

DEPURACION DE AGUAS RESIDUALES EN LAGUNAS(*)

Por EDUARDO DEWISME

Ing. Industrial de la Confederación
Hidrográfica del Norte de España

La depuración de las aguas residuales mediante lagunas aeradas se viene utilizando cada día más, especialmente para tratar efluentes industriales. Una gran parte de la industria de pasta y papel de U.S.A. depura sus aguas residuales mediante este sistema. Este trabajo, fruto de la revisión de la amplia bibliografía cuyas referencias se citan al final, es una monografía del diseño y cálculo de la depuración de aguas residuales en lagunas aerobias. El autor desarrolla el trabajo en dos partes. En la primera describe las diferentes modalidades de lagunas existentes y expone el procedimiento de cálculo de los diversos parámetros que intervienen en su diseño. En la segunda describe los diferentes dispositivos de aeración superficial, cómo se determina su capacidad de oxigenación y desarrolla el procedimiento de cálculo para determinar la potencia necesaria según los kilogramos de oxígeno a suministrar.

PRIMERA PARTE

LAGUNAS DE DEPURACION BIOLOGICA

I. Introducción.

Las lagunas son grandes estanques donde se recogen las aguas para su depuración. Las lagunas pueden ser simplemente grandes charcos naturales o bien estanques excavados en el terreno. Con el fin de evitar las filtraciones y proteger las orillas contra la acción erosiva de la turbulencia superficial (en el caso que se disponga una aeración superficial), se protegen las paredes o simplemente las orillas, ya sea con un empedrado o con muros de obra de fábrica. En ocasiones se recubre toda la laguna de una membrana de goma.

Cada día se utilizan más las lagunas como sistema de depuración de aguas residuales de elevado rendimiento de depuración biológica. Este procedimiento cuenta como único inconveniente la gran superficie de terreno que necesita. Por lo demás, todo son ventajas, como el elevado grado de depuración que se puede conseguir, el bajo costo operacional, su gran flexibilidad para admitir cargas punta circunstanciales, etc.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de julio de 1972.

Dentro del sistema de lagunas, éstas pueden dividirse en:

Lagunas aeróbicas:

De aeración atmosférica.

De aeración atmosférica y mecánica.	Totalmente aerobias (equivalentes a sistema de fangos activados). Aerobias-anaerobias o lagunas facultativas.
-------------------------------------	--

Lagunas anaeróbicas.

Las lagunas anaeróbicas se utilizan para aguas residuales de gran concentración en DBO, por ejemplo, superior a 3.000 mg/l, como es el caso de aguas residuales de mataderos, granjas, fábricas de conservas, etc. Con estas aguas se consigue una mayor reducción de DBO por metro cúbico de laguna, cuando en ésta se desarrolla un proceso anaeróbico. Normalmente este tipo de laguna se complementa con un tratamiento posterior aeróbico. Ahora bien, tienen el inconveniente de los pestilentes olores que desprenden, por lo que aun contando con sus ventajas, pocas veces es posible utilizarlas.

Las lagunas aeróbicas son las más utilizadas, especialmente para aguas residuales con baja concentración, por ejemplo, por debajo de 500 mg/l de DBO. Hasta hace unos diez años

la mayor parte de las lagunas existentes tenían tan sólo una aeración natural atmosférica, necesitando por ello grandes extensiones de terreno con una altura de agua pequeña, entre 0,7 y 1,5 m. Este tipo se denomina en algunos Estados de U.S.A. *pond*, si bien en otros se denomina también *lagoon*. Estas lagunas tienen tiempos de retención que, en general, superan el mes. Las cargas de DBO que se aplican son bajas, por ejemplo, 5 Kg de DBO por 1.000 m² y día.

Al objeto de paliar la gran superficie de terreno que precisan los *pond*, éstos se han dotado de otros sistemas de aeración suplementaria artificial, con lo que se disminuyen grandemente las necesidades de terreno. Esta modalidad se denomina normalmente en U.S.A. *lagooning*.

Dentro de las lagunas con aeración artificial se pueden distinguir dos tipos. Unos en los que en la laguna se dispone una aeración, tal, que todo su volumen se encuentra en condiciones aeróbicas, consiguiendo, además, mantener en suspensión toda flora biológica. En este caso la laguna funciona como un sistema de fangos activados normal. Existe otro tipo, que actualmente es el más utilizado, en el que la aeración que se dispone no consigue mantener en suspensión la totalidad de los lodos biológicos, existiendo zonas donde sedimentan y entran en un proceso anaeróbico. Los americanos denominan a este tipo de laguna *facultative lagoon*. Esta modalidad ha aparecido al haber quedado sobrecargados los *ponds* naturales que disponen algunas factorías, al haberse incrementado sus vertidos por nuevas ampliaciones de las instalaciones de producción. Para eliminar la sobrecarga tuvieron que recurrir a disponer sistemas suplementarios de aporte de oxígeno, en la mayor parte de los casos mediante turbinas de aeración. Estas lagunas tienen tiempos de retención entre tres y diez días, con profundidades de agua de 2 a 4 m. Las fotos de las figuras 10 y 13 muestran dos lagunas según esta modalidad.

II. Lagunas naturales.

En este tipo de laguna la aeración tiene lugar, de una parte, por transferencia de oxígeno desde la atmósfera al agua y, por otra, por la acción de fotosíntesis que desarrollan las algas que proliferan en la superficie de la laguna.

El grado de aeración atmosférica depende del déficit de oxígeno que existe en la laguna, la temperatura del agua, el viento, etc.

El déficit de oxígeno debe mantenerse al máximo posible sin que descienda el contenido de la masa líquida por debajo de 0,5 a 1 mg/l, que es el mínimo que precisan las células biológicas para llevar a cabo el proceso de depuración. La aeración atmosférica aumenta con la temperatura del agua y la velocidad del viento. Normalmente se suele expresar el grado de aeración en miligramos de oxígeno, por litro de laguna, que se introducen por día. Al expresarse el grado de aeración por unidad de volumen de la laguna, el valor de este parámetro depende de la profundidad, puesto que para el mismo volumen, al disminuir la profundidad, aumenta la superficie de transferencia.

Los valores de la velocidad de aeración de la laguna varían entre 1 y 9 mg/l y día, si bien los valores más normales están entre 1 y 4 mg por litro.

Para conseguir valores superiores a estos últimos es preciso que la profundidad de la laguna sea muy baja y que exista viento.

Tan importante como la aeración atmosférica es la que se obtiene por medio de la fotosíntesis de las algas. Las algas, durante el día, mediante la luz, absorben CO₂, ya sea de la atmósfera o del agua (procedente de la actividad biológica depuradora) y desprenden oxígeno. La relación entre el peso de oxígeno producido y el de algas se ha encontrado que vale entre 1,25 y 1,75 mg/l y día. Se ha observado en algunas lagunas una velocidad de aportación de oxígeno por las algas de hasta 200 mg/l de laguna. Al absorber las algas el CO₂ contenido en el agua, aumenta su pH, llegando incluso a 11, lo que motiva que el proceso biológico depurador se detenga. Durante la noche, por el contrario, las algas absorben oxígeno y desprenden CO₂. Como consecuencia de la doble acción diurna y nocturna, de desprendimiento y absorción de oxígeno y la elevación de pH que se origina durante el día, es conveniente limitar el contenido de algas en la laguna. Si se sobrepasa este límite se puede llegar a que durante la noche el contenido de oxígeno de la laguna descienda a cero, pasando a condiciones anaerobias. Esto es debido a que, si existen muchas algas, el contenido de oxígeno de la laguna se eleva, al final del día, por encima del valor que se necesita en el proceso biológico.

gico, originando un incremento del consumo de las algas durante la noche, de forma que el balance de la fotosíntesis resulta negativo.

Para ayudar a la acción de fotosíntesis es preciso favorecer la entrada de la luz en la laguna, evitando que el líquido esté turbio, reduciendo la profundidad, etc. De aquí que en las lagunas de este tipo la profundidad normal oscile de 0,7 a 1,5 m.

La carga de DBO con que se diseña este tipo de laguna, para evitar que se presenten condiciones anaeróbicas, oscila, según el tipo de efluente y temperatura, entre 2 y 5 gr/m² de superficie y día, es decir, aproximadamente los gramos de oxígeno que se aportan a la laguna por aeración atmosférica y por la fotosíntesis. Con esta carga se puede conseguir un rendimiento de eliminación de DBO del orden del 90 por 100.

Debido a la gran superficie de terreno que necesita el *pond*, en la actualidad apenas se utiliza, habiéndose sustituido por las lagunas aeradas.

III. Lagunas aerobias-anaerobias.

III.1. Rendimiento de eliminación de DBO.— En este tipo de laguna, debido a que la concentración de lodos biológicos que se mantiene en suspensión es baja, la eliminación de DBO es principalmente una función del tiempo de retención, temperatura y tipo de vertido a depurar.

La reducción de DBO en estas lagunas, según Eckenfelder, se ajusta a la ecuación:

$$L_e = L_o \frac{1}{1 + Kt}, \quad (1)$$

en la que:

L_e = DBO del efluente depurado.

L_o = DBO del agua de entrada.

t = tiempo de retención en días.

K = coeficiente de velocidad de eliminación de DBO en este tipo de laguna.

El valor de K depende, además de las características del efluente, del diseño de la laguna. Por ejemplo, para aguas residuales urbanas la literatura señala valores para K desde 0,3 a 1. Como valor medio se suele tomar 0,5.

La ecuación (1) se obtiene del planteamiento del siguiente balance de materia.

Los kilogramos de DBO eliminados en la laguna, por día, son igual a los que entran menos los que salen, es decir:

$$L_o \cdot Q - L_e \cdot Q = V \cdot r, \quad (2)$$

siendo:

Q = volumen de vertido diario.

V = volumen de la laguna.

r = velocidad de eliminación de la DBO.

El proceso de eliminación de DBO se considera que se desarrolla, siguiendo una reacción de primer orden, directamente proporcional a la concentración de DBO que queda sin depurar, de forma que r vale:

$$r = \frac{dc}{dt} = KC,$$

donde:

C es la concentración de DBO que queda en el agua al cabo de un tiempo t desde la iniciación de la operación.

Considerando que la turbulencia que se mantenga en la laguna es suficiente para considerar que el flujo a través de ella pueda considerarse "homogéneo", es decir, que las aguas tienen las mismas características en cualquier punto, entonces la DBO del efluente de salida es igual a la que existe en cualquier punto de la laguna, o sea, que la ecuación (2) puede ponerse:

$$L_o \cdot Q - L_e \cdot Q = K \cdot L_e \cdot V;$$

ahora bien:

$$V = Q \cdot t,$$

de donde:

$$L_o \cdot Q - L_e \cdot Q = K \cdot L_e \cdot Q \cdot t,$$

y simplificando:

$$L_o = L_e (1 + Kt).$$

Existen algunas limitaciones en la ecuación deducida que hacen que su aplicación no sea totalmente precisa.

De acuerdo con los principios de la deducción desarrollada, la ecuación obtenida no es

válida si no existe flujo homogéneo, y en realidad en las lagunas del tipo que estamos estudiando el flujo no es totalmente homogéneo. Por otra parte, parte de la DBO de entrada (L_0) está en forma de sólidos en suspensión que, debido a que no se mantiene una elevada turbulencia en la laguna, sedimentan en ella parcialmente, siguiendo un proceso de descomposición anaerobia. En este caso existe una reducción de DBO superior a la que expresa la ecuación obtenida. Sin embargo, la laguna con el tiempo se va llenando de sólidos sedimentados, disminuyendo su volumen útil, de forma que aumenta la turbulencia en el volumen útil, llegando a un equilibrio entre los sólidos que sedimentan y los que se ponen en suspensión de nuevo. Hasta este momento la eliminación de DBO que tiene lugar en la laguna es superior a la que señala la ecuación deducida. Este fenómeno influye en la amplia variación de los valores de K obtenidos, a los que anteriormente aludimos.

La temperatura de las aguas en depuración interviene de forma importante en el valor de K , existiendo una correlación para los valores de K a diferentes temperaturas, ésta es:

$$K_t = K_{20^\circ\text{C}} \theta^{t-20},$$

en la que:

K_t = es el valor del coeficiente a la temperatura T .

$K_{20^\circ\text{C}}$ = es el valor del coeficiente a 20°C .

t = temperatura en $^\circ\text{C}$.

θ = coeficiente de temperatura.

El valor de θ depende, a su vez, ligeramente de la temperatura, de aquí que en la literatura aparezcan valores entre 1,06 y 1,09 en la zona de temperaturas de 10 a 30°C .

III.2. Temperatura del agua en la laguna. — La temperatura del agua en la laguna depende de un balance calorífico entre el que se aporta y se pierde. Si la temperatura de entrada es baja y el tiempo de retención es grande, la temperatura del líquido en la laguna se aproxima a la temperatura ambiente. La temperatura de la laguna se puede calcular realizando el siguiente balance calorífico:

Suponiendo que en la laguna existe flujo homogéneo y que el calor específico del agua residual es uno, se cumple:

Calorías que entran = calorías que salen + calorías perdidas por la superficie.

$$Q \cdot t_e = Q \cdot t_s + H.$$

siendo:

Q = caudal horario que entra y sale de la laguna en m^3 .

t_e = temperatura del agua de entrada en $^\circ\text{C}$.

t_s = temperatura del agua en la laguna y de salida en $^\circ\text{C}$.

H = pérdida de calor en la laguna, en calorías por hora, siendo $H = S F (t_s - t_a)$ en la que

F = coeficiente global de transferencia de calor por metro cuadrado de superficie y hora y grado, para el que se toman valores entre 0,01 y 0,02, según el grado de turbulencia que exista en la superficie de la laguna.

t_a = temperatura atmosférica.

S = superficie de la laguna en metros cuadrados.

Sustituyendo y reagrupando términos, el balance calorífico puede expresarse según la ecuación:

$$Q (t_e - t_s) = S \cdot F (t_s - t_a).$$

Teniendo en cuenta que el volumen de la laguna es igual al caudal por el tiempo de retención (T) y también a la superficie por la profundidad media (H), la fórmula anterior puede expresarse según:

$$t_s = \left(t_a + \frac{t_e \cdot H}{F \cdot T} \right) \left(\frac{1}{1 + \frac{H}{F \cdot T}} \right)$$

III.3. Oxígeno necesario. — La cantidad de oxígeno necesario para la asimilación de la DBO es la suma de la que se necesita para la absorción de la DBO por las células biológicas, más las que éstas consumen en el proceso endógeno de asimilación. El primer sumando es proporcional al número de kilogramos de DBO que se eliminan, y el segundo, proporcional a la masa de células que existen en aeración, dependiendo además de la edad del fango. El consumo puede representarse por:

$$O_2 = a \times \text{DBO} + b \text{ MLSS},$$

siendo a y b los coeficientes de proporcionalidad. El valor de a para aguas residuales urbanas oscila entre 0,35 y 0,55. El de b es más variable, oscilando entre 0,1 y 1,5. En el caso de lagunas de tipo facultativo, debido a que la concentración de células biológicas es baja, el consumo de oxígeno se puede expresar directamen-

te sobre los kilogramos de DBO a eliminar, según la ecuación:

$$O_2 = DBO \times L \times P;$$

siendo:

O_2 = Kg de oxígeno necesarios por hora.

DBO = Kg de DBO₅ a eliminar por hora.

L = relación entre el DBO último (unos veinte días) al DBO₅.

P = tanto por uno de la DBO a eliminar.

Fijando, por ejemplo, para $L = 1,4$ y para $P = 0,9$, resulta:

$$O_2 = 1,33 D.$$

Según valores que cita la bibliografía, para aguas residuales de papeleras $L \times P$ tiene valores desde 0,9 a 1,3.

Esta cantidad de oxígeno se suministra, normalmente, mediante aeradores de superficie convenientemente distribuidos en la laguna. La potencia a disponer en los aeradores se calcula de acuerdo con la teoría que exponemos en la segunda parte de este trabajo. No obstante, es preciso disponer una potencia mínima para asegurar la distribución de oxígeno a toda la masa líquida del estanque, esta potencia mínima se considera que debe ser de orden de 0,003 a 0,004 kW por metro cúbico de laguna. Por esto, si el cálculo de la potencia necesaria, de acuerdo con los kilos de DBO a eliminar, da potencias inferiores a las señaladas, se disponen los mínimos.

III.4. *Fangos biológicos.*—En la asimilación de la DBO por las células biológicas se forman nuevas células, o sea, fangos. Ahora bien, estas nuevas células, a su vez, se van consumiendo por respiración endógena, de forma que según el tiempo de retención del estanque se habrán reducido en mayor o menor proporción. Como resultado en todo proceso de depuración biológica se forman unos lodos, cuyo peso está en razón directa con el de kilogramos de DBO eliminados y en razón inversa con el tiempo en que los lodos han estado en aeración. La ecuación que define el peso de lodo que se forma es:

$$\Delta S = A \times L - B.S.T.,$$

siendo:

ΔS = producción de lodos en Kg de materia seca.

A = Kg de lodo que se forma al eliminarse un Kg de DBO en forma de substrato.

L = Kg de DBO eliminados en forma de substrato.

B = velocidad de destrucción endógena de los lodos formados.

S = peso de lodo biológico que existe en el estanque de aeración, en Kg.

T = tiempo que se mantienen los lodos en aeración.

Si bien el valor de A oscila alrededor de 0,5 a 0,7, el valor de K es más variable, pues depende del tipo de agua residual, de la intensidad de aeración que se mantenga, tipo de flujo, tiempo y otras variables. La bibliografía cita valores entre 0,02 y 0,5. En consecuencia existe siempre una formación neta de lodos que puede oscilar entre 0,1 a 0,6 Kg por kilogramo de DBO eliminado (esta última cifra es válida para sistemas de fangos activados modalidad *high-rate*). Para la laguna de tipo facultativa, con tiempo de retención hasta de diez días, se pueden tomar valores entre 0,02 y 0,05. Estos sólidos, aun disponiendo en la laguna una zona tranquila de sedimentación, salen en mayor o menor proporción con el efluente. Según las limitaciones que se impongan al efluente, será precisa, o no, una sedimentación complementaria a la salida del agua de la laguna.

III.5. *DBO del efluente.*—Los lodos que salen en suspensión con las aguas aumentan la DBO del agua tratada, de forma que para reducir la DBO del efluente caben dos posibilidades: una, sedimentar bien las aguas; otra, prolongar la aeración. El DBO que arrastran las aguas, originado por los sólidos en suspensión, proviene, por una parte, de los sólidos primarios que entraron a la laguna con el agua bruta y que no han decantado en ella, y por otra, de los lodos biológicos que arrastran. La DBO del efluente de la laguna, debido a los sólidos, puede expresarse según la ecuación:

$$DBO = f_1 S S + f_2 \Delta S,$$

siendo:

f_1 = DBO de un Kg de sólidos primarios.

f_2 = DBO de un Kg de lodos biológicos.

SS = sólidos en suspensión primarios que escapan en el efluente.

ΔS = sólidos en suspensión biológicos que escapan en el efluente.

El valor de f_1 suele ser muy pequeño, del orden de 0,1; sin embargo, f_2 puede llegar a más de 0,5. Este último valor depende fundamentalmente del tiempo de retención de la laguna.

IV. Lagunas aerobias.

No describimos esta modalidad de laguna por funcionar como un sistema de fangos activados en flujo homogéneo.

Este proceso lo desarrollé en el artículo "Principios y criterios de diseño de las instalaciones de depuración por fangos activados" que se publicó en el número de agosto de 1968 de la REVISTA DE OBRAS PUBLICAS.

SEGUNDA PARTE

AERACION MECANICA SUPERFICIAL

I. Consideraciones previas.

La introducción de oxígeno en un medio acuoso, por medio de una aeración, es la base de los procesos de depuración biológica por

fangos activados. Dentro de los procedimientos de aireación, éstos pueden dividirse en dos sistemas: los de insuflación de aire en profundidad y los mecánicos mediante una turbina de aireación superficial.

En los primeros tiempos de desarrollo de los procesos de depuración por fangos activados, hacia el año 1900, predominaron los sistemas de aeración por insuflación de aire. Los procesos mecánicos, si bien también aparecieron muy pronto, como es el caso de los cepillos Kessner (fig. 1) y turbinas Simplex (figs. 6, 7 y 8), su utilización ha estado en minoría hasta hace unos años. En la actualidad el sistema de aeración mediante turbinas se ha impuesto sobre los de insuflación, por las mayores ventajas que presentan, tanto económicas como de tipo técnico. En el cuadro I se comparan algunos valores de los diferentes sistemas de aireación, donde se observan las ventajas económicas de la aeración por turbinas de eje vertical.

A continuación vamos a exponer los principios de funcionamiento y criterios de diseño de los procedimientos de aeración superficial.

II. Dispositivos de aeración superficial.

Estos equipos son agitadores que crean una turbulencia en el líquido a aerar, facilitando con ello la introducción del oxígeno del aire en la masa líquida. Dentro de estos dispositivos podemos distinguir dos tipos: las turbinas de rodete (eje vertical) y los cepillos (eje horizontal), siendo los primeros los que en la actualidad se vienen montando en más del 90 por 100 de las instalaciones de aeración superficial, razón por la que en nuestro estudio nos referimos especialmente a ellas.

Existe un sistema de aeración mixto, en el que se utiliza, a la vez, una insuflación de aire y una turbina sumergida profunda. Esta última tiene la misión de romper las gruesas burbujas, que salen del anillo de insuflación, en finas, con lo que mejora el rendimiento de oxigenación, a la vez que produce el efecto de bombeo preciso para la distribución del oxígeno y mantenimiento de la flora biológica en suspensión. Este procedimiento, según esquema de la figura 2, ha sido empleado por las firmas, "INFILCO", en su aparato "aeroaccelator" y "DOR-OLIVER", según su sistema patentado "INKA". Su rendimiento energético (Kg de oxígeno introducido

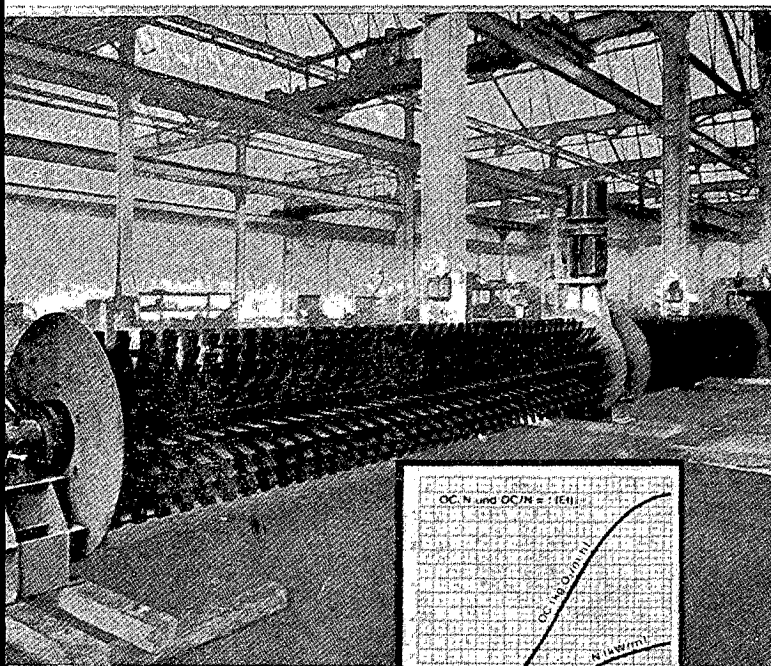
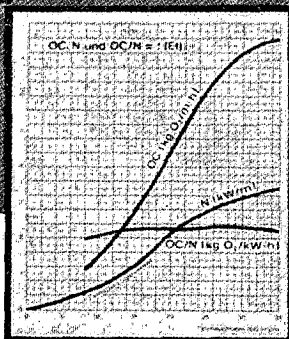


Fig. 1.—Aerador tipo "Mammoth", con curvas de capacidad de oxigenación según la inmersión.



CUADRO I. — Aeradores de superficie.
Comparación de valores de diferentes sistemas.

SISTEMA DE AERACION	Kg O ₂ /HP/HR	(A) kWh/Kg O ₂	(B) Energía coste/día	Coste relativo energía	(A) Coste relativo inversión
Insuflación de aire en burbujas finas ...	0,96	0,78	18,7	1,75	3,20
Insuflación de aire en grandes burbujas.	0,63	1,22	29,5	2,75	2,50
Sistema Inka (mixto)	1,50	0,50	12,0	1,11	1,00
Aeración mecánica eje horizontal	1,36	0,55	13,2	1,25	1,25
Aeración mecánica eje vertical	1,68	0,44	10,5	1,00	1,00
Sistema de agitación "Sparged"	0,96	0,78	18,7	1,75	2,25
Aeración por Venturi	0,63	1,22	29,6	2,75	1,70

(A) Tomado de la revista *The Chemical Engineer* abril 1964.

(B) Pesetas por Kg O₂/día, sobre la base de 1 pta /kWhora.

por kWh), contando la potencia del compresor y de la turbina, es inferior al de las turbinas de aeración superficial.

Las turbinas de aeración son equipos similares a un agitador, cuyo rodete gira semisumergido en el agua, y tiene la doble misión de conseguir la introducción del oxígeno atmosférico en la masa de agua y su posterior distribución a todo el volumen del estanque. Las corrientes que se forman sirven, además, para mantener en suspensión la flora biológica que realiza la depuración.

El rodete se construye de muy diversas formas geométricas, existiendo dos tipos principales, unos grandes, "turbinas", y otros peque-

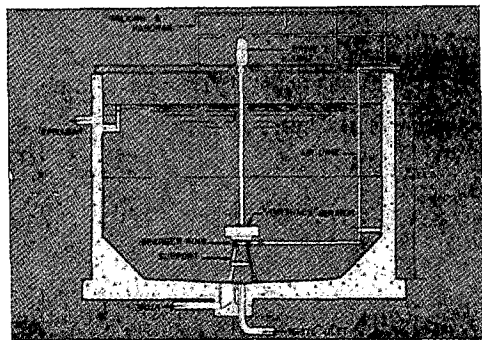


Fig. 2. — Aeración mixta por insuflación de aire y turbina.

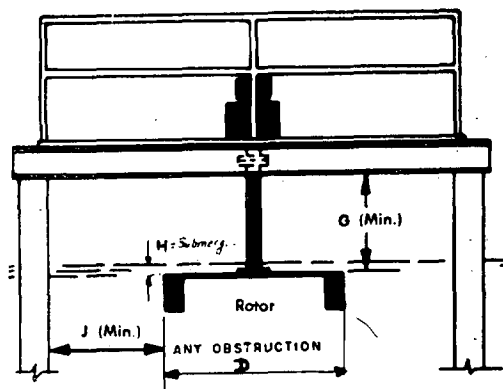


Fig. 3. — Aerador con rotor de turbina.

ños "hélices". Las palas, en su giro, se encargan de producir una aspiración central del líquido y su impulsión radial, consiguiendo así crear una gran superficie de transferencia. Por otra parte, con la turbulencia que se crea, se atrapan burbujas de aire en la masa líquida, que aumentan la introducción de oxígeno. El efecto de bombeo distribuye el oxígeno absorbido por todo el estanque. La doble misión del rotor, de agitar y bombear, se regula mediante la forma geométrica del rotor y su inmersión. Se entiende por "inmersión" la altura del líquido que existe por encima del rotor (véase la fig. 3). La "relación de inmersión" se define como el co-

ciente entre el diámetro del rotor y la inmersión con que trabaja. Al disminuir la inmersión del rotor, aumenta el efecto de agitación, pero disminuye el efecto de bombeo; a mayor diámetro del rodete mayor inmersión se precisa. Para cada turbina y estanque existe una determinada inmersión, con la que se consigue optimizar el rendimiento oxigenador de la turbina en el estanque. El efecto de bombeo de la turbina varía, también, con la velocidad de giro del rotor. La velocidad de giro de la turbina se fija de modo a conseguir una velocidad periférica, entre 3 y 4,5 m/seg, que son con las que se obtienen los mejores rendimientos. Por tanto, las turbinas de gran diámetro giran a muy pocas revoluciones, precisando un gran grupo reductor.

La potencia consumida por la turbina es, aproximadamente, proporcional a la inmersión del rotor y al cubo de la velocidad periférica.

III. Fundamentos del proceso de oxigenación.

La introducción del oxígeno en la masa de agua en aeración tiene lugar por un proceso de transferencia de masa a través de la interfase aire-agua. Después, por medio de un proceso de difusión y por la propia turbulencia que se mantiene en el estanque, el oxígeno se transfiere al volumen total. Del proceso total de transferencia el factor que verdaderamente limita la capacidad de oxigenación es el de difusión desde la interfase aire-agua hacia la masa líquida. La ley básica que define este proceso, expresada en forma diferencial, es:

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_s - C_t); \quad (1)$$

que define que la velocidad de transferencia del oxígeno por difusión en la masa líquida, es proporcional a un coeficiente global y a la diferencia de concentraciones de oxígeno entre la interfase, que se considera en saturación (C_s), y la concentración de oxígeno, en el tiempo t , en la masa líquida (C_t). Este gradiente de concentraciones se define como la fuerza impulsora. El coeficiente global $K_L a$, que depende de las características de la turbina y del estanque, es, en realidad, igual a $K_L \cdot \frac{A}{W}$, siendo: K_L , el propio coeficiente de difusión del oxígeno del aire al agua; A , la superficie total de interfase con-

seguida por la turbulencia de la turbina, y W , el volumen o peso de la masa de agua del estanque en aeración. Como es imposible determinar el valor de A , es por lo que se utiliza el coeficiente global de transferencia $K_L a$, que se puede determinar mediante ensayos. $K_L a$ representa la cantidad de oxígeno transferido en una hora y se expresa como p.p.m./hora y p.p.m. de déficit, o más ampliamente se utiliza simplemente el valor/hora.

La ecuación señalada no se ajusta totalmente al proceso de aeración real que tiene lugar en un estanque, pues en él la transferencia del oxígeno, a la totalidad del estanque, se lleva a cabo principalmente por las corrientes de turbulencia creadas por el efecto de bombeo de la turbina, más bien que por un proceso puro de difusión. No obstante, ante la dificultad de encontrar una fórmula que represente el proceso real, se viene utilizando la ecuación indicada.

Integrando la ecuación (1) se tiene:

$$2,3 \cdot \log \frac{C_s - C_0}{C_s - C_t} = K_L a t,$$

en la que C_0 es la concentración en oxígeno de la masa líquida para $t = 0$, o sea, la inicial.

IV. Cálculo de la capacidad de oxigenación de una turbina.

Estas mismas fórmulas nos sirven para calcular la capacidad de oxigenación de una turbina aeradora. La definición de la capacidad de oxigenación es diferente en Europa y América. En Europa se adopta como expresión de la capacidad de oxigenación la cantidad de oxígeno, en gramos/hora, que la turbina transfiere a un metro cúbico de volumen de agua en aeración, que se parte con un contenido inicial de cero de oxígeno y 10° C. En América se adopta como definición, la cantidad de oxígeno expresada en kilogramos transferidos al líquido por kilovatio/hora útil transmitido al rotor. La masa líquida se parte también con cero de oxígeno, pero a 20° C.

Ambas expresiones de la capacidad de oxigenación son perfectamente comparables, pues la conversión de unas condiciones estándar, en otras es muy sencilla y en la práctica equivalentes.

Al objeto de que los datos que suministra

una firma como capacidad de oxigenación de los modelos de sus turbinas sean comparables, con los de otras firmas, es preciso que los ensayos de oxigenación se realicen de idéntica forma, y lo interesante sería que se llevaran a cabo en condiciones similares a las de aplicación. Ahora bien, es muy difícil realizar los ensayos en idénticas condiciones a las de aplicación, pues, entre otras cosas, sería preciso disponer de un gran estanque de ensayos debidamente preparado.

Una firma constructora de turbinas establece la siguiente forma de realizar el ensayo:

1.º El estanque en el cual se vaya a realizar el ensayo deberá limpiarse completamente y llenarse con agua tamponada.

2.º La temperatura del agua, si es posible, debiera estar próxima a los 20º C.

3.º Se instalan bombas de toma de muestras a tres diferentes profundidades (en un estanque de 4,8 m de profundidad; por ejemplo, a 1,2, 2,4 y 3,6 m de profundidad) en dos puntos de un diámetro, distantes del centro un octavo y seis octavos del lado del estanque. En puntos próximos al rodete, se encontrarán contenidos de oxígeno superiores a los existentes en las aristas inferiores.

4. El aerador se pone en marcha de acuerdo con las condiciones en que se quiere ensayar.

5.º Para eliminar el contenido de oxígeno del agua se añade, primeramente un catalizador, cloruro o sulfato de cobalto que se disuelve en el estanque hasta una concentración de 10 ppm. Otros autores señalan que es preciso no adicionar un exceso de catalizador, pues éste interfiere si las mediciones se realizan por el procedimiento Winkler, estableciendo que 0,05 a 0,1 mg/l como ion cobalto, es suficiente para conseguir la reacción catalítica entre el sulfito sódico y el oxígeno del agua.

6.º Seguidamente se añade el sulfito sódico, al menos en dos puntos del estanque. Si el agua contiene 10 mg/l de oxígeno disuelto, se precisa, aproximadamente, 120 gr de sulfito sódico por m³ de agua, incluyendo un exceso para compensar el oxígeno que se introduce durante el período de mezcla.

7.º En cuanto se inicia la elevación del contenido de oxígeno en el estanque, se cogen muestras de los seis puntos señalados, a inter-

valos entre uno a cinco minutos. Estos intervalos se ajustan de forma a conseguir al menos seis tomas mientras el contenido de oxígeno se eleva al 70 por 100 del contenido de saturación. La determinación de oxígeno se realiza por el método de Winkler.

8.º Se va midiendo, durante el ensayo, el consumo de energía del motor. Con los rendimientos que se disponga del motor y caja reductora se deducen las potencias transmitidas al eje del rotor.

9.º Se construye un gráfico tomando en abscisas tiempos y en ordenadas los logaritmos de las concentraciones de oxígeno en el estanque. Tan sólo se consideran válidos los valores obtenidos entre el 10 y 70 por 100 de saturación. El déficit de oxígeno es la diferencia entre el contenido de saturación del agua a la temperatura del ensayo y el contenido que tiene en el momento T . Se traza una línea recta por encima de los puntos obtenidos. Si los contenidos de oxígeno varían en los diferentes puntos de toma por no realizarse éstas en el mismo momento, u otras circunstancias, saldrán seis diferentes gráficos, muy próximos. Si existen diferencias de gradientes entre los diferentes puntos mayores de 0,05 p.p.m., el ensayo no es correcto.

10. La pendiente de cada una de las rectas que se obtienen es $K_L a$:

$$K_L a = \frac{\log_e \frac{C_s - C_1}{C_s - C_2} \times 60}{T_2 - T_1} \quad (2)$$

siendo:

$K_L a$ = coeficiente de transferencia global.

C_s = contenido de saturación en oxígeno a la temperatura del ensayo.

C_1 = concentración inicial de oxígeno.

C_2 = concentración final de oxígeno.

$T_2 - T_1$ = intervalo entre C_1 y C_2 .

La temperatura de ensayo es de 10 a 20º C, si bien existe una correlación para los ensayos realizados a otras temperaturas.

La temperatura tiene dos efectos en el proceso de transferencia de oxígeno. El contenido de saturación del agua aumenta al disminuir la temperatura. Si, por ejemplo, se mantienen 2 mg/l de oxígeno disuelto en el estanque de aeración, el déficit de oxígeno se incrementa

al disminuir la temperatura. En consecuencia, el gradiente de concentraciones aumenta y asimismo la velocidad de transferencia.

Por el contrario, la experiencia ha demostrado que, con el mismo déficit de oxígeno, mayor cantidad se transfiere al agua caliente, que fría. Este resultado se debe, probablemente, a la variación de viscosidad del agua; por ello el coeficiente global aumenta con la temperatura.

Si el ensayo se realiza a la temperatura t , se puede deducir el valor a 20°C según la ecuación:

$$K_L \text{ a } 20^{\circ}\text{C} = \frac{K_L \text{ a } t}{1,02^{t-20}} \quad (3)$$

IV.1. *Ejemplos.* — Al objeto de comprender mejor estos ensayos, expondremos algunos ejemplos. En la figura 4 se dan las curvas de variación del contenido de oxígeno en tres puntos de un estanque de 24 m de diámetro y 6 m de profundidad, donde se estaba ensayando una

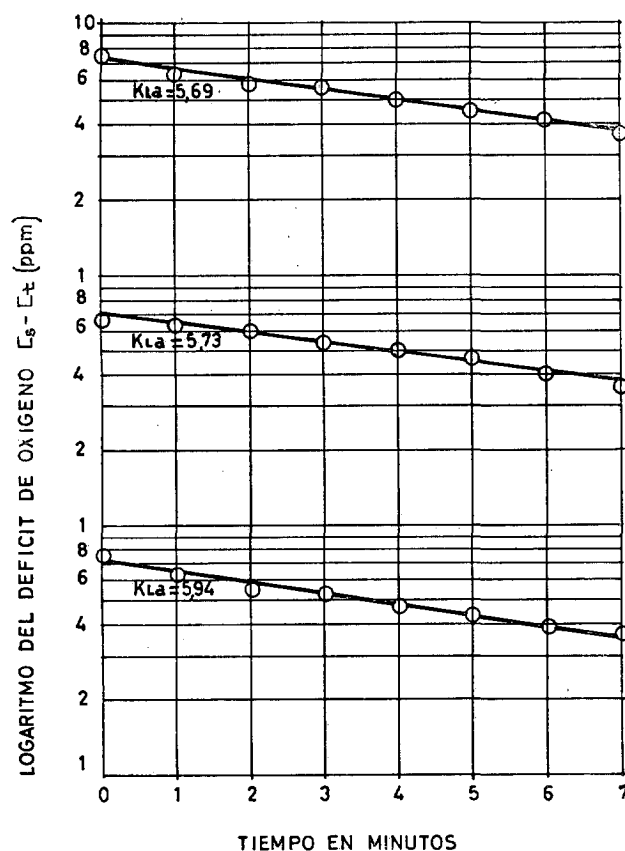


Fig. 4. — Ensayo de aeración con agua limpia.

turbina con agua desoxigenada a 10°C . En abscisas se dan los tiempos desde la iniciación y en ordenadas los déficits de oxígeno en escala logarítmica.

De acuerdo con la ecuación (2) se han determinado los valores de K_L a para cada uno de los puntos del estanque, que resulta ser la pendiente de cada recta.

Se ha tomado para C_s igual a 9,2 mg/l.

$$K_L \text{ 1 a} = 5,69/\text{hora},$$

$$K_L \text{ 2 a} = 5,73/\text{hora},$$

$$K_L \text{ 3 a} = 5,94/\text{hora}.$$

El valor medio K_L a para este ensayo resulta 5,85/hora.

Para reducir el coeficiente global en condiciones estándar aplicamos la ecuación (3) y tenemos:

$$K_L \text{ a } 20^{\circ}\text{C} = \frac{5,85}{1,02^{10-20}} = 7/\text{hora}.$$

Con este valor se deduce la capacidad de oxigenación del rodete, según la ecuación:

$$Q = W_1 K_L a (C_s - C_L),$$

siendo C_L el valor de la concentración de oxígeno en la masa líquida. Como ya se ha indicado, el valor estándar de la capacidad de oxigenación de la turbina se calcula para cuando el contenido de oxígeno de la masa líquida sea cero. O sea, la capacidad de oxigenación de la turbina ensayada es:

$$Q = \frac{2.700 \text{ m}^3 \cdot 7 (9,2 - 0)}{1.000} = 174 \frac{\text{Kg de O}_2}{\text{hora}},$$

la potencia consumida por el rodete durante el ensayo fue de 96 CV, de donde el rendimiento del mismo ha sido $\frac{174}{95} = 1,83 \text{ Kg de O}_2/\text{CVh}$.

Ahora bien, los resultados obtenidos en estos ensayos no nos sirven para aplicarlos directamente a casos prácticos de aeración de aguas residuales o a estanques de fangos activados, ya que de una parte los contenidos de saturación de oxígeno para estas aguas no son los mismos que para aguas limpias, y por otra, existen detergentes que modifican la tensión superficial del líquido y disminuyen el coeficiente de transferencia global. Por ejemplo, en el gráfico

de la figura 5 se han representado las curvas de un ensayo de aeración con dos turbinas idénticas, una en un estanque con agua limpia a 23° C y otra con un agua residual a 28° C. Los coeficientes de transferencia globales que se deducen de este ensayo son:

Agua limpia:

$$K_L a (23,5) = \frac{(\log 8,83 - \log 1,03)}{2 \text{ horas}} \times 2,3 = 1,075,$$

este coeficiente en condiciones estándar de 20° C valdrá:

$$K_L a = \frac{1,075}{1,02^{23,5-20}}$$

Para el agua residual:

$$K_L a (28) = \frac{(\log 4,05 - \log 1,73) 2,3}{1 \text{ hora}} = 0,85,$$

en condiciones estándar valdrá:

$$K_L a = \frac{0,85}{1,02^{28-20}} = 0,72.$$

La relación entre el coeficiente global de transferencia en agua limpia y el coeficiente en otro tipo de agua residual, se denomina valor alfa (α). En general, para aguas residuales de tipo doméstico se toma un valor de $\alpha = 0,8$.

También se han realizado ensayos de aeración simulando mejor las condiciones reales. Por ejemplo, la Universidad de Minnesota los ha realizado sobre un estanque en el que continuamente fluye un determinado caudal de agua, midiendo las concentraciones de entrada y salida. Los resultados que se obtuvieron según este procedimiento estuvieron de acuerdo con los obtenidos por el procedimiento normal. La aplicación de los ensayos según el procedimiento de la Universidad de Minnesota, da resultados más aproximados en el cálculo de la cantidad de oxígeno que aportaría una turbina dispuesta sobre una corriente de agua.

V. Cálculo de la potencia de aeración a disponer.

Aplicando los conceptos anteriores se ha deducido una ecuación mediante la cual se puede calcular la capacidad de oxigenación de un de-

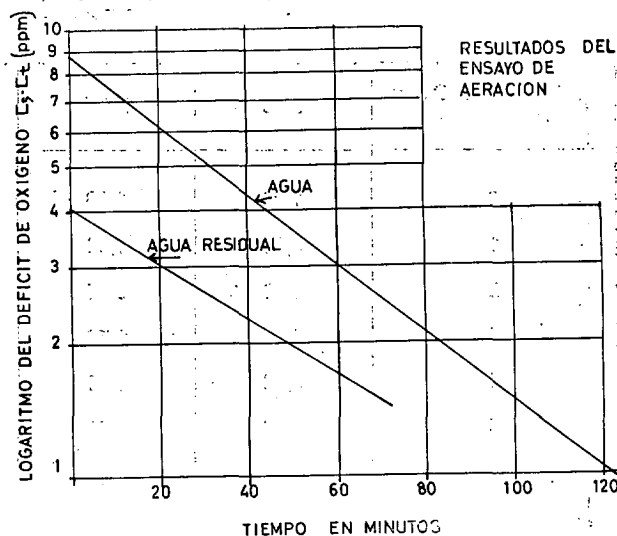


Fig. 5. — Ensayos de aeración con agua limpia y con agua residual.

terminado tipo de turbina que esté aerando un líquido a la temperatura t y que tenga unos sólidos disueltos y en suspensión que le confieran un valor α , a partir de la capacidad de oxigenación obtenida para dicha turbina en condiciones estándar. La ecuación es la siguiente:

$$N = N_0 \times \frac{C_{sw} - C}{C_s} \times 1,02^{t-20} \times \alpha,$$

en la que:

- N = kilogramos de oxígeno que se transfieren al estanque de aguas residuales en las condiciones de aplicación.
- N_0 = kilogramos de oxígeno que la turbina suministra en condiciones estándar.
- C_{sw} = contenido de saturación de oxígeno en el agua residual.
- C = contenido de oxígeno que se desea mantener en el estanque.
- C_s = contenido de saturación de oxígeno en el agua limpia a 20° C = 9,17 mg/l.
- t = temperatura del agua residual a airear.
- α = relación entre el coeficiente global de transferencia de oxígeno para agua limpia y el agua residual a airear.

Si la C_{sw} es aproximadamente el valor del agua limpia, entonces la ecuación puede resolverse mediante el cuadro II, en el que se da el valor del producto del segundo y tercer término.

CUADRO II. — Factores de transferencia de oxígeno.

Contenido de O ₂ en el estanque	5° C	10° C	15° C	20° C	25° C	30° C
0	1,04	1,03	0,97	1,00	1,04	1,02
1	0,96	0,94	0,88	0,89	0,92	0,88
2	0,88	0,85	0,78	0,78	0,79	0,75
3	0,80	0,76	0,68	0,67	0,67	0,62
4	0,72	0,68	0,59	0,56	0,54	0,48
5	0,63	0,58	0,49	0,46	0,42	0,35

Veamos un caso práctico. Se precisa un aerador para transferir 100 Kg de oxígeno por hora a un estanque de aguas residuales que tienen 30° C y en el que hay que mantener 2 mg/l de oxígeno disuelto.

El valor de α es 0,8. ¿Qué capacidad de oxigenación deberá tener la turbina? Aplicando la ecuación tenemos:

$$100 = N_0 \times \frac{C_{SW} - 2}{9,17} \times 1,02^{30-20} \times 0,8;$$

el valor del segundo y tercer término lo tomamos de la tabla, que es 0,75, y sustituyendo, tenemos:

$$N_0 = \frac{100}{0,8 \times 0,75} = 166 \text{ Kg/hora,}$$

o sea, es preciso disponer una turbina que tenga una capacidad de oxigenación de 166 Kg/hora, medidos en condiciones estándar, tal como los suministran las firmas constructoras de turbinas.

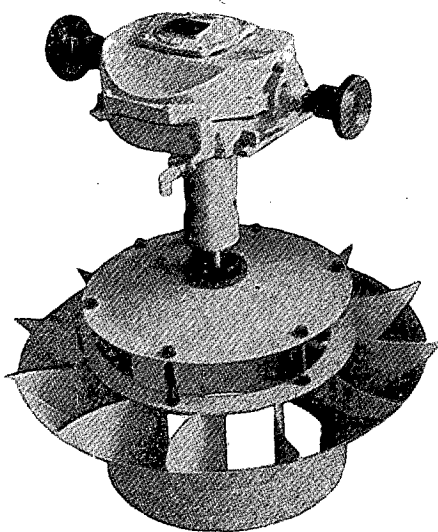


Fig. 6. — Aerador tipo "Simplex".

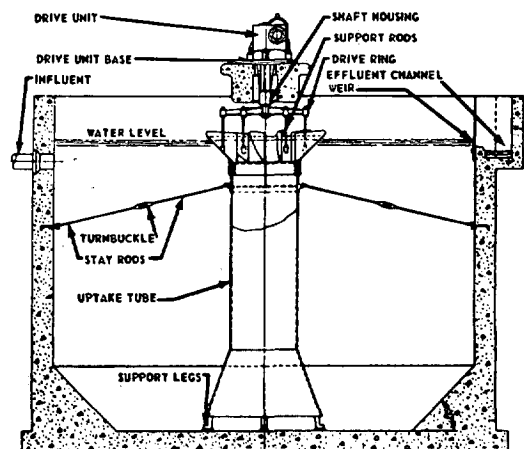
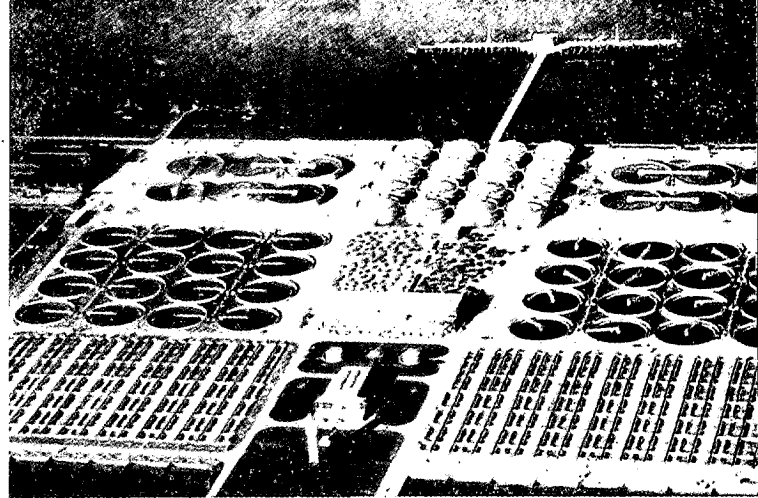


Fig. 7. — Conjunto aerador "Simplex".

Fig. 8. — Aeradores "Simplex" en la planta de Crossnes (Londres).



VI. Dimensiones y dispositivos.

La capacidad de oxigenación de los aeradores descritos varía con relación a las dimensiones del estanque, existiendo una proporción entre éstas y las de la turbina, para las que se consigue un rendimiento óptimo. En general, a medida que aumentan las dimensiones del estanque, con relación a las de la turbina, se reduce la capacidad de oxigenación de ésta, dando valores muy por debajo de los obtenidos en el ensayo de aeración. También intervienen en la relación de dimensiones óptima entre el rotor y estanque, el contenido de sólidos en suspensión del líquido en aeración. En sistemas de fangos activados, se emplean rodets tipo turbina cuyo diámetro esté entre un séptimo y un quinceavo del lado del estanque. Las dimensiones de las hélices son muy inferiores. La profundidad del estanque debe estar entre 1,8 y 3,6 m.

La turbina puede disponerse sobre un pontón que va soportado por cuatro pilares, centrados con relación al eje de la turbina, y que se une a la orilla mediante una pasarela (véase figura 9). También suelen disponerse, especialmente en grandes estanques o lagunas, aeradores flotantes, ya sea sobre varios pontones flotantes, como en el caso de las figuras 10 y 12, o con un flotador concéntrico con la turbina (aeradores de las firmas "Aqualator", "Ashbrook", "Keene" y "Clow") (figs. 11, 13, 14 y 15). Cuando se disponen aeradores flotantes hay que disponer una sujeción del flotador para evitar su movimiento. Esto se suele realizar mediante cables que se tienden del flotador a las orillas más próximas o a barras que se han fijado en las inmediaciones del aerador. La gran movilidad de las turbinas flotantes es una ventaja para grandes lagunas, por poder desplazarse de un punto a otro según las sedimentaciones de lodos secundarios existentes u otras circunstancias.

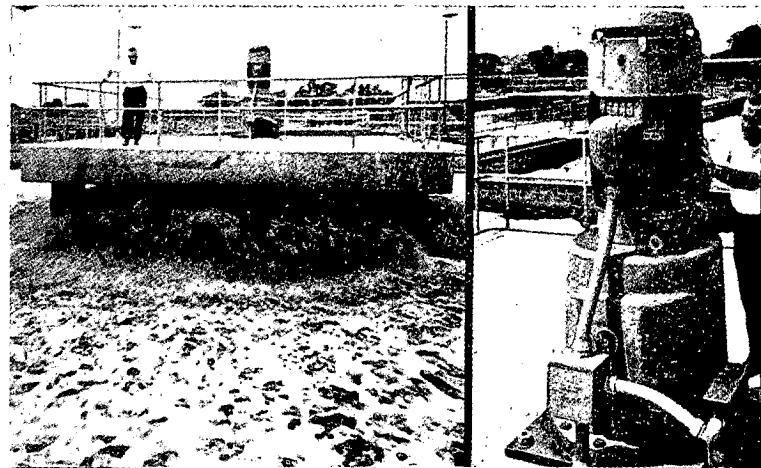
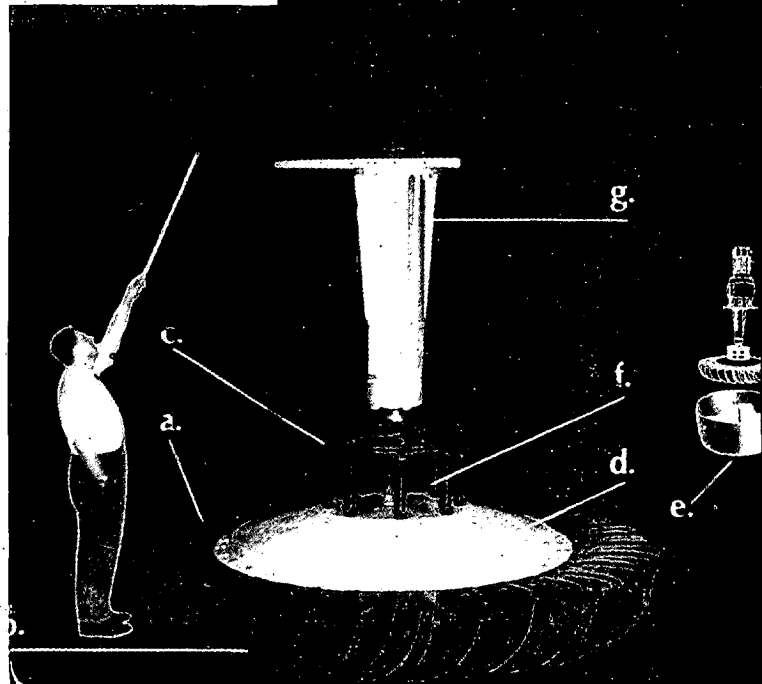


Fig. 9. — Aerador con rotor de turbina tipo "Sigma".



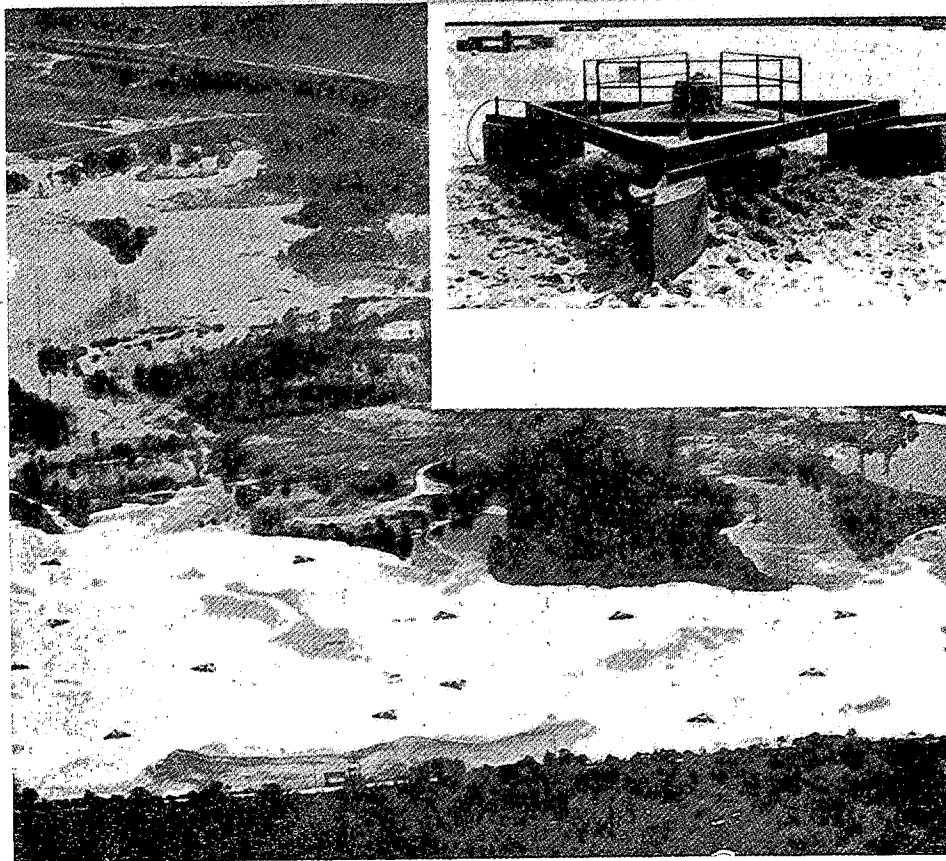
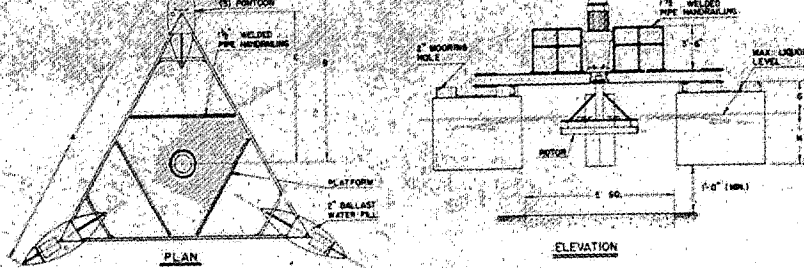


Fig. 10. — Aerador flotante tipo "Vortair".

Fig. 11. — Aerador flotante con rotor de hélice tipo "Ashbrook".

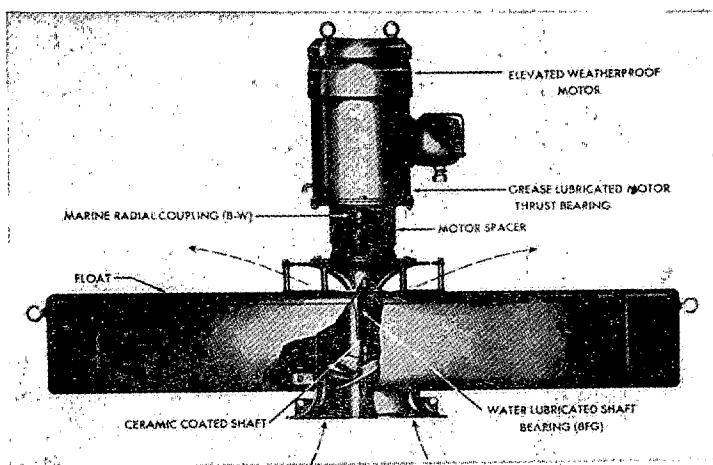
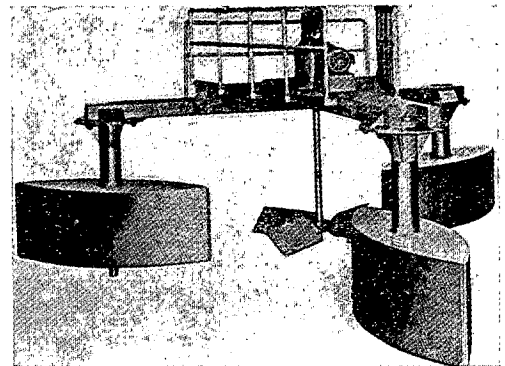


Fig. 12. — Aerador flotante con rotor de hélice tipo "Lightnin".



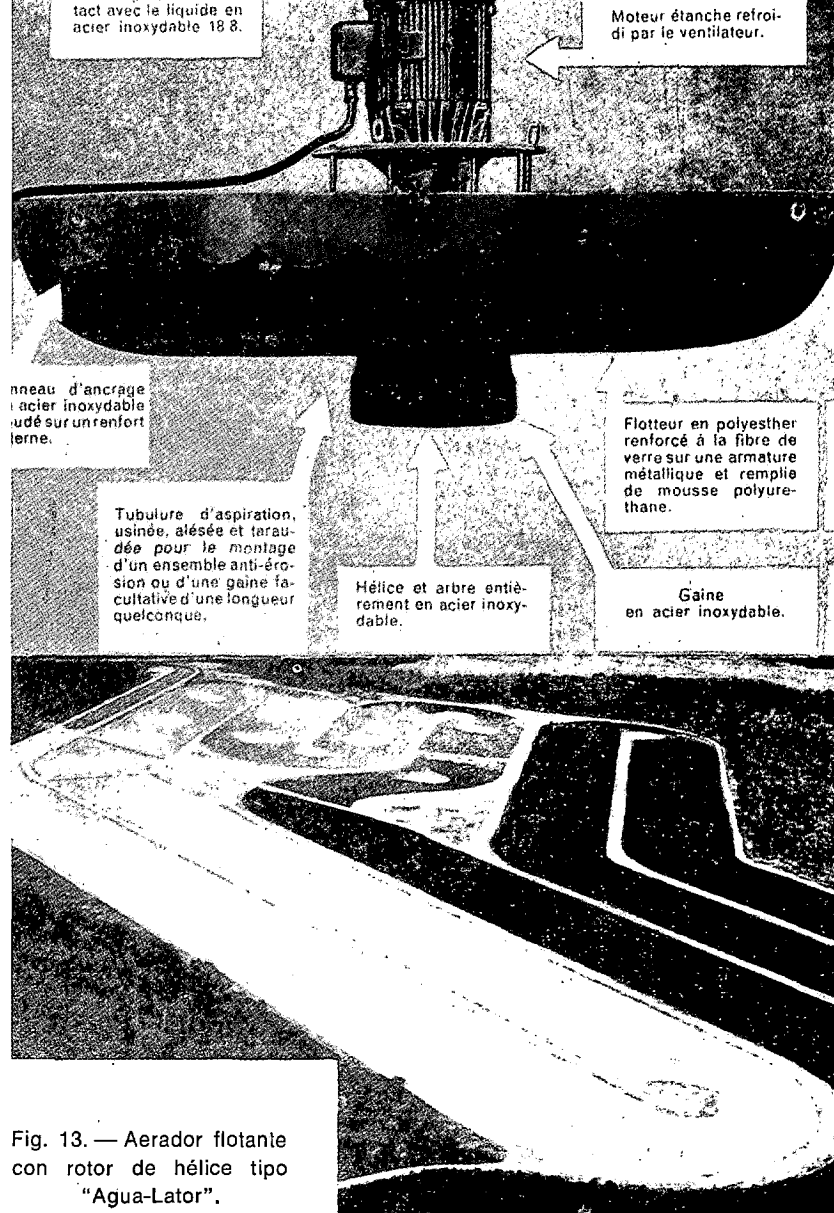


Fig. 13. — Aerador flotante con rotor de hélice tipo "Agua-Lator".

Fig. 15. — Aerador flotante con rotor de hélice tipo "Keene".

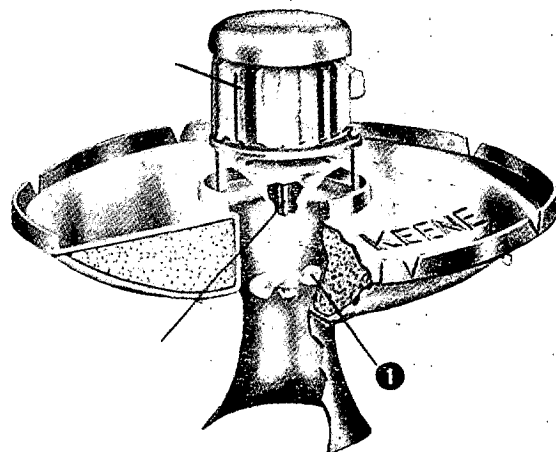
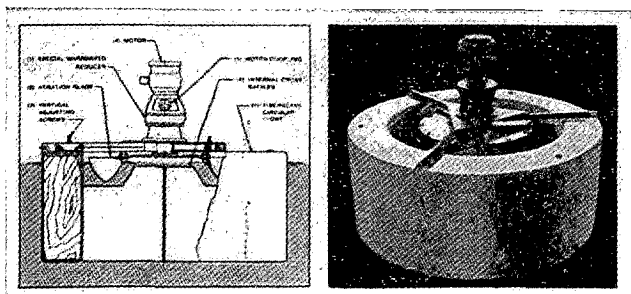


Fig. 14. — Aerador flotante con rotor de hélice tipo "Clow".



LISTA DE REFERENCIAS

PRIMERA PARTE

- "Basic Biology of Stabilization Ponds". Water & Sewage Works. Abril 1961.
- "Design and Performance of Aerated Lagoons for Pulp and Paper Waste Treatment". Proceeding of the Industrial Waste Conference at Purdue University. 1961.
- "Use of Shallow Stabilization Basins for Kraft Mill Effluent Treatment". Paper Trade Journal. Noviembre 1964.
- "Aerated Stabilization of Board Mill White Wastes". Proceeding of the Industrial Waste Conference at Purdue University. 1965.
- "High-rate ponding system solves seasonal high load problem for Hayward, Calif.". Water and Wastes Engineering. Noviembre 1966.
- "How to cure... Short term overloading". Water Works and Wastes Engineering. Noviembre 1965.
- "A New Approach for Designing Waste Stabilization Ponds". Water & Sewage Works. Noviembre 1967.
- "Operation and maintenance of aerobic stabilization ponds". Water and Wastes Engineering. Julio 1968.
- "Three Years Operation of Aerated Stabilization Basins for Paperboard Mill Effluent". Proceeding of the Industrial Waste Conference at Purdue University. 1968.
- "Long Term Aeration of Kraft Pulp and Paper Mill Wastes". Proceeding of the Industrial Waste Conference at Purdue University. 1968.

- "Aerated Stabilization Basins Treatment of White Water". Proceeding of the Industrial Waste Conference at Purdue University. 1969.
- "Oxidation ponds remove bacteria". Water & Sewage Works. Abril 1969.
- "Rational Process Design Standards for Aerobic Oxidation Ponds in Ahmedabad, India. Journal WPCF. Agosto 1970.
- "Anaerobic or aerated lagoons". Waste Treatment. Mayo 1971.
- "Aerated Lagoons. A Report on the State of the Art". Journal WPCF. Abril 1971.

SEGUNDA PARTE

- "Testing and Rating Surface Aerators". Water & Sewage Works. Noviembre 1964.
- "Fundamental Aspects of Surface Aerator Performance and Design". Proceeding of the Industrial Waste Conference at Purdue University. 1965.
- "Test Procedure for Determining Oxygenation Capacity of a Surface Aerator. Yeomans. Enero 1965.
- "Surface aerators spin to a comeback". Water and Wastes Engineering. Diciembre 1966.
- "Engineering Aspects of Surface Aeration Design". Proceeding of the Industrial Waste Conference at Purdue University. 1967.
- "Hydraulics of Mechanical surface aerators". Water and Wastes Engineering. Abril 1968.
- "Modern aeration techniques". Water and Wastes Engineering. Junio 1969.