

**“DIMENSIONAMIENTO (CON MATHCAD) DE LAGUNAS FACULTATIVAS
PARA TRATAMIENTO DEL AFLUENTE LÍQUIDO
DE LA INDUSTRIA CERVECERA”.**

NOMBRE DE LOS AUTORES (Montesano, J. y Dipietro, A. R.)

Universidad Católica Argentina UCA- Facultad de Ciencias Fisicomatemáticas e Ingeniería, Alicia Moró de Justo 1500, Tel. 4349-0200, Puerto Madero Ciudad Autónoma de Buenos Aires
jmontesano@speedy.com.ar

1. Resumen:

Las lagunas facultativas forman parte de la estabilización en un sistema de tratamiento de aguas residuales industriales, su elección se hace bajo los siguientes criterios:

- a.** La planta está emplazada en un terreno amplio.
- b.** El dinero disponible para el tratamiento de aguas residuales es escaso, por lo tanto las obras de control de contaminación, deben satisfacer los requerimientos de tratamiento a un costo de operación y mantenimiento mínimo.
- c.** Constituyen el proceso de tratamiento biológico, más confiable por su sensibilidad mínima a la operación intermitente y porque requieren una destreza operativa ínfima.

Para llevar a cabo el diseño de estas lagunas, en este trabajo, se parte de los balances de masa aplicados a los diferentes tipos de reactores químicos, estableciendo una cinética simple. Con condiciones de contorno conocidas por la práctica, se logra esencialmente calcular sus dimensiones.

El diseño que se adopte, será aquel que posea un modelo de flujo lo más parecido a la realidad, que logre en una menor dimensión la reducción del DBO_5 , dentro de los valores de vuelco establecidos por la legislación vigente en la provincia.

2. Marco teórico:

Estos tipos de lagunas se pueden diseñar con la base de una cinética de reducción de DBO_5 de primer orden, típica e irreversible y con modelos de reactor de mezcla completa (TAC), donde se supone que las partículas del fluido afluente son dispersadas instantáneamente a través de todo el volumen y la concentración es la misma en cualquier punto del reactor. También se puede aplicar el modelo de un reactor tubular (RT), con flujo pistón (ideal) o bien un flujo con dispersión axial con condiciones arbitrarias de entrada y salida.

De las ecuaciones de diseño de cada reactor se obtienen los tiempos de residencia y con estos se puede calcular las dimensiones de la laguna.

3. **Objetivo:**

El objetivo del siguiente trabajo es el dimensionamiento de una laguna del tipo facultativa, donde se busca procesar el afluente líquido originado en una planta de producción de la industria cervecera, disponiendo de los valores de la DBO₅ y del caudal anual promedio que se deben procesar.

Se emplearán el modelo de mezcla completa, el modelo de flujo pistón y el modelo de flujo con dispersión axial. Con ello, se busca hallar el modelo más representativo y que entregue mejores resultados para esta situación.

4. **Metodología:**

El cálculo del diseño se realiza con el software Mathcad. Su programación facilita las operaciones matemáticas.

5. **Resultados:**

5.1. Modelo de mezcla completa (TAC, tanque agitado continuo) con cinética de primer orden.

En el modelo de mezcla completa se supone que las partículas del fluido afluente son dispersadas instantáneamente a través de todo el volumen del reactor y que no existen gradientes de concentración dentro del sistema; por lo tanto la concentración del efluente del reactor es la misma concentración de cualquier punto en el reactor.

El tiempo de residencia (τ) para un TAC es.

$$\tau = \frac{C_a - C_{a0}}{-r_a} \quad (1)$$

Donde C_{a0} es la concentración inicial de la especie **a**

C_a es la concentración final de la especie **a**

- r_a es la velocidad de desaparición de la especie **a**, para una cinética de primer orden $-r_a = k_t \cdot C_a$ reemplazando en (1) queda:

$$\tau := \frac{1}{k_t} \cdot \left(\frac{C_{a0}}{C_a} - 1 \right) \quad (2)$$

La selección del valor de k_t (constante de remoción de DBO, la cual es función de la temperatura) para el diseño es una de las preguntas más difíciles de resolver; existen muchas expresiones empíricas que permiten estimar su valor.

Así, según (Mara¹) puede considerarse que $k_t := 0.3 \cdot 1.05^{\text{temp}-20}$ [d⁻¹] con la temperatura, medida en °C. Se tendrá como condiciones impuestas:

$$\begin{array}{lll} \text{temp} := 25^\circ\text{C} & \text{Ca}_0 := 860 \frac{\text{mg}}{\text{lt}} \text{ DBC} & \text{Ca} := 50 \frac{\text{mg}}{\text{lt}} \text{ DBC} \\ & (\text{ver Anexo}) & (\text{máx legal para vertido según Res. Pcia.} \\ & & \text{de Bs.As. N°336/03, caso más desfavorable}) \\ & \text{caudal} := 3500 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} & \\ & (\text{ver Anexo}) & \end{array}$$

$$k_t := 0.3 \cdot 1.05^{\text{temp}-20} \quad k_t = 0.383 \text{d}^{-1}$$

$$X := 1 - \frac{\text{Ca}}{\text{Ca}_0} \quad (\text{Definición de conversión})$$

Se debe alcanzar una conversión mínima $X = 0.942$ y por lo tanto el tiempo de residencia mínimo será:

$$\tau = 42.31 \text{d} \quad (3)$$

La profundidad de las lagunas facultativas oscila entre 1.2 y 2.5 m, predominando el proceso anaerobio a mayores profundidades.

$$\text{vol} := \text{caudal} \cdot \tau \quad \text{vol} = 148086 \text{m}^3$$

Se adopta una profundidad de $h = 2.5$ m para el dimensionado de la laguna reduciendo de esta manera la superficie total. Se tiene:

$$A = 5.92 \text{ha}$$

Se estaría hablando de un laguna de $\sqrt{A} = 243 \text{m}$ de lado

5.2. Modelo de RT (Reactor Tubular, con flujo pistón) con cinética de primer orden.

¹ Mara Sewage Treatment in Hot Climates, Wiley, 1976

Para el modelo de flujo pistón, se considera en régimen altamente turbulento con un frente de avance que no posee variación radial en la concentración y donde el grado de avance de la reacción aumenta a lo largo del reactor.

Entonces para un modelo de flujo pistón se tiene

$$k_t := k_{20} \cdot 1.09^{\text{temp}-20} \quad k_t = 0.123\text{d}^{-1} \quad \tau := \frac{-1}{k_t} \cdot \ln\left(\frac{C_a}{C_{a_0}}\right) \quad \tau = 23.11\text{d}$$

$$\text{vol} := \text{caudal} \cdot \tau \quad \text{vol} = 80894\text{m}^3 \quad A := \frac{\text{vol}}{h} \quad A = 3.24\text{ha}$$

En este caso se tiene 180 m de lado aproximadamente

5.3. Modelo de flujo con dispersión axial y cinética de primer orden

En este modelo podría pensarse como un RT donde hay flujo pistón con gradientes de concentración en la sección transversal al flujo, es decir, se produce una dispersión de concentraciones en el sentido del flujo

$$\frac{C}{C_0} := \frac{4 \cdot a \cdot \exp\left(\frac{1}{2 \cdot \text{disp}}\right)}{(1+a)^2 \cdot \exp\left(\frac{a}{2 \cdot \text{disp}}\right) - (1-a)^2 \cdot \exp\left(\frac{-a}{2 \cdot \text{disp}}\right)} \quad (4)$$

Donde C = concentración del efluente; C_0 = concentración del afluente;

$a = \sqrt{1 + 4 \cdot k_t \cdot \tau \cdot \text{disp}}$ k_t = constante de reacción de primer orden, día⁻¹; τ = tiempo de residencia; disp = número de dispersión del flujo, adimensional.

$\text{disp} = \frac{D}{v \cdot L}$ donde D = coeficiente de dispersión axial, m²/día; v = velocidad de flujo, m/día; L = Longitud del fluido desde el afluente al efluente, m

El valor de disp ., con base en las propiedades geométricas de la laguna, puede calcularse por la expresión de (Polprasert²)

$$\text{disp} = \frac{0.184[\tau \cdot v \cdot (w + 2 \cdot z)]^{0.489} \cdot w^{1.511}}{(l \cdot z)^{1.489}} \quad (5)$$

Donde: w = ancho de la laguna; z = profundidad; l = longitud; τ = tiempo de residencia; v = viscosidad cinemática

² Polprasert Dispersión Model for Waste Stabilization Ponds, J. EE., Asce, Vol. 111, N°1, 02/1985

Para el caso particular aquí analizado, resolviendo gráficamente la ecuación de diseño y suponiendo un valor estimado inicial $disp := 0.5$ se obtiene:

Para Mathcad $\theta = \tau$

L

$$a(k\theta, disp) := \sqrt{1 + 4k\theta \cdot disp} \quad r := 1, 1.01.. 8$$

$$x(k\theta, disp) := \frac{4 \cdot a(k\theta, disp) \cdot \exp\left(\frac{1}{2 \cdot disp}\right)}{(1 + a(k\theta, disp))^2 \cdot \exp\left(\frac{a(k\theta, disp)}{2disp}\right) - (1 - a(k\theta, disp))^2 \cdot \exp\left(\frac{-a(k\theta, disp)}{2disp}\right)} \cdot 100$$

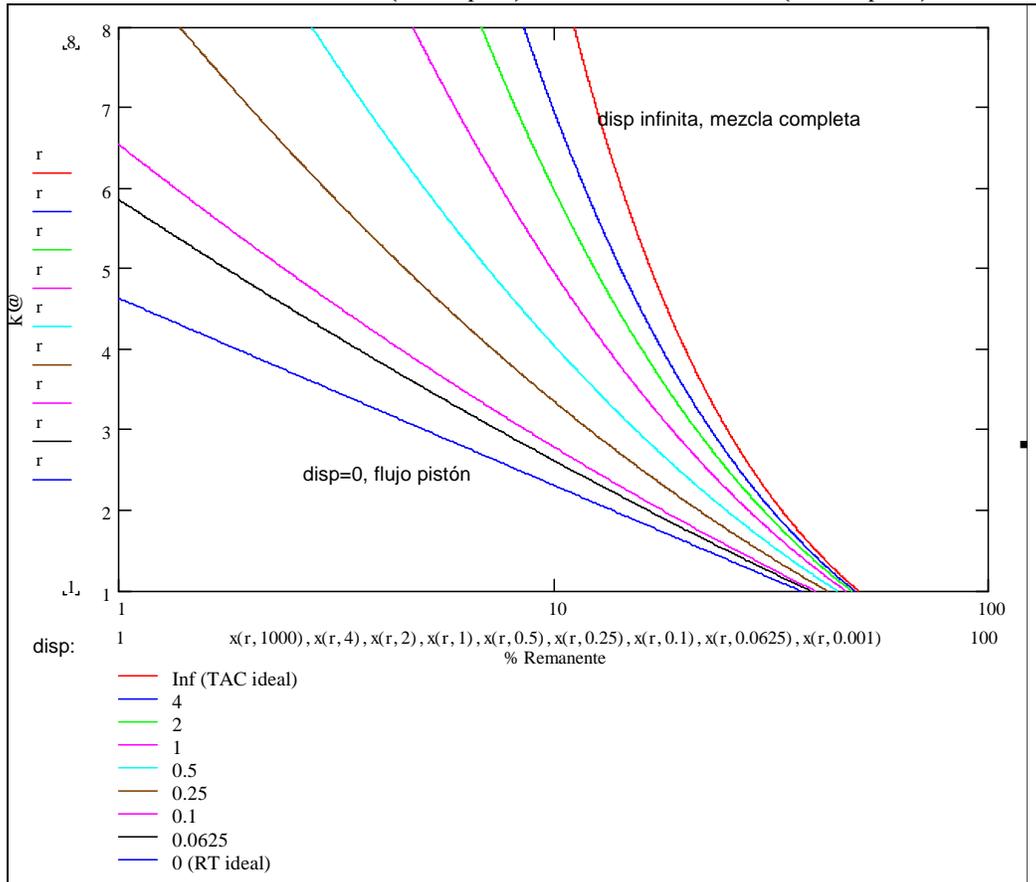


Figura 1: Conversión %- $k\theta$, para $\neq disp$

$$k\theta := 5 \quad \text{Given} \quad x(k\theta, disp) = \frac{Ca}{Ca_0} \cdot 100 \quad k\theta := \text{Find}(k\theta) \quad k\theta = 5.553$$

$$k_t := 0.142 \cdot 1.044^{\text{temp}-20} \quad k_t = 0.176d^{-1} \quad \theta := \frac{k\theta}{k_t} \quad \theta = 31.53d$$

$$vol := \text{caudal} \cdot \theta$$

$$\begin{aligned}
 \text{vol} &= 110359 \text{m}^3 & A &:= \frac{\text{vol}}{h} & A &= 4.41 \text{ha} \\
 \text{Suponiendo que la laguna es cuadrada } \sqrt{A} &= 210 \text{m de} & \text{lado.} & & \text{Para} & \\
 \text{verificar la } \textit{disp}. \text{ Supuesto, se encuentra:} & & & & & \\
 w &:= \sqrt{A} & l &:= \sqrt{A} & z &:= 2.5 \text{m} & v &:= 1 \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}} \\
 \text{disp} &:= \frac{0.184 [\theta \cdot v \cdot (w + 2 \cdot z)]^{0.489} \cdot w^{1.511}}{(l \cdot z)^{1.489}} & \text{disp} &= 4
 \end{aligned}$$

Este valor dista mucho del propuesto pero, el valor de dispersión depende de la geometría de la laguna, se deben hallar los valores de l y w que permitan alcanzar el valor propuesto. Aprovechando que la dispersión es directamente proporcional al ancho (w) de la laguna e inversamente proporcional al largo (l) de la misma, se buscan valores de los mismos que hagan que la dispersión calculada sea menor que la supuesta para garantizar una remoción igual o mayor que la deseada.

$$w := 30 \quad l := 110$$

$$\begin{aligned}
 \text{Given } & l > \sqrt{A} \\
 & w < \sqrt{A} \\
 & l \cdot w = A \\
 \text{disp}(l, w) & < 0.5 \cdot 0.5 & \text{lyw} &:= \text{Maximize}(\text{disp}, l, w) & \text{lyw} &= \begin{pmatrix} 393 \\ 112 \end{pmatrix} \text{m} \\
 \text{disp}(\text{lyw}_0, \text{lyw}_1) &= 0.45 & < \text{que } 0.5 & & \text{lyw}_0 \cdot \text{lyw}_1 &= 4.41 \text{ha}
 \end{aligned}$$

Se mantiene el área buscada

6. Conclusiones

Al pensar en una laguna facultativa se puede discernir entre los tres modelos: TAC, RT y RT con dispersión axial. Es ilógico pensar que se produzca un mezclado total ni bien ingrese el afluente (modelo TAC), tampoco que se genere un frente de avance de concentración homogénea a lo largo de la laguna (modelo RT flujo pistón), el modelo de dispersión de flujo axial muestra un comportamiento intermedio y es el que mejor se ajusta a la realidad.

Mediante la observación del gráfico obtenido a partir de este último modelo, se aprecia que a valores de dispersión bajos se obtiene mejores valores de remoción de DBO,

motivo por el cual se utilizó para el cálculo, un valor supuesto intermedio (0.5) entre los recomendados por la bibliografía. Se hace notar que el valor de la dispersión se debe determinar mediante estudios de trazadores o colorantes y en base a este determinar el porcentaje de remoción

Según los resultados obtenidos por el modelo de dispersión axial, se necesitaría una laguna facultativa de 400m de largo y 110m de ancho por 2.5m de profundidad, con una superficie de 4.4 ha, un volumen de aproximadamente de 110000 m³ y un tiempo de residencia (tiempo de retención hidráulico de unos 30 días, para poder tratar el afluente líquido de la planta cervecera y llevarlo a límites admisibles de descarga.

7. Bibliografía

- Fogler S.(2001)“ *Elementos de ingeniería de las reacciones químicas*”Pearson Educación
- Jairo R.R(1999) “ *Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización*”México, Alfaomega Grupo Editor.
- Metcalf & Hedí (1998)“ *Ingeniería de aguas residuales*” Tomo 1, II México McGraw-Hill
- Pérez D. Cervecería Quilmas S.A. **Nuestro agradecimiento.**

Anexo

Características del afluente

Parámetro	Resultado
pH	7.14
Sólidos totales-150°C(mg/l)	769
DQO (ppm)	1100
DQO ₅ (ppm)	860
NO ₃ ⁻ (ppm de NO ₃ ⁻)	< 0.4
NO ₂ ⁻ (ppm de NO ₂ ⁻)	<0.03
Nitrógeno total Kjeldhal (mg N/l)	11.25
Sulfuros (ppm)	<0.006
Fósforo(ppm)	13.54
Caudal de afluente (promedio anual) m ³ /día	3500