



ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD

Oficina Sanitaria Panamericana, Oficina Regional de la

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD

Lagunas Aireadas Mecánicamente

Ing. Sérgio Rolim Mendonça, M.Sc.
Asesor en Salud y Ambiente de la OPS/OMS, Colombia

Santa Fe de Bogotá, Colombia, septiembre de 1999



ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD

Oficina Sanitaria Panamericana, Oficina Regional de la

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD

Lagunas Aireadas Mecánicamente

**Ing. Sérgio Rolim Mendonça, M.Sc.
Asesor en Salud y Ambiente de la OPS/OMS, Colombia**

Santa Fe de Bogotá, Colombia, septiembre de 1999

INDICE

	Pág.
8.1. Generalidades. Tipos	1
8.2. Teoría de aireación, equipos utilizados	4
8.2.1. Introducción	4
8.2.2. Equipos de aireación	4
8.2.2.1. Aireación por aire difuso	4
8.2.2.2. Aireación por turbina de aireación	6
8.2.2.3. Aireación por aireadores superficiales	6
8.2.3. Detalles del proyecto e instalación de aireadores superficiales	8
8.2.3.1. Transferencia de oxígeno	8
8.2.3.2. Esquemas de instalación	9
8.2.3.3. Tipos de montaje	11
8.3. Expresiones utilizadas en el dimensionamiento de los aireadores superficiales	13
8.4. Proyecto de lagunas aireadas mecánicamente	14
8.4.1. Introducción	14
8.4.2. Nuevos criterios del proyecto	17
8.5. Guía para el dimensionamiento de una laguna aireada aerobia con mezcla completa	19
8.6. Guía para el dimensionamiento de un sistema en serie de dos lagunas aireadas, donde la primera es aerobia con mezcla completa y la segunda, facultativa	21
8.6.1. Lagunas aireadas aerobias con mezcla completa	21
8.6.2. Laguna aireada facultativa	22
8.7. Guía para el dimensionamiento de un sistema en serie de n lagunas aireadas, donde la primera es aerobia con mezcla completa y las restantes, facultativas	23
8.8. Lagunas de sedimentación	23
8.9. Ejemplos	26
8.9.1. Ejemplo 1	26
8.9.2. Ejemplo 2	28
8.9.3. Ejemplo 3	37
8.10. Referencias bibliográficas	39
Anexo I Resumen del Curriculum Vitae del Ing. Sérgio Rolim Mendonça	42

NOTA DEL AUTOR

El presente trabajo corresponde al capítulo 8 del libro que está en impresión titulado “Lagunas de Oxidación. Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento”, del cual somos el principal autor

Este capítulo se destina a proveer los fundamentos teóricos y las herramientas prácticas que permitirán seleccionar y diseñar sistemas de Lagunas Aireadas Mecánicamente compatibles con los niveles de desarrollo y recursos disponibles en nuestros países.

Santa Fe de Bogotá, septiembre de 1999

Sérgio Rolim Mendonça

LAGUNAS AIREADAS MECÁNICAMENTE

Sérgio Rolim Mendonça*

8.1. GENERALIDADES. TIPOS

Las lagunas aireadas mecánicamente son semejantes a las lagunas de estabilización, con una única diferencia, son dotadas de equipos de aireación cuya principal finalidad es introducir oxígeno a la masa líquida. Su profundidad varía de 3,0 a 5,0 m.

Las aguas residuales crudas son lanzadas directamente en la laguna después de pasar por un tratamiento preliminar (rejillas y desarenación). Funcionan como un tanque de aireación en el cual la aireación artificial, substituye el oxígeno natural a través de las algas en las lagunas de estabilización.

Su área es menor que las lagunas de estabilización debido a su mayor profundidad y al menor tiempo de retención para la estabilización de la materia orgánica.

Se necesita energía eléctrica en las cercanías del área donde son construidas las lagunas aireadas mecánicamente debido al uso de los aireadores.

Las lagunas aireadas mecánicamente se pueden clasificar en tres tipos.

- aerobia con mezcla completa;
- facultativa;
- con aireación extendida.

Las más usadas son las dos primeras. La tercera tiene un costo más elevado que las anteriores y su operación es más sofisticada, con mayor consumo de energía eléctrica.

En las lagunas aireadas aerobias con mezcla completa, todos los sólidos sedimentables se mantienen en suspensión, Figura (8.1). Este tipo de laguna provee una relación potencia/volumen alta. La edad del lodo es igual al tiempo de retención hidráulico y es frecuentemente la primera de una serie de lagunas aireadas. La remoción de DBO_5 varía de 50 a 60% con la gran desventaja de transportar muchos sólidos en el efluente. Funcionan básicamente como un sistema de lodos activados sin reciclaje del lodo.

En las lagunas aireadas facultativas no hay control de sólidos, Figura (8.2). Parte de los sólidos sedimentables salen con el efluente, y el resto es sedimentado en su parte inferior. Su potencia es limitada y la edad del lodo es mayor que el tiempo de retención hidráulico. La remoción de DBO_5 varía de 70 a 90%. En este sistema, que también se basa en el principio del proceso de lodos activados, no hay reciclaje del lodo.

* Ingeniero Civil de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de Paraíba. Universidad Federal de Paraíba, João Pessoa, Brasil. Ingeniero Sanitario de la Facultad de Higiene y Salud Pública de la Universidad de São Paulo, Brasil y "Master of Science" en Control de la Contaminación Ambiental de la Universidad de Leeds, Inglaterra. Es actualmente Asesor en Salud y Ambiente de la Organización Panamericana de la Salud (OPS/OMS), Colombia.

Las lagunas aireadas con aireación extendida son también llamadas de lagunas aireadas con mezcla completa con reciclaje de sólidos, Figura (8.3). Se pueden clasificar en cuatro tipos:

- con sedimentación independiente;
- con compartimiento de sedimentación en la propia laguna;
- del tipo intermitente;
- del tipo aireación/sedimentación en la misma laguna.

En las lagunas de aireación extendida existe un total control de los sólidos. Su relación potencia/volumen es idéntica a las lagunas aireadas aerobias con mezcla completa. Su diseño es semejante a la zanja de oxidación tipo PASVEER, Mendonça (1979). La edad del lodo es mayor que el tiempo de retención hidráulico y la remoción de DBO_5 es bastante elevada, variando entre 95 y 98%.

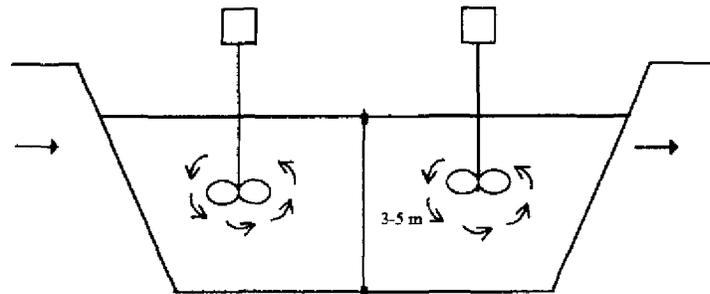


Figura 8.1. Laguna aireada aerobia con mezcla completa

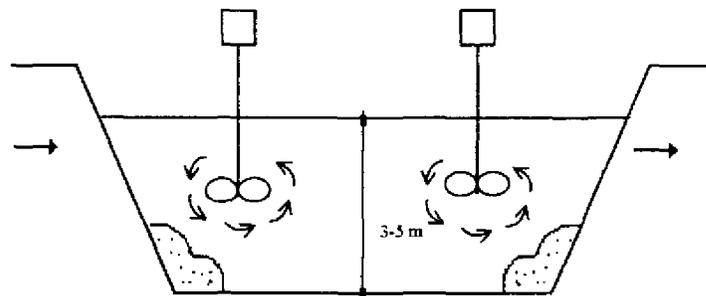


Figura 8.2. Laguna aireada facultativa

Serán discutidas aquí las lagunas aireadas aerobias con mezcla completa, Figura (8.1), las lagunas aireadas facultativas, Figura (8.2) y las lagunas de sedimentación.

Las principales ventajas de las lagunas aireadas aerobias con mezcla completa en relación a las lagunas aireadas facultativas son:

- mayor eficiencia en relación a un mismo período de aireación;
- ausencia de algas, una vez que el oxígeno necesario para la estabilización de la materia orgánica es proporcionado exclusivamente por los equipos de aireación;
- menor área ocupada.

Las principales desventajas son

- mayor concentración de sólidos biológicos en el efluente,
- mayor consumo de energía eléctrica.

Las lagunas aireadas han sido empleadas con éxito hace mucho tiempo, en el tratamiento de aguas residuales domésticas de ciudades pequeñas y medianas y de desechos orgánicos de origen industrial. Las lagunas aireadas han sido utilizadas ampliamente por las industrias de papel, de procesamiento de alimentos, petroquímicas y otros tipos de industrias con desechos de origen orgánico.

Su eficiencia es elevada y su costo de construcción es considerado un poco mayor que las lagunas de estabilización. En cuanto a su operación y mantenimiento, el costo es muy elevado debido al mantenimiento de los equipos electromecánicos y a la energía eléctrica. Entre tanto, después de agotar la posibilidad del uso de lagunas de estabilización, las lagunas aireadas mecánicamente son una opción inmediata bastante viable

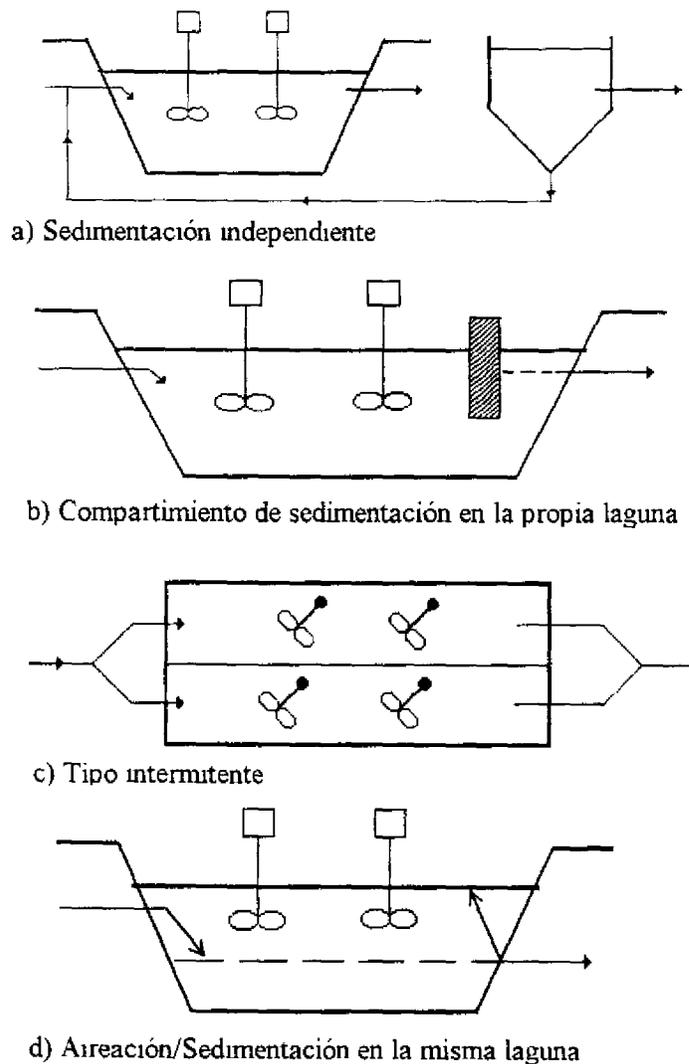


Figura 8.3. Lagunas del tipo aireación extendida

8.2. TEORIA DE AIREACION, EQUIPOS UTILIZADOS

8.2.1. Introducción

La transferencia de gas es un fenómeno físico, en el cual las moléculas del gas se intercambian entre el líquido y el gas a través de la interfase existente entre esos elementos. Este cambio resulta del aumento de la concentración del gas o de los gases en la fase líquida hasta la saturación del líquido sobre determinadas condiciones de presión, temperatura, etc. Podrá también ocurrir lo contrario, es decir, un decrecimiento cuando la fase líquida está supersaturada.

En el caso de las aguas residuales, la fase gaseosa es representada por el aire atmosférico y el líquido, por el agua y sus constituyentes.

La transferencia de oxígeno se obtiene introduciendo oxígeno artificialmente en las aguas residuales con equipos de aireación

La introducción de oxígeno en la masa líquida tiene la principal finalidad de abastecer una cantidad necesaria y suficiente para que haya una autodepuración de las aguas residuales por medio de la oxidación biológica de la materia orgánica

El oxígeno se puede transferir al líquido de las siguientes maneras.

- de las burbujas hacia el agua;
- de la atmósfera hacia las gotas de agua;
- de la atmósfera hacia el agua mediante una interfase, cuyo movimiento puede variar de laminar a turbulento.

En el proceso de transferencia de oxígeno al agua, es muy importante observar que:

- la mezcla es esencial para optimizar la transferencia de oxígeno;
- los dispositivos de aireación tienen un potencial para transferir la masa de oxígeno cuya eficiencia dependerá de la aplicación del dispositivo correcto;
- los parámetros utilizados para asegurar la transferencia de oxígeno deben ser compatibles con el sistema de estudio;
- la DBO removida no es una medida de oxígeno transferido.

8.2.2. Equipos de aireación

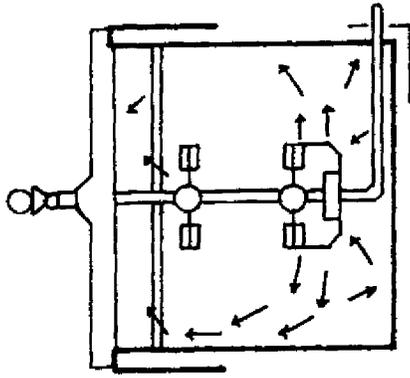
La introducción de oxígeno en las lagunas aireadas mecánicamente es efectuada por

- aire difuso,
- turbina de aireación,
- aireación superficial.

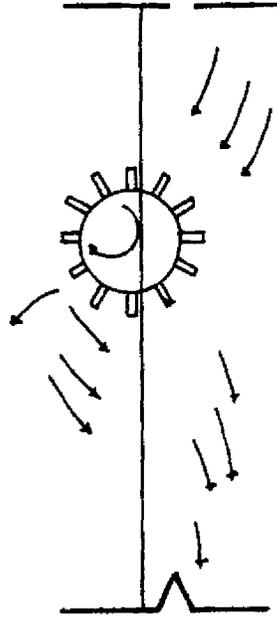
La Figura (8.4) presenta los principales esquemas de equipos de aireación.

8.2.2.1. Aireación por aire difuso

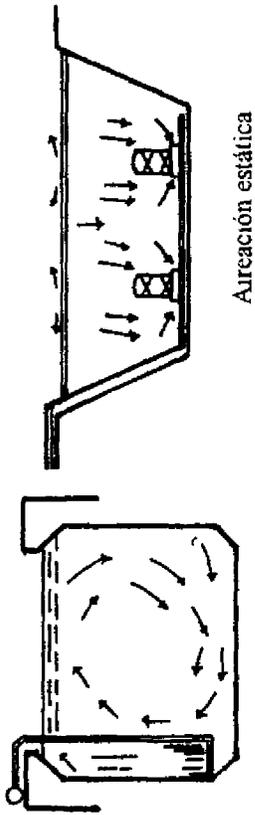
El proceso de transferencia de oxígeno por aire difuso se lleva a cabo mediante aspersores especiales, discos cerámicos porosos que reciben aire inyectado por medio de tuberías a presión, asentadas en el fondo de las lagunas aireadas mecánicamente. Los aireadores por aire difuso se usan en grandes plantas de tratamiento de aguas residuales que utilizan el proceso de lodos activados



B) Sistema mediante turbina de aireación



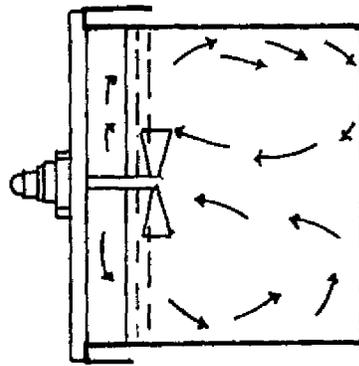
Aireador mecánico de eje horizontal tipo cepillo



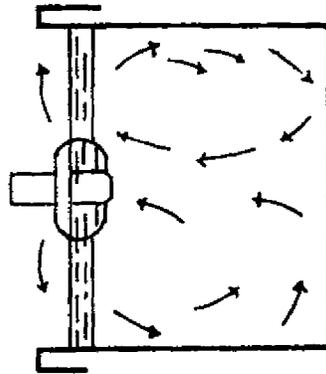
Aireación mediante burbujas

Aireación estática

A) Sistemas de aireación por aire difuso



Flujo radial



Flujo axial

C) Sistema de aireación superficial

Figura 8.4. Esquemas de equipos de aireación

Adaptado de Eckenfelder, Jr (1980)

Otro sistema de aireación por aire difuso es llamado aireación estática, Figura (8 5) Consiste en tubos cilíndricos verticales asentados en el fondo de las lagunas y conectados por tuberías que inyectan aire en tres medidores tipo “VENTURI” instalados en serie en el interior de esos cilindros mediante compresores de baja presión o sopladores. Los “VENTURI” hacen que la mezcla aire-líquido cambie de dirección en tres etapas al pasar a través de las tres turbinas que son impulsadas libremente por el flujo de la mezcla. Cada turbina gira en sentido contrario a la anterior. El efecto combinado del Venturi-turbina, reduce las burbujas a tamaños micrométricos, causando así una mezcla más efectiva del líquido con el aire, impidiendo que la burbuja de aire escape libremente hacia la atmósfera. Es un sistema muy viable para ser utilizado en las lagunas aireadas aerobias con mezcla completa.

8.2.2.2. Aireación por turbina de aireación

La aireación por turbina de aireación se realiza mediante la introducción de aire en tubos difusores instalados en el fondo de las lagunas, y debajo de los dispositivos de rotación de dos rotores de láminas, el más profundo de ellos instalado al lado de los difusores de aire y el segundo un poco más abajo de la superficie de masa líquida sometida a aireación. Es un sistema que tiene poca aceptación.

8.2.2.3. Aireación por aireadores superficiales

En los sistemas de aireación superficial, la aireación mecánica se obtiene por dispositivos rotativos, levemente sumergidos en el agua que, de esta forma, esparcen o difunden el agua por encima de la superficie.

La transferencia de oxígeno para el desecho se basa en el aumento de la superficie de contacto entre el líquido y el aire. Esta sección induce al mismo tiempo un flujo en forma de espiral dentro del tanque, en una trayectoria que depende de la geometría del tanque y del dispositivo de aireación.

La acción mecánica de los aireadores efectúa la transferencia del oxígeno por medio de los siguientes mecanismos:

- movimiento de la superficie del agua, debido a la existencia de ondas en el tanque de aireación;
- burbujas de aire arrastradas por el agua,
- difusión del agua en forma de gotas,
- mezcla aire-líquido en las proximidades del aireador, donde el aire es extraído por el agua.

La transferencia de oxígeno es máxima en el área aireada donde existe la mayor turbulencia.

La cantidad de oxígeno introducida en el agua depende de las fuerzas creadas que son función del diámetro, la rotación, la inmersión, el tipo y el número de hélices del aireador.

En comparación con los sistemas de aire comprimido, la turbulencia es muy intensa y la vida de las burbujas de aire muy corta, de tal suerte que la influencia de los detergentes en el oxígeno consumido es mínima.

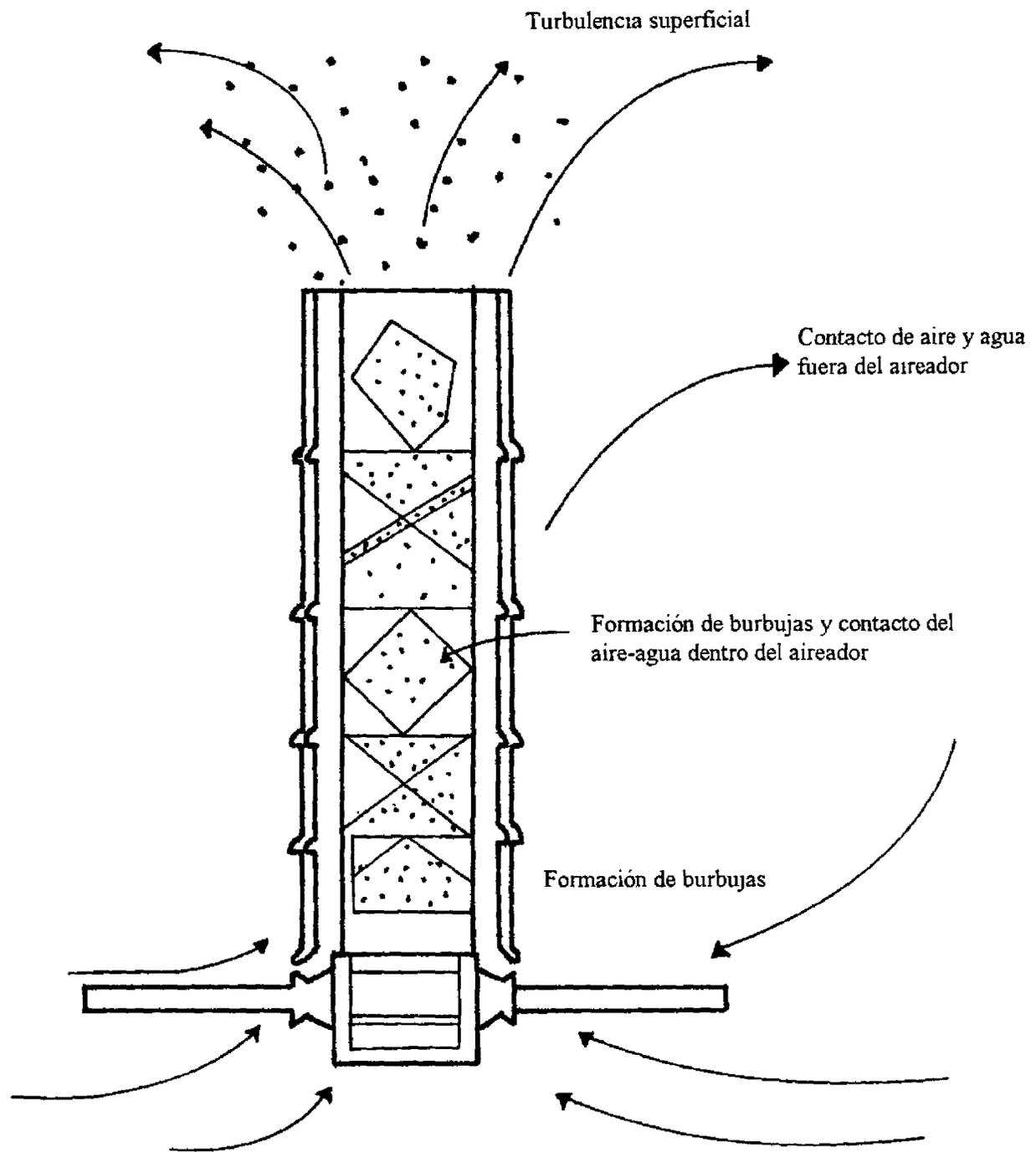


Figura 8.5. Aireador tubular estático

Adaptado de Eckenfelder, Jr (1980)

Además de la función de oxigenar, el aireador deberá producir corrientes de circulación en el tanque, para evitar la sedimentación del lodo biológico.

La forma, las dimensiones y el volumen, deben tener relación con el aireador, de manera que cuando el aireador esté suministrando oxígeno necesario, la mezcla sea suficiente. Cuando esto no ocurre, hay que agregar más energía para la mezcla.

Los aireadores superficiales se pueden clasificar en:

- aireadores con eje horizontal,
- aireadores lentos tipo cono;
- aireadores rápidos tipo turbina.

Los rotores de aireación con eje horizontal son indicados para instalarlos en tanques poco profundos, donde se evitan dificultades debidas a la capa freática muy elevada, o en suelos con baja carga admisible. Los sistemas que utilizan este tipo de aireación son las zanjas de oxidación del tipo PASVEER.

Los aireadores de eje horizontal deben alcanzar dos objetivos

- máxima distribución del agua desplazada con la finalidad de aumentar las interfases;
- maximización de la admisión de aire al agua, aguas arriba del aireador donde las láminas entran en el agua.

Los aireadores lentos tipo cono son recomendados para las pequeñas y medianas potencias instaladas. Son instalados en tanques de sección cuadrada o circular.

El funcionamiento de esos aireadores induce dos tipos de movimientos espirales, sobreponiéndose uno a otro, en una trayectoria completa de flujo. Por intermedio de ese sistema se obtiene la dispersión y el bombeo del líquido.

El movimiento espiral vertical controla la tasa de transferencia de oxígeno, mientras que un aumento del flujo espiral horizontal disminuye la diferencia entre las velocidades de agua y del rotor, reduciendo por ello la capacidad de oxigenación y la eficiencia. Por eso, frecuentemente el tanque está dotado de mamparas, con la finalidad de minimizar el flujo espiralado horizontal.

Los aireadores rápidos tipo turbina son utilizados para grandes y medianas potencias instaladas. También son instalados en tanques de sección cuadrada o circular. Usan como medio de introducción de oxígeno en el líquido simplemente su capacidad de bombeo. En esos equipos la turbina tiene un diámetro pequeño y trabaja en alta rotación, para que aumente el volumen bombeado al máximo. La transferencia de oxígeno se hace solamente por la difusión del agua en la atmósfera.

8.2.3. Detalles del proyecto e instalación de aireadores superficiales

8.2.3.1. Transferencia de oxígeno

La transferencia de oxígeno, para cada equipo dado, funcionando a una velocidad e inmersión determinadas, depende de:

- la potencia específica, w/m^3 ;
- la forma del tanque de aireación;
- la relación entre el diámetro y el lado del cuadrado y la altura, K.

BARBARÁ (1981) definió para las turbinas de sus aireadores superficiales la transferencia de oxígeno en función de su velocidad nominal e inmersión nominal para las condiciones de funcionamiento, los siguientes parámetros

- para una potencia específica de 40 w/m^3 ;
- para un tanque de aireación cuadrado de paredes verticales;
- para una relación $K = \text{lado/altura} = 3,5$.

La Figura (8.6) presenta un gráfico de BARBARÁ (1981) que permite determinar los factores de corrección de transferencia nominal teórica, a fin de obtener la transferencia efectiva en las condiciones reales de utilización.

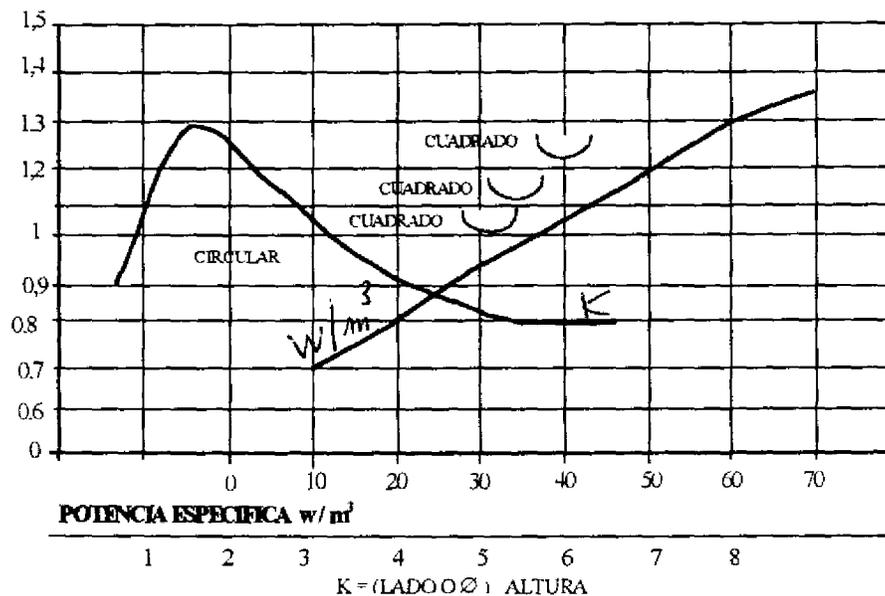


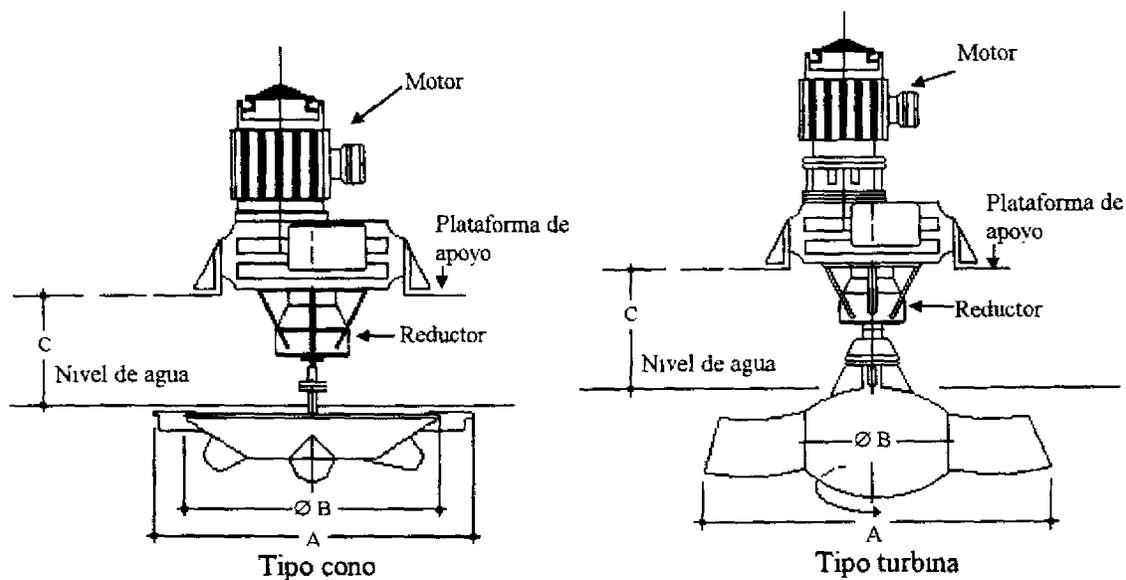
Figura 8.6. Gráfica para la corrección de transferencia de oxígeno nominal teórica

Adaptado de BARBARÁ (1981)

La Figura (8.7) presenta detalles de las dimensiones, la potencia, la capacidad nominal de oxigenación y el número de hélices de aireadores superficiales tipos cono y turbina

8.2.3.2. Esquemas de instalación

Los aireadores que son instalados en las lagunas aireadas mecánicamente deben girar en sentidos opuestos, con la finalidad de obtener concordancia de rotación de los volúmenes aireados, Figura (8.8)



Modelo Tipo de Accionamiento		Diámetro Externo	A	B	C*	Potencia			Capacidad Nominal Oxigenación	No. de Hélices
Horario	Anti-Horario					Absorbida	Motor	CV		
		mm	mm	mm	mm	KW	CV	CV	kgO ₂ .h	Cantidad
SA-01-01	SA-01-11	660	800	660	680	2	2.7	3.0	4.0	6
SA-01-02	SA-01-12	900	1080	900	680	4	5.4	6.0	8.0	6
SA-01-03	SA-01-13	900	1080	900	680	5	6.8	7.5	10.0	9
SA-01-04	SA-01-14	1140	1380	1140	680	6	8.2	10.0	12.0	6
SA-01-05	SA-01-15	1140	1380	1140	680	8	11.0	12.5	16.0	9
SA-01-06	SA-01-16	1140	1380	1140	680	10	13.61	15.0	20.0	12
SA-01-07	SA-01-17	1420	1680	1420	680	13	18.0	20.0	26.0	9
SA-01-08	SA-01-18	1420	1680	1420	680	16	22.0	25.0	32.0	12
SA-01-09	SA-01-19	1650	1980	1650	860	22	30.0	40.0	44.0	9
SA-01-10	SA-01-20	1650	1980	1650	860	27	36.7	50.0	54.0	12
SA-02-01	SA-02-06	1800	1800	800	860	22	30.0	40.0	50.6	9
SA-02-02	SA-02-07	2000	2000	1000	860	31	42.0	50.0	71.3	12
SA-02-03	SA-02-08	2200	2200	1200	1060	37	50.0	60.0	85.1	14
SA-02-04	SA-02-09	2300	2300	1300	1060	49	67.0	75.0	112.7	16
SA-02-05	SA-02-10	2500	2500	1500	1260	64	87.0	100.0	147.2	18

* Valor para turbina fija Para turbina flotante aumentar 200 mm

Figura 8.7. Detalles de aireadores superficiales tipo cono y turbina

Adaptado de BARBARÁ (1981)

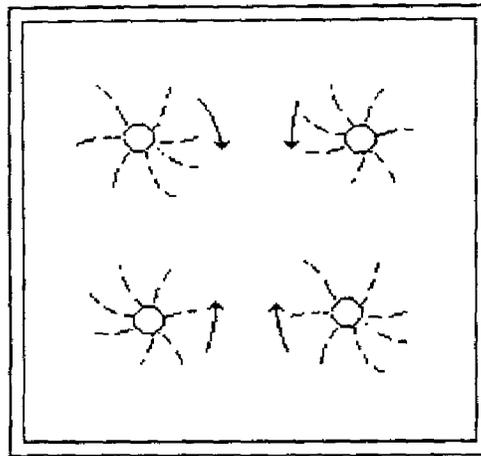


Figura 8.8. Distribución de aireadores en cuanto al sentido de rotación

Adaptado de BARBARÁ (1981)

8.2.3.3. Tipos de montaje

Existen dos tipos de montaje de aireadores superficiales:

- fija;
- flotante

Los aireadores fijos, Figura (8.9) son instalados en una estructura fija elaborada en concreto armado o en perfiles metálicos. Las estructuras fijas de concreto armado son muy dispendiosas debido al gran volumen de concreto utilizado desde sus fundaciones. Las estructuras metálicas aunque son relativamente más baratas, tienen la desventaja de oxidarse fácilmente, disminuyendo su vida útil con más rapidez.

La gran desventaja de las instalaciones fijas es que son definitivas, eliminando la posibilidad de aumentar o disminuir las cantidades de aireadores en etapas futuras, como también cambiarlos por potencias distintas.

Cuando la variación del nivel de las aguas residuales es muy grande o los tanques de aireación son de grandes dimensiones, los aireadores preferiblemente deben instalarse sobre flotantes con tres flotadores, Figura (8.10)

La regulación de la inmersión de los aireadores se efectúa utilizando lastres por encima de los flotadores.

El anclaje de los aireadores flotantes se puede realizar de tres maneras, Figura (8.11):

- en bordes,
- en postes;
- en bloques de concreto instalados en el fondo de la laguna.

Los aireadores flotantes tienen la ventaja de facilitar la operación y se pueden utilizar posteriormente en otros sistemas cuando se vuelven obsoletos en sus sistemas de origen.

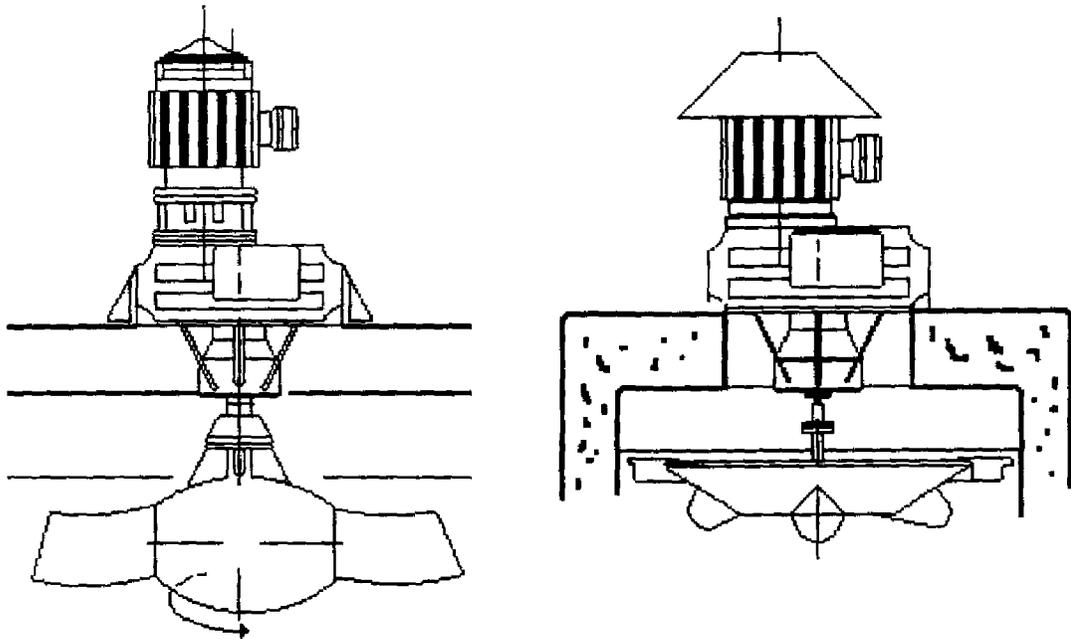


Figura 8.9. Aireadores instalados en estructura fija

Adaptado de BARBARÁ (1981)

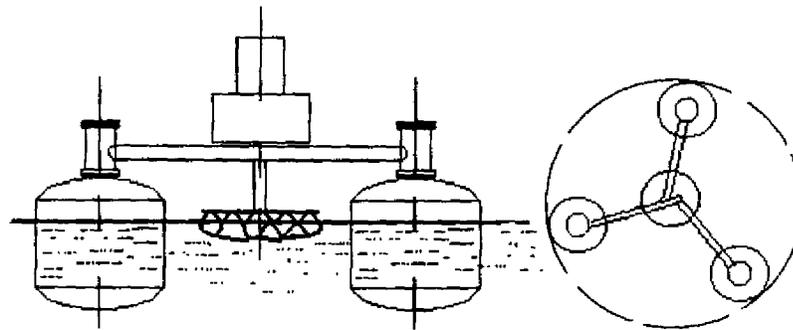


Figura 8.10. Esquema de aireación flotante

Adaptado de BARBARÁ (1981)

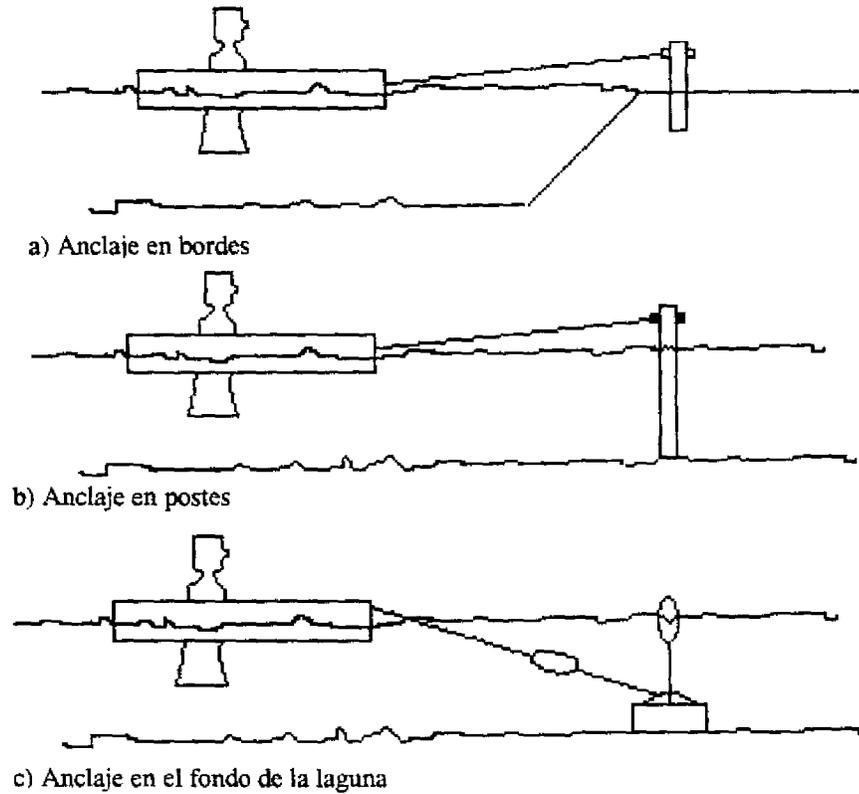


Figura 8.11. Tipos de anclaje de aireadores flotantes

Adaptado de SEDUE (1985)

8.3. EXPRESIONES UTILIZADAS EN EL DIMENSIONAMIENTO DE LOS AIREADORES SUPERFICIALES

La tasa de transferencia de oxígeno en el campo, N , es dada por la ecuación (8.1)

$$N = N_0 \left[\alpha \left(\frac{\beta C_{sw} - C_L}{C_{st}} \right) x_{1,024}^{(T-20)} \right] \quad (8.1)$$

donde:

- N = tasa de transferencia de oxígeno en el campo, $\text{kgO}_2/\text{kw.h}$;
- N_0 = tasa de transferencia de oxígeno mediante prueba en condiciones estándares, a 20°C y oxígeno disuelto igual a cero, $\text{kgO}_2/\text{kw.h}$. Varía de 1,5 a 2,0 $\text{kgO}_2/\text{kw h}$,

$$\alpha = \frac{\text{tasa de transferencia de } \text{O}_2 \text{ en las aguas residuales}}{\text{tasa de transferencia de } \text{O}_2 \text{ en el agua pura}}$$

Según Mara (1976), $\alpha = 0,7$ para las aguas residuales domésticas;

$$\beta = \frac{\text{saturación de la concentración de O}_2 \text{ en la aguas residuales}}{\text{saturación de concentración de O}_2 \text{ en el agua pura}}$$

Según Mara (1976), $\beta = 0,9$ para las aguas residuales domésticas;

C_{sw} = valor de saturación del oxígeno en el agua pura a una temperatura dada, en mg/l;

C_L = concentración de oxígeno disuelto en las lagunas, en mg/l Según Arceivala (1973) y Mara (1976) varía de 0,5 a 2,0 mg/l,

C_{st} = valor de saturación del oxígeno en el agua pura en condiciones estándares usado en la prueba de rotores, a 20°C, al nivel del mar. Es igual a 9,17 mg/l;

T = temperatura media anual, grados Celsius.

La corrección del valor de saturación de oxígeno en el agua pura, C_{sw} , a una determinada temperatura, se debe hacer en función de la altitud, de acuerdo con la ecuación (8.2), utilizando las tablas (8.1) y (8.2)

$$C'_{sw} = C_{sw} \left(\frac{P_A - p}{760 - p} \right) \quad (8.2)$$

donde.

P_A = presión barométrica, mm Hg;

p = presión de vapor de agua saturada a temperatura de las aguas residuales, mm Hg.

8.4. PROYECTO DE LAGUNAS AIREADAS MECÁNICAMENTE

8.4.1. Introducción

Eckenfelder, Jr. y O'Connor (1961) desarrollaron un modelo matemático para el diseño de lagunas aireadas mecánicamente. Ese modelo supone que la tasa de remoción de DBO₅ obedece a una cinética de primer orden en relación a la concentración del substrato disuelto y que la laguna aireada tiene las características de mezcla completa en condiciones estacionarias. Se usa para el dimensionamiento de lagunas aireadas facultativas, de acuerdo con la ecuación (8.3).

$$t = \frac{S_o - S_e}{kX_{v,a}S_e} \quad (8.3)$$

donde.

t = tiempo de retención de la laguna aireada facultativa, días;

k = tasa constante de primer orden de remoción del substrato, 1/mg.día,

$X_{v,a}$ = concentración de sólidos suspendidos volátiles (SSVTA) en la masa líquida de

- la laguna, mg/l;
 S_o = concentración de materia biodegradable en el afluente (DBO₅, DQO, COT), mg/l;
 S_e = concentración de materia biodegradable en el efluente (DBO₅, DQO, COT), mg/l.

Tabla 8.1. Presión barométrica versus altitud

Altitud (m)	Barómetro (mm Hg)
0	760
305	733
610	706
914	681
1219	656
1524	632
1829	610
2438	566
3048	526
3658	487
4267	454

Adaptado de Perry & Perry (1959)

Las lagunas aireadas aerobias con mezcla completa son dimensionadas de acuerdo con la ecuación (8.4)

$$t = \frac{1}{YkS_e - k_d} \quad (8.4)$$

donde:

- t = tiempo de retención de la laguna aireada aerobia con mezcla completa, días,
 Y = coeficiente de producción de lodos, kg SSVTA/kg DBO₅;
 k_d = tasa constante relativa a la respiración endógena, día⁻¹

Las demás variables ya fueron definidas anteriormente.

En la práctica, las lagunas aireadas aerobias con mezcla completa con frecuencia se han usado individualmente o en serie, seguidas de una o más lagunas aireadas aerobias o facultativas o de estabilización

Tabla 8.2. Valores de saturación de oxígeno disuelto en el agua expuesta al aire saturado de unidad y con 20,9% de oxígeno bajo una presión de 760 mm de mercurio

Temperatura en °C	Concentración de Cloruro en agua (mg/l)			Diferencia por 100 mg de Cloruros	Temperatura en °C	Presión del vapor (mm)
	0	5000	10000			
Oxígeno disuelto (mg/l)						
0	14.6	13.8	13.0	0.017	0	5
1	14.2	13.4	12.6	0.016	1	5
2	13.8	13.1	12.3	0.015	2	5
3	13.5	12.7	12.0	0.015	3	6
4	13.1	12.4	11.7	0.014	4	6
5	12.8	12.1	11.4	0.014	5	7
6	12.5	11.8	11.1	0.014	6	7
7	12.2	11.5	10.9	0.013	7	8
8	11.9	11.2	10.6	0.013	8	8
9	11.6	11.0	10.4	0.012	9	9
10	11.3	10.7	10.1	0.012	10	9
11	11.1	10.5	9.9	0.011	11	10
12	10.8	10.3	9.7	0.011	12	11
13	10.6	10.1	9.5	0.011	13	11
14	10.4	9.9	9.3	0.010	14	12
15	10.2	9.7	9.1	0.010	15	13
16	10.0	9.5	9.0	0.010	16	14
17	9.7	9.3	8.8	0.010	17	15
18	9.5	9.1	8.6	0.009	18	16
19	9.4	8.9	8.5	0.009	19	17
20	9.2	8.7	8.3	0.009	20	18
21	9.0	8.6	8.1	0.009	21	19
22	8.8	8.4	8.0	0.008	22	20
23	8.7	8.3	7.9	0.008	23	21
24	8.5	8.1	7.7	0.008	24	22
25	8.4	8.0	7.6	0.008	25	24
26	8.2	7.8	7.4	0.008	26	25
27	8.1	7.7	7.3	0.008	27	27
28	7.9	7.5	7.1	0.008	28	28
29	7.8	7.4	7.0	0.008	29	30
30	7.6	7.3	6.9	0.008	30	32

Adaptado de Hammer et al (1996)

La laguna aireada facultativa también ha sido muy usada como la primera de una serie de lagunas seguida por lagunas de estabilización. También es común el esquema de dos o más lagunas aireadas facultativas en serie

8.4.2. Nuevos criterios del proyecto

En 1972, en los Estados Unidos se estableció una nueva reglamentación para el control de la contaminación de las aguas (The Federal Water Pollution Act of 1972, Federal Register, 1973). Esta reglamentación previa a partir de 1977 la implantación de parámetros más exigentes para el control de calidad de los efluentes de las aguas residuales.

La tabla (8.3) presenta los estándares actualmente adoptados para las plantas de tratamiento de aguas residuales americanas que tratan desechos municipales.

Con estándares más rígidos, se han hecho nuevos estudios para obtenerse tecnologías más modernas a fin de facilitar el cumplimiento de los requisitos exigidos.

Kormanik (1972) demostró matemáticamente que un sistema de dos lagunas aireadas en serie, compuesto de una laguna aerobia con mezcla completa seguida de una laguna facultativa necesitaría de un tiempo de retención total menor que si cada uno de los tipos de lagunas se utilizara individualmente o si dos lagunas aireadas facultativas o más se usaran en serie.

Tabla 8.3. Estándares americanos de referencia para el efluente final de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales

PARAMETRO	MEDIA MENSUAL	MEDIA SEMANAL
DBO ₅ (mg/l)	30	45
Sólidos suspendidos (mg/l)	30	45
Coliformes fecales (CF/100 ml)	100-200	100-400
pH	6-9	6-9

Adaptado de Hammer et al (1996)

Tikhe (1975) perfeccionó el estudio de Kormanik (1972), desarrollando el modelo matemático por él presentado para dos lagunas aireadas en serie, la primera de ellas, aerobia con mezcla completa y la segunda, facultativa. Este estudio se realizó para el tratamiento de los desechos domésticos, de industrias de papel y de refinerías

El modelo es dado por las ecuaciones (8.4) y (8.3) modificadas para las ecuaciones (8.5) y (8.6), que expresan el tiempo de retención de las lagunas aireadas aerobias con mezcla completa y facultativa, de acuerdo con la secuencia de la Figura (8.12).

$$t_1 = \frac{1}{YkS_1 - k_d} \quad (8.5)$$

$$t_2 = \frac{S_1 - S_e}{kX_{v,a(2)}S_e} \quad (8.6)$$

donde:

- t_1 = tiempo de retención de la laguna aireada aerobia con mezcla completa, días,
- t_2 = tiempo de retención de la laguna aireada facultativa, días;
- $X_{v,a(2)}$ = concentración de sólidos suspendidos volátiles (SSVTA) en la masa líquida de la laguna aireada facultativa, mg/l;
- S_1 = concentración de materia biodegradable en el efluente de la laguna aireada aerobia con mezcla completa y en el afluente de la laguna aireada facultativa, en mg/l

Las demás variables ya fueron definidas anteriormente.

Sumando las ecuaciones (8.5) y (8.6), se obtiene la ecuación (8.7) que es la expresión para el tiempo de retención total de las dos lagunas aireadas.

$$t_T = \frac{1}{YkS_1 - k_d} + \frac{S_1 - S_e}{kX_{v,a(2)}S_e} \quad (8.7)$$

Para un conjunto dado de condiciones, S_1 es la única variable en la ecuación (8.7). Derivando esa expresión en relación a S_1 e igualando a cero, obtenemos un valor intermedio de la concentración de DBO₅, S_1 , el cual proveerá el tiempo de retención mínimo

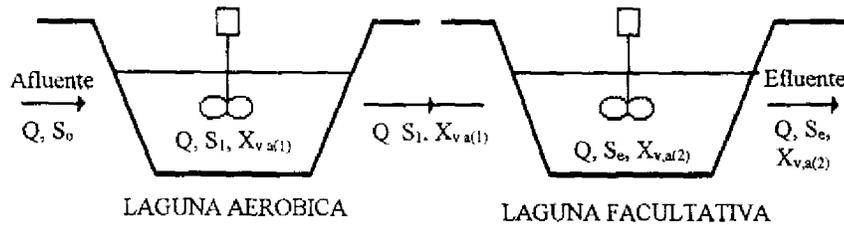


Figura 8.12. Sistema de lagunas aireadas en serie del tipo aerobia-facultativa

$$\frac{dt_T}{dS_1} = -\frac{Yk}{(YkS_1 - k_d)^2} + \frac{1}{kX_{v,a(2)}S_e} = 0$$

$$(YkS_1 - k_d)^2 = Yk^2 X_{v,a(2)} S_e$$

$$YkS_1 - k_d = k\sqrt{YX_{v,a(2)}S_e}$$

$$S_1 = \frac{k_d}{Yk} + \left(\frac{X_{v,a(2)} S_e}{Y} \right)^{0.5} \quad (8.8)$$

Con la ayuda de la ecuación (8.8), se podrá determinar la concentración intermedia de DBO₅, S_1 , y a partir de ahí, estimar los tiempos de retención t_1 y t_2 de las lagunas aerobias con mezcla completa y facultativa respectivamente

Las demás expresiones usadas para el dimensionamiento de las lagunas aireadas en serie se relacionan posteriormente

8.5. GUÍA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE UNA LAGUNA AIREADA AEROBIA CON MEZCLA COMPLETA

Tiempo de retención: t , en días, dado por la ecuación (8.4)

donde:

Y = coeficiente de producción de lodos. Varía de 0,50 a 0,80 kg DBO₅ para los desechos domésticos, Mendonça (1981). Valor comúnmente adoptado para las aguas residuales domésticas a 20°C, $Y = 0,50$, Rich (1980);

k = tasa constante de primer orden de remoción del sustrato. Varía de 0,015 a 0,040 1/mg.día, para los desechos domésticos, Mendonça (1981). Los valores comúnmente adoptados para los desechos domésticos a 20°C varían de 0,01 a 0,03 1/mg.día, Arceivala (1981);

k_d = tasa constante relativa a la respiración endógena, en día⁻¹. Varía de 0,05 a 0,22 día⁻¹, para los desechos domésticos, Mendonça (1981). Valor comúnmente adoptado para los desechos domésticos a 20°C, $k_d = 0,20$ día⁻¹, Rich (1980);

S_e = concentración de materia biodegradable (DBO₅, DQO, COT) en el efluente, en mg/l. Para efecto de cálculo se adopta valor de S_e entre 20 a 30 mg/l;

Tiempo de retención mínimo: t_{min} , en días, dado por la ecuación (8.9), White y Rich (1976). El tiempo de retención mínimo para los desechos domésticos es igual a 0,5 días, White y Rich (1976)

$$t_{min} = \frac{1}{0,33 YkS_o} \quad (8.9)$$

donde

S_o = concentración de materia biodegradable en el efluente (DBO₅, DQO, COT), mg/l.

- Concentración de sólidos suspendidos volátiles en la masa líquida de la laguna (SSVTA) y en el efluente: $X_{v,a(t)}$, en mg/l. Es calculada por la ecuación (8.10)

$$X_{v,a(t)} = \frac{Y(S_o - S_e)}{1 + k_d t} \quad (8.10)$$

- Concentración real de DBO₅ en el efluente: S'_e , en mg/l. Es dada por la ecuación (8.11).

$$S'_e = S_e + 0,54X_{v,a(1)} \quad (8.11)$$

- Reducción real de DBO₅: E en porcentaje. Es definida por la ecuación (8.12)

$$E = \frac{S_o - S'_e}{S_o} 100 \quad (8.12)$$

- Volumen de la laguna: V , en m³. Es dado por la ecuación (8.13)

$$V = Q_{med} \cdot t \quad (8.13)$$

donde

V = volumen de la laguna, m³,

Q_{med} = caudal medio afluente y efluente, m³/día

- Oxígeno necesario: O_2 , en g/día. Es calculado por la ecuación (8.14)

$$O_2 = a(S_o - S_e)Q_{med} + bX_{v,a(1)}V \quad (8.14)$$

donde

a = fracción del sustrato removido utilizado para la producción de energía, en kg O_2 para energía/kg DBO₅. Varía de 0,30 a 0,63, para los desechos domésticos, Mendonça (1981),

b = oxígeno necesario para la respiración endógena, en kg O_2 /kg SSVTA.día, en la masa líquida de la laguna. Varía de 0,05 a 0,28 para los desechos domésticos, Mendonça (1981);

- Tasa de transferencia total de oxígeno en el campo para aireadores superficiales: N , en kg O_2 /kw.h. Es dada por la ecuación (8.1)
- Potencia total necesaria: P_t , en kw. Es obtenida por la ecuación (8.15).

$$P_t = \frac{O_2}{24N} 10^{-3} \quad (8.15)$$

- Potencia unitaria de aireación: P , en W/m³. Es estimada por la ecuación (8.16).

$$P = \frac{P_t}{V} 10^3 \quad (8.16)$$

- Consumo de energía: varía mucho según el autor. La tabla (8.4) muestra esta variación.