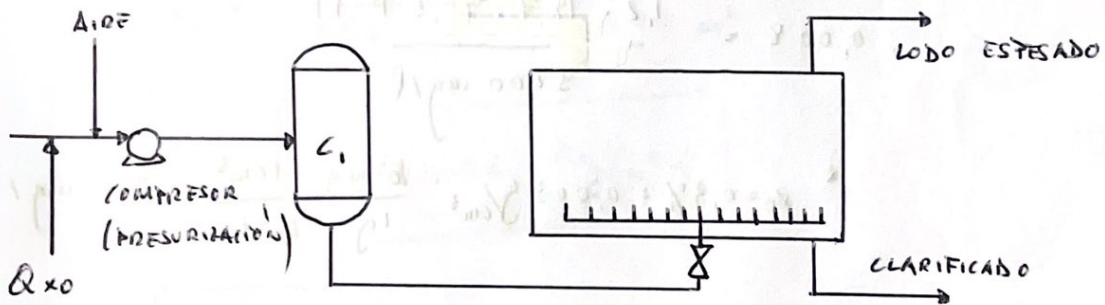
Fracción de saturación = 0,5.

Carga de superficie = 8 l/m<sup>2</sup> min

Caudal de fango = 400 m<sup>3</sup>/d.

SOLUCIÓN

■ SIN RECIRCULACIÓN



A ec. de diseño dun sistema de flotación forzada sin recirculación:

$$\left(\frac{A}{S}\right)_{\text{óptima}} = \frac{1,2 \cdot s_a (fP-1)}{x_0} \quad (\text{ml/mg})$$

onde:

$s_a$ : solubilidade do ar em ml/l

$f$ : fração do ar dissolto a pressão  
\* ou "fração de saturação"

$P$ : pressão em atm (absoluta)

$$P = \frac{P + 101,35 \text{ kPa}}{101,35 \text{ kPa}}$$

pressão manométrica

$x_0$ : conc. de sólidos (mg/l) no influente.

Em princípio temos que determinar o valor de  $P$  (parâmetro de design) no tanque de pressurização:

$$0,008 = \frac{1,2 \cdot 18,7 \cdot (0,5 P - 1)}{3000 \text{ mg/l}}$$

$$* x_0 = 0,3\% = 0,003 \text{ g/cm}^3 \cdot \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \cdot \frac{1 \text{ cm}^3}{10^{-3} \text{ L}} = 3000 \text{ mg/l.}$$

$$1,07 = 0,5 P - 1 \Rightarrow \underline{P = 4,14 \text{ atm}}$$

pressão absoluta

- a manométrica:

$$4,14 = \frac{P + 101,35}{101,35} \Rightarrow \underline{P = 318,2 \text{ kPa}}$$

▪ A área do meu DAF:

$$A_T = \frac{Q \text{ (m}^3/\text{s)}}{c_s \text{ (m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s)}} \text{ (m}^2)$$

onde:  $c_s = 8 \frac{\text{l}}{\text{m}^2 \cdot \text{min}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{10^3 \text{ L}} \cdot \frac{1440 \text{ min}}{1 \text{ d}} = 11,52 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \text{ d}}$

co que:

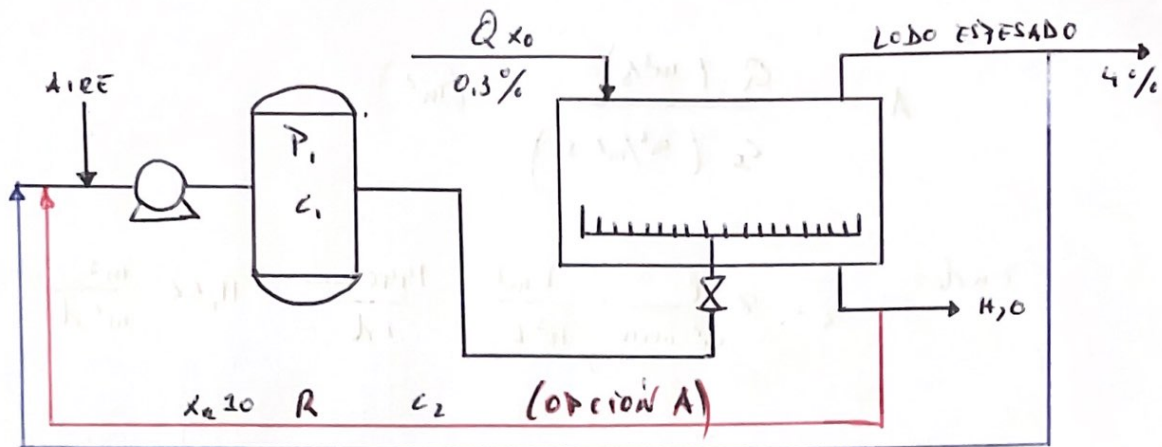
$$A_T = \frac{400 \text{ m}^3/\text{d}}{11,52 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ d}} = 34,72 \text{ m}^2$$

▪ A carga de sólidos deste equipo:

$$c_s^i = \frac{Q_0 c_{p0}}{A_T} = \frac{400 \text{ m}^3/\text{d} \cdot 3000 \text{ kg/m}^3}{34,72 \text{ m}^2}$$

$$c_s^i = 34,56 \text{ kg/m}^2 \text{ d}$$

■ CON RECIRCULACIÓN.



■ A ec. de diseño: (OPCIÓN B)  $R \text{ } c_2 \text{ } x_R = 4\%$ .

$$\left(\frac{A}{S}\right)_{\text{optimo}} = \left(\frac{R}{Q}\right) \cdot \left(\frac{1,2 \cdot s_u (fP-1)}{x_0}\right)$$

- ec. da para desconozco o valor de R, necesario pro cálculo da area

$$A_T = \frac{Q+R}{C_s}$$

- a clave radica en que corriente recirculamos, o lodo espesado or o efluente clarificado (esta ultima a opción más común), consideremos ambos casos como ejercicio de clase.

Opción A

$$R = \frac{\left(\frac{A}{S}\right)_{\text{optimo}} \cdot x_0 \cdot Q}{1,2 \cdot s_u (fP-1)}$$

onde:

$$p = \frac{2,75 \text{ kPa} + 101,35}{101,35} = 3,71 \text{ atm}$$

po que:

$$R = \frac{0,008 \frac{\text{ml}}{\text{mg}} \cdot 3000 \text{ mg/l} \cdot 400 \text{ m}^3/\text{d}}{1,2 \cdot 18,7 \text{ ml/L} \cdot (0,5 \cdot 3,71 - 1)} = 500,4 \text{ m}^3/\text{d}$$

po que:

$$A_T = \frac{Q+R}{c_s} = \frac{(400 + 500,4) \text{ m}^3/\text{d}}{11,52 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}} = 78,1 \text{ m}^2$$

OPCIÓN B

$\rightarrow x_r \gg x_0$

$$R = \frac{0,008 \text{ ml/mg} \cdot 4 \cdot 10^4 \text{ mg/l} \cdot 400 \text{ m}^3/\text{d}}{1,2 \cdot 18,7 \text{ ml/L} \cdot (0,5 \cdot 3,71 - 1)} = 6671,5 \text{ m}^3/\text{d}$$

entón o área:

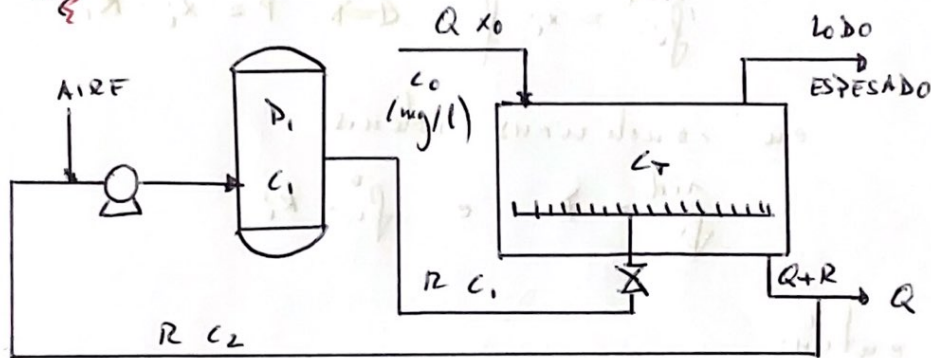
$$A_T = \frac{Q+R}{c_s} \approx \frac{R}{c_s} = \frac{6671,5 \text{ m}^3/\text{d}}{11,52 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}} = 579,1 \text{ m}^2$$

En consecuencia, a opción de recirculación nunca se considera o todo espesado, xa que a área do DAF sería "inmensa"

4. Calcular a concentración volumétrica de burbullas dun DAF (dispersed air flotation) operando cunha recirculación do 8% e unha presurización de 583,6 kPa abs. (70 psi) e unha eficacia do 70%. Considerar que a temperatura de operación é de 25°C e que a alimentación saturase con aire. Nestas condicións a constante de Henry é de 4,53 kPa  $\text{mg}^{-1}$  e a densidade do aire saturado de 1,15 g/l. Si o diámetro das burbullas do difusor é de 40  $\mu\text{m}$ , ¿cál será o número de burbullas?.

Nota: - A concentración volumétrica de burbullas obtense ó dividir a concentración de aire disolto pola densidade do aire saturado nas mesmas condicións de presión e temperatura.  
 - A número de burbullas defínese como o cociente entre a concentración volumétrica de burbullas e o volumen equivalente das mesmas. Para 40  $\mu\text{m}$  o volumen é  $3,35 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3$ .

SOLUCIÓN



Si facemos un balance de aire no DAF (consideraremos mistura completa):

-  $\text{kg}$  aire influente +  $\text{kg}$  aire presurizado =  $\text{kg}$  aire effluente

$$Q \cdot c_0 + R (c_1 - c_2) = (Q + R) \cdot c_T$$

- si temos en conta que  $R = rQ$ , onde  $r$  é a razón de recirculación

$$Q c_0 + rQ (c_1 - c_2) = (Q + rQ) c_T$$

$$c_0 + r(c_1 - c_2) = (1+r)c_T$$

$$c_T = \frac{r(c_1 - c_2) + c_0}{1+r}$$

onde:  $c_1$  e  $c_2$  podem ser calculado a travérs da Lei de Henry, tomando que no  $H_2O$  é desprezível o oxigênio dissolvido ( $c_0 \approx 0$ )

Lei de Henry:

$$f_i^{id} = x_i \cdot f_i^o \Leftrightarrow P = x_i \cdot K_i$$

em condições ideais:

$$f_i^{id} = P \quad e \quad f_i^o = K_i$$

então:

$$c_2 = \frac{P_{atm}}{K} = \frac{101,35 \text{ kPa}}{4,53 \text{ kPa} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{l}} = 22,37 \text{ mg/l}$$

$$c_1 = f \cdot P \cdot c_2 = f \cdot P \cdot \frac{P_{atm}}{K} = f \cdot \frac{P}{K} = 0,7 \cdot \frac{583,6}{4,53}$$

"fracção saturação"

$$c_1 = 90,18 \text{ mg/l}$$

logo:

$$c_T = (90,18 - 22,37) \cdot \frac{0,08}{1,08} = 5,02 \text{ mg/l}$$

entón:

$$\phi_b = \frac{5,02 \text{ mg/l}}{1,15 \text{ g} \cdot \frac{10^3 \text{ mg}}{1 \text{ g}}} = 4,37 \cdot 10^{-3}$$

con. volumétrica  
de burbujas

$$\left[ \begin{array}{l} \text{n}^\circ \text{ burbujas} = \\ \text{(n}^\circ/\text{m}^3) \end{array} \right. = \frac{4,37 \cdot 10^{-3}}{3,35 \cdot 10^{-11}} = 1,3 \cdot 10^8 \left. \right]$$

## 5. REFERENCIAS

### **Artigos**

Caceres; L., Contreras, R., Salazar, J. (1994). Proceso de flotación por aire disuelto en el tratamiento de agua. *Ingeniería Química* 303:105-108

### **Libros**

Degremont (1991) Water Treatment Handbook. Degremont, (6th Ed.). Rueil-Malmaison Cedex.

Hernández Muñoz, A. (1992). Depuración de Aguas Residuales (2ª Ed.). Paraninfo, Madrid

Metcalf & Eddy Inc. (1995). Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización (3ª Ed.). Mc-Graw Hill, Madrid