

PRINCIPIOS Y CRITERIOS DE DISEÑO DE LAS INSTALACIONES DE DEPURACION POR FANGOS ACTIVADOS

Por EDUARDO DEWISME

Ingeniero Colaborador del Servicio Aplicaciones Industriales de la Confederación Hidrográfica del Norte de España.

El interesante contenido del presente artículo, que es en cierto modo una ampliación del publicado por el mismo autor en el número de enero de nuestra Revista, queda resumido en la Introducción.

Introducción.

Los procesos biológicos, aerobios y anaerobios, son la base de los sistemas de tratamiento de depuración de las aguas residuales, tanto urbanas como industriales.

En los últimos diez años se ha realizado un profundo estudio de estos procesos, especialmente sobre los aerobios, logrando como resultado un gran perfeccionamiento de las técnicas de aplicación y el desarrollo de una gran variedad de sistemas. Una gran parte de estos esfuerzos ha sido realizada en Estados Unidos e Inglaterra, a través de los departamentos de investigación de sus universidades. De aquí que, tanto en la bibliografía como en los catálogos comerciales, se citen a menudo nombres en inglés para designar diferentes modalidades de tratamiento u otros conceptos. Por ello, aunque en este artículo se han traducido muchos términos, otros figuran en inglés; de esta forma, el lector puede correlacionar lo que aquí se dice con la documentación que disponga.

Como consecuencia de esta explosión de nuevas técnicas y la rápida comercialización de las mismas, no es difícil encontrar textos que empleen términos iguales para designar modalidades de tratamiento diferentes. Incluso el conocido libro *Theories and Practices of Industrial Waste Treatment*, de Nelson Leonard, publicado en 1962, emplea términos de forma diferente a la admitida en los textos más modernos. Es, pues, preciso andar con cuidado con la documentación sobre estos temas para evitar confusiones.

En el artículo "Principios y criterios de diseño de la oxidación total", publicado en el mes de enero, abordé el tema de forma muy sucinta, describiendo tan sólo la modalidad de tratamiento denominada oxidación total (*extended aeration*). Ahora, ampliando los principios básicos que expuse, defino las variables más importantes que intervienen en la teoría de depuración biológica aerobia, para aplicarlas después en el diseño de las modalidades más generalizadas. Los datos que se citan han sido seleccionados de varios textos que figuran en la bibliografía, que, por proceder de dos revistas de primer rango y ser de publicación reciente, merecen toda confianza.

La exposición de los principios de la depuración biológica se presta a desarrollarse de forma profunda, partiendo de las especies que intervienen en el fenómeno y analizando otros principios biológicos. Sin embargo, he preferido una exposición sencilla, enfocada desde un punto de vista práctico de aplicación ingenieril, adaptándola a los ya iniciados en estas técnicas.

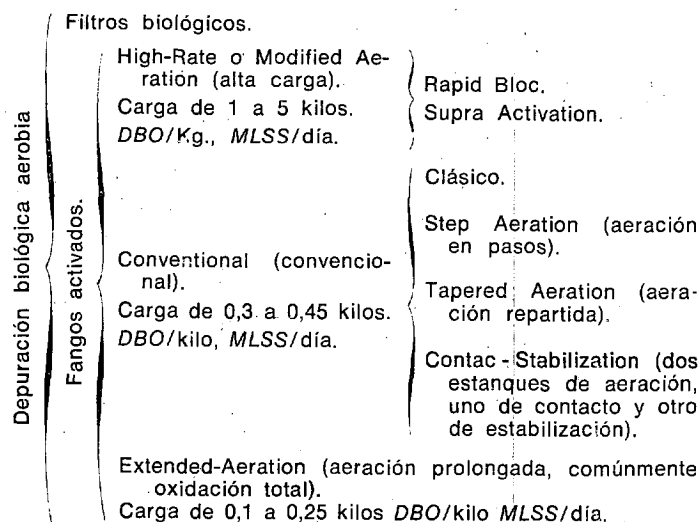
PRIMERA PARTE

Principios biológicos fundamentales.

Esquema general.

Los sistemas de depuración biológica aerobia se dividen en los que emplean filtros y los que utilizan los fangos activados. El esquema siguiente señala esta división, así como las variantes más importantes de cada sistema.

ESQUEMA DE LOS SISTEMAS DE DEPURACIÓN BIOLOGICA AEROBIA



Dentro de los sistemas basados en los fangos activados, es el sistema que denominó convencional clásico, el que primeramente apareció, hace ya unos treinta y cinco años, y es del que por posteriores estudios se han ido desarrollando los demás.

Principios básicos.

El principio fundamental de los sistemas de depuración biológica aerobia, es la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno de las aguas (DBO tanto en suspensión como en disolución), mediante la acción de una masa de células biológicas (fangos activados), que se cultiva en el seno del líquido gracias al aporte de oxígeno. En definitiva, es la realización de sistemas fundados en los principios de la autodepuración de los ríos, pero llevados a cabo de forma artificial, esmerando en la ejecución todas las condiciones que definen un máximo rendimiento en un mínimo espacio.

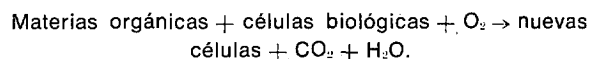
La reducción de la demanda bioquímica, constituida principalmente por compuestos orgánicos carbonosos, se realiza mediante la asimilación de esas materias por la masa biológica, dando como resultado la formación de nuevas masas de células y el desprendimiento de compuestos oxidados como CO_2 y H_2O .

La DBO es, pues, el alimento de las células biológicas, las cuales se encargan de su reducción mediante los principales procesos:

- 1.º Una adsorción y almacenamiento dentro de la célula.
- 2.º Reproducción de nuevas células.
- 3.º Respiración, o sea, el proceso que produce la energía para que las células lleguen a cabo los procesos anteriores.

Los alimentos almacenados por las células los consumen en su última fase de vida mediante un proceso endógeno de autooxidación, con el que se reduce, por tanto, la masa de las células.

Para que se puedan llevar a cabo los procesos anteriores, es preciso suministrar oxígeno; éste es consumido por las bacterias en las distintas fases de su vida. El resultado final puede expresarse según la ecuación:



A continuación vamos a considerar cada uno de los factores que intervienen en el proceso de depuración.

Fases de desarrollo de las células biológicas.

En los procesos biológicos de depuración nos interesa que las células asimilen rápidamente la DBO; que las nuevas células que se desarrollan se separen fácilmente del agua, y que éstas no representen un gran volumen, pues, en definitiva, esta masa hay que eliminarla como un exceso de fangos.

La relación entre la masa de lodo formado y DBO asimilado por las bacterias, en las diferentes fases de su vida, vienen indicadas en la figura 1.

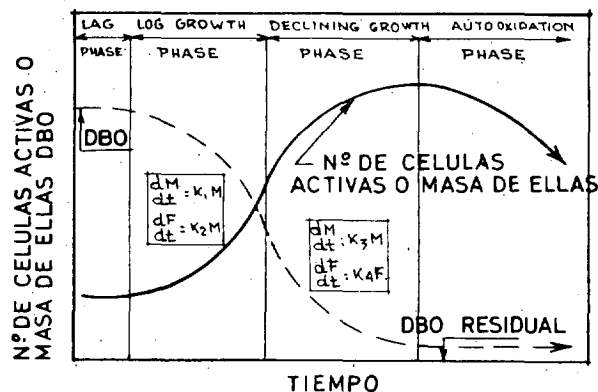


Figura 1.

En una primera fase, las bacterias se aclimatan a las condiciones y características de los alimentos (compuestos orgánicos que ejercen la *DBO*). Esta fase la denominan *lag phase*, y tiene lugar en la puesta en marcha del proceso, o cuando los lodos que se recirculan no están en condiciones.

Aclimatizadas las bacterias, primeramente actúan realizando una rápida adsorción de alimentos, que los almacenan en la propia célula (este fenómeno se denomina biosorción, y en él se fundan algunos procedimientos). Inmediatamente se inicia una rápida reproducción, en forma logarítmica, de aquí que esta fase se denomine fase logarítmica. Como se observa, durante esta fase las bacterias asimilan una gran cantidad de *DBO*.

Cuando ya no abundan los alimentos, o sea, la relación entre masa de células activas y *DBO* se ha reducido, la proliferación disminuye, así como la velocidad de asimilación de la *DBO*. Esta fase se denomina "fase de crecimiento descendente" (*declining phase*).

Cuando los alimentos escasean, entonces las bacterias se nutren de los propios alimentos almacenados en la fase logarítmica, reduciéndose, por tanto, el volumen de la masa de las células; pero, sin embargo, no existe reducción sensible de la *DBO* del agua. Esta fase se denomina "fase de autooxidación".

Estas cuatro fases tienen lugar en todos los sistemas de depuración biológica de fangos activados. Sin embargo, según cuál sea el sistema, se imponen unas condiciones determinadas de forma que predominarán células en una o varias fases. Así, por ejemplo, en los sistemas *high-rate* predominan las células en su fase logarítmica; en cambio, en los sistemas de aeración prolongada predominan las células en su cuarta fase de autooxidación. En los sistemas convencionales existe una repartición entre las diferentes fases.

Carga másica y volúmica de *DBO*.

Como hemos indicado, según las condiciones que se imponen al sistema, es distinta la repartición de la flora biológica del estanque de aeración, entre las diferentes fases de desarrollo de las células.

La condición fundamental que define esta situación, es la relación que existe en el estan-

que de aeración, entre la cantidad de alimentos (*DBO*) y masa de células activas.

La cantidad de células biológicas activas se valora a través del contenido en sólidos volátiles que hay en suspensión en el estanque; según estudios, la relación de las primeras a los segundos es, aproximadamente, 0,27. Ahora bien, se trabaja siempre directamente con el contenido en sólidos volátiles en suspensión *SSV* (*suspended solids volatile*), o con el total de sólidos en suspensión en el líquido del estanque de aeración, *MLSS* (*mixer liquid suspend solids*). En aguas residuales urbanas, en general, el valor de *SSV* es aproximadamente 0,8 del valor *MLSS*.

O sea que, en definitiva, las condiciones de vida de las células en el estanque de aeración vienen impuestas por la relación entre la cantidad de *DBO* que suministramos con las aguas y el total de sólidos en suspensión en el estanque. Esta relación, denominada carga másica (*CM*), se mide en kilos de *DBO* alimentados por día al estanque, a kilos de materias en suspensión que existen en el total del sistema; es decir, en el estanque de aeración y decantador secundario. Normalmente se considera que en este último aparato existe entre un 10 y un 20 por 100 del total del sistema.

La carga de *DBO* puede también valorarse en kilos por metro cúbico de estanque de aeración; en este caso se denomina carga volúmica (*CV*). La relación que existe entre la carga másica y volúmica es la siguiente:

$$CV = \frac{CM \cdot MLSS}{1000}$$

La concentración de lodos en el estanque de aeración (*MLSS*) para cada modalidad de tratamiento, no puede hacerse variar más que entre límites definidos, que si se rebasan, se altera el correcto funcionamiento del sistema.

Características de los lodos.

La carga de trabajo conviene mantenerla entre ciertos límites, pues de lo contrario las nuevas células que se forman (lodos) tienen unas características tales, que no se separan con facilidad del agua tratada (decantan mal); es decir, se requeriría el empleo de decantadores secundarios muy amplios. Por otra parte, los lodos decantados no espesan bien, lo que obligaría

a mayores recirculaciones para conseguir el valor de *MLSS* adecuado.

Las características de los lodos se determinan a través de lo que se denomina índice de fangos o índice de Mohman, para el que se utiliza la abreviatura *SVI* (*sludge volumen index*), cuyo valor se define, como el volumen, en mililitros que ocupa un gramo de *MLSS*, dejado decantar durante treinta minutos. Cuando más alto sea este valor, más pobre será el lodo formado; es decir, peor sedimenta y menor concentración se consigue en el decantador. El *SVI* se define también por la relación que existe en una muestra del estanque de aeración, entre:

$$SVI = \frac{\text{Volumen de lodos en \% decantados en 30 minutos}}{\text{Sólidos en suspensión en \% en peso}}$$

Los lodos con *SVI* superiores a 200, decantan muy mal, por lo que no se puede trabajar en estas condiciones. En general, los diferentes sistemas funcionan con valores de *SVI* entre 40 y 150. Es, pues, de gran importancia el control de *SVI* para el correcto funcionamiento de las instalaciones de fangos activados.

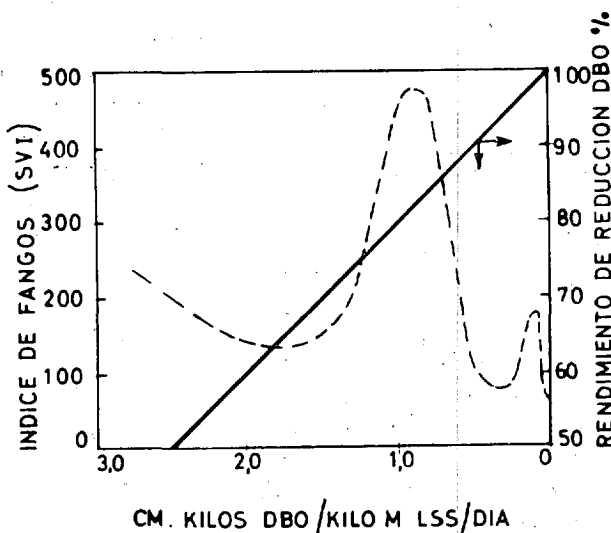


Figura 2.

Pues bien, este valor depende de la carga de trabajo que se mantiene en cada sistema. Así se desprende de la figura 2, que nos muestra las zonas adecuadas de funcionamiento para evitar que el *SVI* sea grande. Claramente se observa que existen tres zonas convenientes, que son las de funcionamiento próximo a los tres mí-

nimos de la curva de puntos. Estas tres zonas son las correspondientes a los sistemas *high-rate*, *convencional* y *extended aeration*.

El valor de *SVI*, según deduciremos más adelante, influye sobre el caudal de lodos a recircular. La relación que existe entre el valor de *SVI* y la recirculación de lodos a mantener (expresada en tanto por ciento de caudal de lodos a recircular sobre el caudal de agua a depurar), para un determinado valor de *MLSS*, viene fijada por:

$$Re = \frac{100 \cdot SVI \cdot MLSS}{1,2 \cdot 10^6 - SVI \cdot MLSS}$$

Otro factor que define las condiciones del lodo es "la edad del fango", cuyo valor se define como:

$$\text{Edad del fango} = \frac{V \cdot MLSS}{Q \cdot Ss}; \text{ siendo:}$$

V = volumen del estanque de aeración, en m.³.

MLSS = sólidos en suspensión en la zona de aireación, en mgr./l.

Q = caudal de agua bruta a tratar, en m.³/día.

Ss = sólidos en suspensión del agua bruta, en mgr./l.

La edad del fango suele ser de 0,2 a 0,4 días en los procesos rápidos (*high-rate*); de más de diez días en los de aeración prolongada, y entre tres y cuatro días en los sistemas clásicos. O sea, la edad del fango nos define el tiempo medio que una partícula en suspensión está retenida en el estanque de aeración y, en definitiva, señala qué fase de crecimiento biológico predomina en el tratamiento que estamos realizando.

Volumen de lodos que se forman.

Otro problema relativo a los lodos es el peso de lodo (masa de células vivas y muertas) que se forma por la reducción de la *DBO* de las aguas. Si trabajamos con sistemas en los que predomina la fase logarítmica, el peso y, por tanto, el volumen de estos lodos es grande; en cambio, en los sistemas que predomina la última fase, es relativamente bajo. Este punto es muy a tener en cuenta, puesto que estos lodos es preciso eliminarlos de la planta por procedimientos como concentración y digestión anaerobia o aerobia, seguido de secado o incineración.

El peso de lodos formados por kilo de *DBO* eliminado, según la carga másica de trabajo de

las distintas modalidades, viene indicado en la figura 3; claramente se observa como aumenta cuando la carga de trabajo aumenta. Este resultado es debido a que las células en su fase logarítmica tienen mayor masa que en su última fase de autooxidación.

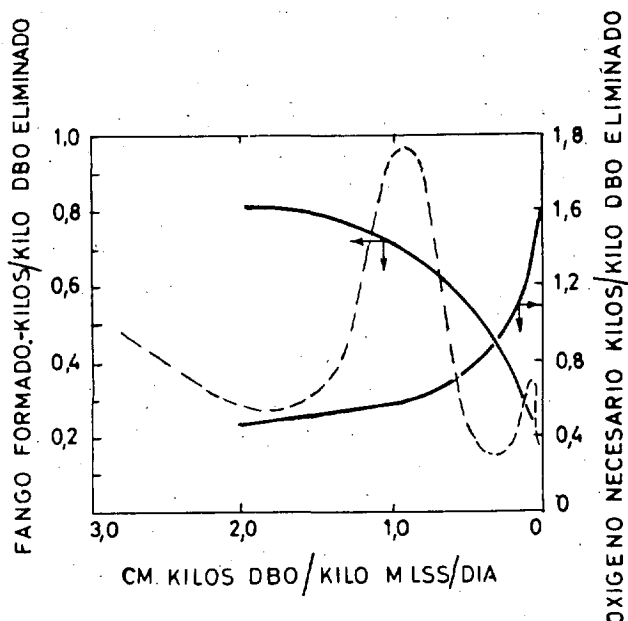


Figura 3.

Carga de DBO eliminada.

La cantidad de DBO eliminada depende también de las condiciones que se desarrollan y mantienen en el estanque de aeración. Como la DBO se elimina por asimilación de las bacterias, la reducción es proporcional a la cantidad de células activas presentes en el estanque (valoradas por la cantidad de MLSS) y a la vez depende de concentración de la DBO existente.

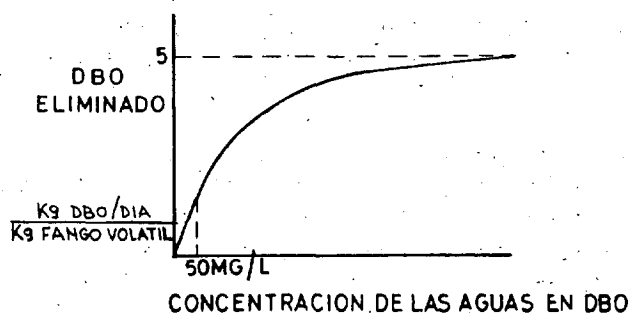


Figura 4.

Para pequeños valores de DBO en las aguas, la cantidad eliminada por unidad de peso de lodos activos es proporcional tan sólo a la concentración de DBO de las aguas. Esto se cumple para valores inferiores a los 50 mg./litro de DBO.

En cambio, para valores altos, superiores a 300 mg./l., la cantidad de DBO eliminada por unidad de peso de lodos activos, es proporcional, principalmente al peso de lodos; el coeficiente de proporcionalidad varía entre cuatro y cinco. Estas conclusiones se aprecian en la figura 4.

Rendimiento de eliminación de DBO.

El porcentaje de DBO eliminado de las aguas, dentro de un correcto funcionamiento de cada sistema, depende también de la carga de trabajo. Cuanto menor es la carga de trabajo, mayor es el rendimiento de eliminación de DBO. En la figura 2 se observa claramente este resultado.

O sea, debemos ir a cargas de trabajo bajas cuando deseamos rendimientos de eliminación de DBO fuertes.

Consumo de oxígeno.

Para el desarrollo del proceso biológico, las células precisan oxígeno, que en la práctica se suministra mediante una aeración. El consumo de oxígeno va estrechamente ligado a la DBO eliminada, de aquí que las células consumen distinta cantidad de oxígeno según la fase de desarrollo que se encuentran; siendo máximo el consumo en el período logarítmico, en el que tienen la máxima actividad, y mínimo en su última fase de autooxidación. Ahora bien, la cantidad total consumida en cada sistema de tratamiento depende, además, del tiempo de retención de las aguas en el estanque de aeración, que, a su vez, está ligado a la carga de trabajo; cuanto mayor es la carga, menor es el tiempo de retención. De aquí que los procesos que funcionan con cargas elevadas consumen menor cantidad de oxígeno, por kilo de DBO eliminado, que los procesos de baja carga. Este resultado se observa claramente en la figura 3.

Hay, pues, que distinguir entre la cantidad de oxígeno que consumen las células en sus fases de crecimiento y la cantidad total que se consume en cada proceso. Por ejemplo, en los

sistemas convencionales, la curva de consumo de oxígeno de las células expresado en miligramos de oxígeno por gramo de *MLSS* y hora, aumenta con la carga de trabajo de funcionamiento (cuanto mayor *DBO* se elimina, mayor consumo se precisa). A su vez, la carga másica puede aumentarse cuando la temperatura de las aguas aumenta. Estas conclusiones se manifiestan en la figura 5. Sin embargo, la cantidad de oxígeno total consumido en el proceso, por cada kilo de *DBO* eliminado, disminuye al aumentar la carga másica.

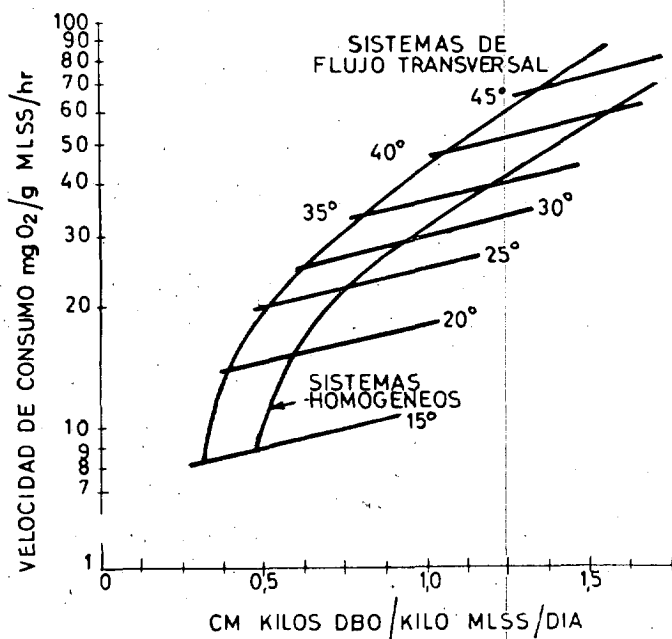


Figura 5.

Hay que mantener en el estanque de aeración para el consumo de las células una mínima cantidad de oxígeno disuelto, no inferior a 2 miligramos/litro. No interesa mantener concentraciones elevadas, que pueden producir desequilibrios biológicos y, en consecuencia, hacer aumentar el índice de fangos.

De los datos indicados, se puede deducir para los sistemas de aeración por difusión la cantidad de aire a insuflar. Para ello basta considerar que el porcentaje de oxígeno en el aire es del 20 por 100, y que el rendimiento de transferencia de oxígeno, va desde el 6 al 12 por 100. El consumo de energía por kilo de *DBO* eliminado oscila entre 0,3 kWh. para los procesos *high-rate*, hasta 2 kWh. en los sistemas de aeración prolongada.

En la actualidad existe una clara tendencia hacia la aeración mecánica mediante turbinas, por su mejor rendimiento energético y, a la vez, adaptarse con facilidad a los sistemas de flujo homogéneo.

Tiempo de retención en aeración.

Teóricamente, el tiempo de retención en el estanque de aeración viene determinado por la velocidad de difusión y adsorción de la *DBO* por las células biológicas. La *DBO* que está en forma de materias en suspensión es más rápidamente eliminada que la que está en forma disuelta. La adsorción de la *DBO* en forma de suspensión se realiza en unos veinte a treinta minutos; en cambio, la que está en forma disuelta, especialmente la debida a compuestos orgánicos industriales, requiere al menos dos horas. Estas cifras se refieren a la relación entre el caudal de agua a tratar (sin tener en cuenta el caudal de recirculación) y el volumen del estanque de aeración.

Ahora bien, las cifras señaladas son los tiempos mínimos, que, al menos en años pasados, han sido muy superados (tiempos superiores a las seis horas eran muy comunes), debido a que en estos tiempos mínimos los sistemas de aeración no eran capaces de suministrar la cantidad de oxígeno preciso para llevar a cabo el proceso. De aquí que fuese preciso prolongarlos. Actualmente, con los nuevos sistemas de aeración, mejor estudiados, se consiguen rendimientos de transferencia de oxígeno superiores, pudiéndose reducir, por tanto, los tiempos de aeración.

En este hecho se funda también que el desarrollo de los procesos *high-rate* no haya tenido lugar hasta hace poco. Estos procesos, como ya hemos indicado, si bien son los procesos que requieren menor consumo de oxígeno por kilo de *DBO* eliminado, exigen un gran caudal de aportación de oxígeno. Este gran caudal no era posible suministrar económicamente con los sistemas de aeración antiguos.

Flujo hidráulico.

El estanque de aeración de los sistemas de fangos activados clásicos es un recipiente rectangular alargado, casi como un canal, en el que el agua a tratar y lodos recirculados entran por un extremo y van pasando por él en continua

aeración. De aquí resulta que la carga de *DBO* se va reduciendo a lo largo del canal, a medida que se va eliminando. Esto origina la creación de diferentes zonas a lo largo del estanque, en las que las condiciones son distintas y distintas son las fases predominantes en que se encuentran las células. En los primeros tramos del estanque habrá una abundancia de células en fases lag y logarítmica, y en los últimos tramos (cuando el tiempo de retención sea grande), en fase de autooxidación.

Estas diferentes zonas originan un peor rendimiento, debido a las continuas modificaciones de las condiciones ambientales por las que van pasando las células. Estos sistemas se denominan de flujo de aeración transversal, y si bien han sido muy empleados, en la actualidad están

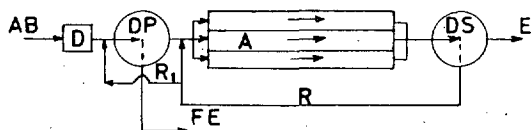


Figura 6.

siendo desplazados, ya sea por modificaciones de ellos o por sistemas de flujo homogéneo. La figura 6 representa el esquema de una instalación de funcionamiento como el señalado.

Las modificaciones de los sistemas de flujo transversal son las denominadas *tapered aeration* (aeración proporcional), *step aeration* (aeración en pasos) y *contac-stabilization* (dos zonas de aeración denominadas de contacto y de estabilización), cuyas peculiaridades indicaremos al hablar de ellas.

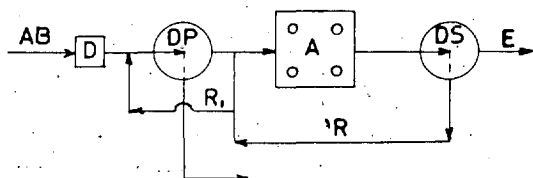


Figura 7.

Los sistemas de flujo homogéneo son los que mantienen en el estanque de aeración un líquido homogéneo, cuyas características son iguales en todos los puntos del estanque. No existen zonas con unas condiciones ambientales, de carga de trabajo, oxígeno, etc., diferentes, sino que

son idénticas en cualquier punto. De aquí que la composición del líquido que sale del estanque no depende del punto de donde se tome. Es más, se considera que la *DBO* del líquido sin materias en suspensión, que existe en el estanque, es la misma que la del efluente depurado. Tanto las aguas a depurar como los fangos que se recirculan, se dispersan inmediatamente después de su entrada en la masa del líquido en aeración. En estas condiciones se consiguen mejores resultados; la figura 5 señala que es posible en los sistemas homogéneos, de modalidad convencional, trabajar con cargas de *DBO* superiores, para un mismo consumo de oxígeno. La figura 7 representa el esquema de una instalación que funciona con flujo homogéneo.

SEGUNDA PARTE

Criterios de diseño.

Generalidades.

En los párrafos siguientes se dan los criterios de diseño de los principales sistemas de tratamiento, así como la forma de cálculo de los parámetros que los definen.

En los esquemas representativos de los sistemas que estudiamos se emplean las abreviaturas y significados, que a continuación se indican:

AB = agua bruta.

D = desarenador.

DP = decantador primario.

A = estanque de aeración.

DS = decantador secundario.

E = efluente tratado.

R_1 = fangos biológicos en exceso.

FE = fangos totales a eliminar de la planta.

Los datos que en particular se estudian son los referentes al diseño del estanque de aeración. Estos, en general, tienen profundidades de 3 a 4 metros; su forma es muy variada, dependiendo del tipo de proceso y firma comercial que los diseña. Los sistemas de aeración empleados son el de insuflación de aire y el de aeración mecánica. El primero se realiza inyectando aire a través de la masa líquida, por medio de difusores especiales, situados a unos 30 a 50 centímetros del fondo del estanque. Estos

difusores en un principio eran simples orificios dispuestos en una tubería de repartición; posteriormente se diseñaron numerosos dispositivos de distribución de aire en burbujas, como boquillas especiales, difusores de material poroso, etc. Todos ellos tienden a repartir el aire en finas burbujas, evitando que se produzcan obstrucciones en los dispositivos.

La decantación secundaria, de la que todos los sistemas deben ir provistos, se calcula con un tiempo de retención mínimo, a caudal punta, de cuarenta y cinco a sesenta minutos (considerando la recirculación); la velocidad máxima ascensional se fija entre 2 a 3 m./h., según el SVI del proceso de depuración.

1. Sistemas convencionales.

Se adoptan dentro de un amplio margen de caudales, entre 1 800 y 180 000 m.³/día. Las modalidades más utilizadas son:

1.1. Línea clásica. — Hasta hace unos diez años el único sistema de fangos activados que se construía es el esquematizado en la figura 6. La planta completa consta de los siguientes equipos: desbaste y trituración, desarenado, decantación primaria, canal de aeración, decantación secundaria y aparatos de eliminación de los fangos. Como se observa, el estanque de aeración es de flujo hidráulico transversal; este es el sistema clásico.

Las características de este sistema son:

Tiempo de retención del estanque de aeración	De cuatro a ocho horas.
MLSS	1500 a 3500 mgr./l.
SVI	80 a 120.
Carga másica (CM)	0,3 a 0,45 Kg. DBO/kilo MLSS/día.
Carga volúmica (CV)	0,45 a 1,5 Kg. DBO/m. ³ de aeración/día.
Consumo de oxígeno (según fig. 3)	Unos 0,9 Kg. de O ₂ /Kg. DBO aplicado (52 m. ³ de aire/Kg. DBO aplicado).
Lodos biológicos en exceso (f)	0,55 Kg./Kg. DBO eliminado.
Recirculación de lodos (Re)	25 al 50 % de Q.
Rendimiento de eliminación de DBO (P)	90 %.

El estanque de aeración tiene la forma de un canal alargado; el agua a depurar y lodos recirculados entran por un extremo, desplazándose a lo largo del canal en constante aeración, hasta salir por el extremo opuesto.

Forma de cálculo. — Vamos a partir de los siguientes datos:

Q = caudal de agua bruta en m.³/día.

R = caudal de recirculación en m.³/día.

$DBO = DBO_5 - 20^\circ$ en mgr./l. de las aguas brutas. Suponemos 325 mgr./l.

r = rendimiento de eliminación de DBO en la decantación primaria (en aguas residuales urbanas se admite alrededor del 30 %).

1. De estos datos deducimos los kilos de DBO que entran al día al estanque de aeración:

$$\frac{Q \cdot DBO \cdot (100 - r)}{1000 \cdot 100} = (a).$$

2. Fijamos una carga másica de trabajo según la temperatura de las aguas; por ejemplo, la figura 5 indica, a 20° C., 0,35 Kg. de DBO/kilo MLSS/día. De aquí deducimos los kilos de materias en suspensión que hay en el sistema.

$$\text{Kilos de materias en suspensión totales: } \frac{(a)}{0,35} = (b).$$

En el caso de que la fracción de materias en suspensión volátiles, a totales, sea distinta de 0,8, valor que como se dijo que se considera normal en aguas residuales urbanas, es preciso multiplicar el valor de 0,35 por:

$$\frac{\text{Fracción de sólidos volátiles suspensión}}{0,8}$$

3. Del total de sólidos (b), la parte que está en el estanque de aeración oscila entre un 80 y 90 por 100. Tomamos 85 por 100, luego:

$$\text{Kilos de materias en suspensión en el estanque de aeración: } (b) \cdot 0,85 = (c).$$

4. Fijamos el valor de MLSS en el estanque, tomamos 2.500 mg./l., luego el volumen del estanque en metros cúbicos será:

$$V = \frac{(c)}{2,5} = (d); \text{ se debe comprobar qué tiempo de retención supone:}$$

$$T = \frac{V \cdot 24}{Q} = (e); \text{ en nuestro caso da:}$$

$$T = \frac{325 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 0,85}{1000 \cdot 0,35 \cdot 2,5} \cdot 24 = 5,3 \text{ horas.}$$

5. Caudal de aire: de la figura 5 deducimos los miligramos de O_2 por hora que consume cada gramo de materias en suspensión del estanque de aeración; en nuestro caso vale 15. Considerando un 8 por 100 de rendimiento de transferencia de masa de los dispositivos de difusión, tenemos que el caudal horario de aire a insuflar medido en condiciones normales será:

$$\text{m}^3 \text{ de oxígeno/hora (c)} \dots 15 \cdot \frac{22,4}{32} \cdot \frac{1}{1000} = (g);$$

$$\text{m}^3 \text{ de aire/hora (g)} \dots \frac{1}{0,2} \cdot \frac{100}{8} = (h), \text{ siendo:}$$

El factor $\frac{22,4}{32}$, para pasar a moles de oxígeno y luego a litros.

El factor $\frac{1}{0,2}$, para tener en cuenta que el aire contiene el 20 por 100 de oxígeno.

El factor $\frac{100}{8}$, para tener en cuenta el rendimiento de transferencia de oxígeno.

El factor $\frac{1}{1000}$, para pasar de litros a metros cúbicos.

6. Podemos calcular, para comprobación, los kilos de oxígeno suministrado por kilo de DBO de entrada a la aeración:

$$\frac{(c)}{(a)} \cdot 15 \cdot \frac{24}{1000} = \frac{15 \cdot 24 \cdot 0,85}{350} = 0,87 \text{ kilos de } O_2/\text{kilo DBO aplicado,}$$

valor que está centrado con relación a la realidad. Aproximadamente es la mitad que los procesos de aeración prolongada.

7. Rendimiento de eliminación de DBO. Según la figura 2 deducimos que vale un 90 por 100.

8. Kilos de fangos biológicos formados:

Kilos de DBO eliminados al día $0,9 \cdot (a)$

Kilos de fangos formados al día ... $0,9 \cdot (a) \cdot f$.

9. Recirculación de lodos: A la salida del estanque de aeración, la mezcla de agua y lodos pasa a la decantación secundaria; el agua decantada constituye el efluente depurado. Los lodos sedimentados se extraen del decantador; una parte se recircula mezclándola con el agua que pasa al estanque, y otra se pasa al decantador primario para recogerlos en él.

Si el caudal que se extrae es inferior al que ocupan los lodos que se van concentrando en

el decantador, el nivel de los lodos va elevándose en el decantador, hasta que terminan por salir con el efluente decantado, aumentando la DBO del mismo. Es, pues, preciso mantener un mínimo caudal de extracción de lodos para conseguir un efluente limpio. Este caudal mínimo se calcula a partir de la definición del índice de lodos.

Como se dijo, el índice de lodos es el volumen en mililitros que ocupa un gramo de los lodos que hay en el estanque de aeración, cuando el líquido en el que están contenidos se deja decantar durante treinta minutos. En la práctica, el tiempo mínimo de retención de los decantadores secundarios, es superior a treinta minutos, oscilando alrededor de los cuarenta y cinco minutos; por lo que se puede considerar que en ellos el volumen de los lodos concentrados será algo inferior al valor definido por el índice de fangos. Se suele tomar un valor igual a:

$$\frac{SVI}{1,2};$$

la concentración de los lodos que se recirculan en Kg./l. es la inversa:

$$\frac{1,2}{SVI};$$

Entonces tenemos:

Peso en materias en suspensión, en gramos, que pasan a la decantación: $(Q + R) \cdot MLSS$.

Volumen que ocuparán una vez decantadas, en m^3 :

$$\frac{(Q + R) \cdot MLSS \cdot SVI}{1,2 \cdot 10^6}$$

Este ha de ser el mínimo caudal que hay que extraer como purga del decantador. Por un balance de materia se ve que es igual a R , luego igualando:

$$\frac{(Q + R) \cdot MLSS \cdot SVI}{1,2 \cdot 10^6} = R,$$

y denominando:

$$\frac{R}{Q} \cdot 100 = Re,$$

la recirculación en tanto por ciento sobre el caudal a tratar, tenemos:

$$Re = \frac{MLSS \cdot SVI \cdot 100}{1,2 \cdot 10^6 - MLSS \cdot SVI} = (i).$$

La figura 8 señala como varía Re , según los valores del SVI y $MLSS$. Se ve que la recirculación debe aumentar, tanto cuando aumenta el

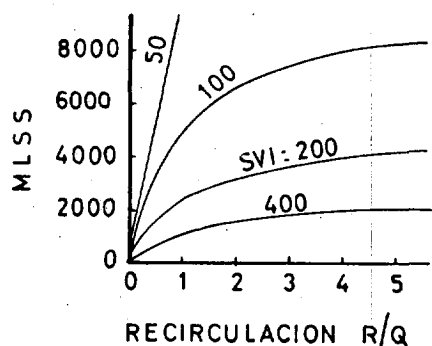


Figura 8.

contenido de sólidos en suspensión del líquido en aeración, como cuando aumenta el índice de lodos.

Aplicando a nuestro caso tenemos:

$$Re = \frac{2500 \cdot 100 \cdot 100}{1,2 \cdot 10^6 - 2500 \cdot 100} = 26 \%$$

Este caudal en parte se reintroduce en el estanque de aeración para aportar células biológicas a las aguas a depurar, y otra parte (R_1), en la que están contenidos los lodos formados, hay que retirar del circuito. El caudal a eliminar del circuito se deduce como sigue:

$$\begin{array}{l} \text{Kg. de DBO eliminados por} \\ \text{día en la depuración bio-} \\ \text{lógica} \dots\dots\dots \end{array} \quad \frac{P \cdot Q \cdot \text{DBO} \cdot (100 - r)}{1000 \cdot 100 \cdot 100} = (j)$$

Kg. de lodos secos formados por día, (j) : f.

Se conoce la concentración de los lodos en el líquido, que vale $\frac{1,2}{SVI}$, en kilos/litro. Luego igualando concentraciones, se tiene:

$$\frac{1,2}{SVI} \cdot 1000 = \frac{f \cdot P \cdot Q \cdot \text{DBO} \cdot (100 - r)}{10^5 \cdot R_1 \cdot 100}$$

de donde se deduce:

$$\frac{R_1}{Q} = \frac{SVI \cdot \text{DBO} \cdot f \cdot P \cdot (100 - r)}{1,2 \cdot 10^{10}} = (k);$$

para el caso supuesto de 325 mg./l. de DBO de las aguas brutas y los valores de f y P de 0,55 y

90 por 100, respectivamente, resulta un valor de $\frac{R_1}{Q} = 0,009$, o sea un 0,9 por 100 del caudal a tratar.

1.2. Tapared Aeration (Aeración proporcional). — Este sistema es muy parecido al anterior, se diferencia de él en la forma de aeración. En el sistema clásico la aeración está uniformemente repartida a lo largo del canal de aeración. Esto no es lógico, pues las aguas tienen el máximo de DBO a la entrada, valor que se va reduciendo a medida que pasa por el canal. De aquí se deduce que la necesidad de oxígeno es máxima en la entrada del canal y mínima a la salida de él.

En el sistema *tapared aeration* la aeración se realiza en cada sección del canal, de forma proporcional a la DBO que tiene el agua. O sea,

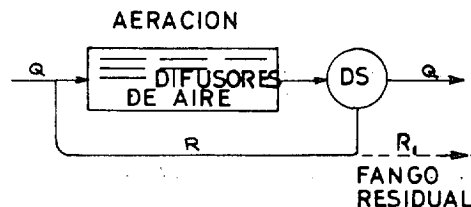


Figura 9.

a la entrada del canal se proveen más equipos de difusión y luego se van disminuyendo progresivamente hasta el final. El esquema de este sistema se indica en la figura 9. La figura 10 se-

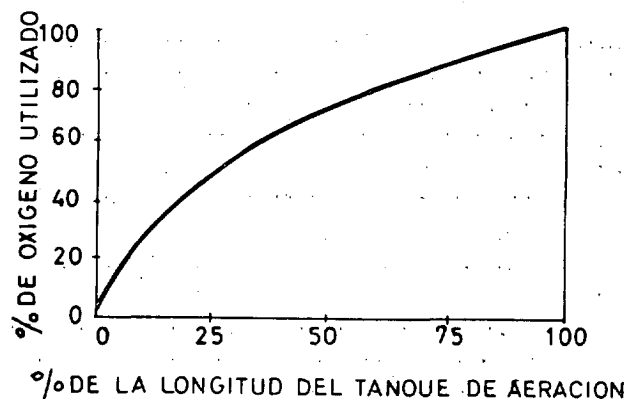


Figura 10.

ñala el tanto por ciento de oxígeno consumido, según el tanto por ciento de longitud del canal; se observa que tan sólo en el primer 25 por 100 de la longitud del canal se consume el 50 por 100

de oxígeno total. En definitiva, los difusores se reparten de forma que exista la misma cantidad de oxígeno disuelto a lo largo de todo el canal.

Las cargas de *DBO* son similares al sistema clásico, del orden de 0,35 a 0,40 kilos de *DBO*/kilo de *MLSS*/día. Los consumos de oxígeno son algo inferiores; se puede tomar un punto intermedio entre las curvas de flujo transversal y homogéneo de la figura 5.

1.3. Step-aeration (aeración en pasos). — Como se ha indicado, una de las principales desventajas del sistema clásico reside en mantener a lo largo del canal de aeración una *DBO* variable, mayor al principio y menor al final. La *step-aeration* es un sistema diseñado para paliar este inconveniente. Consiste en realizar la entrada de agua a depurar, en vez de totalmente en la cabeza del canal, repartida en diferentes puntos a lo largo de él. De esta forma, la carga se reparte a lo largo del canal, con lo que, en definitiva, se aproxima a un sistema homogéneo. Los lodos que se recirculan entran totalmente en cabeza con una de las partes del caudal a depurar. El esquema de la figura 11 representa este tipo de sistema.

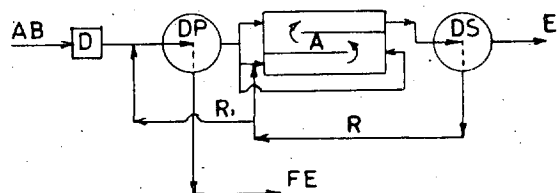


Figura 11.

En el gráfico de la figura 12 se representan las curvas (1) de funcionamiento de un sistema clásico, y la (2) del sistema *step-aeration*. Se observa cómo la relación entre la carga de *DBO* y masa de células, se mantiene en la *step-aeration* entre unos límites más estrechos que en el caso del sistema clásico. En consecuencia, con un tiempo de aeración inferior (menor tamaño del estanque) se consiguen resultados equivalentes.

Con la *step-aeration* se consigue aproximarse a los sistemas de flujo homogéneo. Con este sistema, si bien la carga másica de trabajo aumenta tan sólo ligeramente con relación a los sistemas clásicos, como es posible funcionar con mayores valores de *MLSS*, se admiten cargas volúmicas del orden de un 40 por 100 su-

periores. Este incremento repercute en la necesidad de un menor tiempo de retención, en general, fijado alrededor de tres horas. En resumen, se consigue un notable ahorro en el coste de las obras.

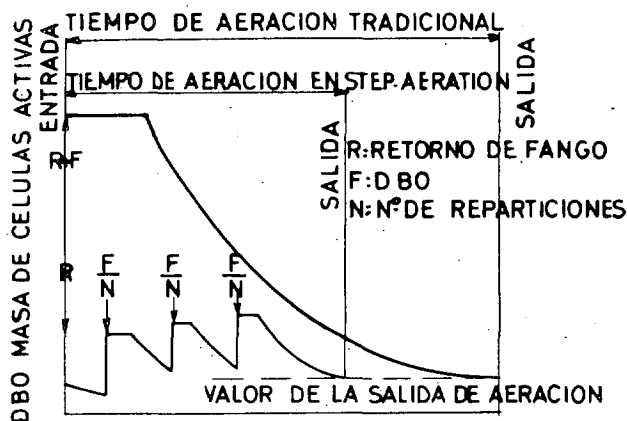


Figura 12.

1.4. Contac-stabilization. — Esta modalidad se funda en la rápida adsorción de *DBO* que las células realizan en el período logarítmico. En el caso general, bastan dos horas para que las células adsorban la *DBO*, tanto en forma de suspensión como en disolución de las aguas.

De acuerdo con este hecho, las aguas brutas y lodos recirculados se ponen en contacto en un estanque aireado (estanque de contacto), de unas dos horas de retención. Seguidamente el líquido pasa a la decantación secundaria; el agua decantada constituye el efluente depurado, y los lodos son los que se recirculan. Ahora bien, los lodos están en una fase logarítmica, con una gran cantidad de alimentos almacena-

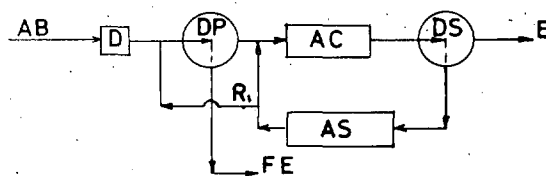


Figura 13.

dos, que si no los asimilan, no tienen capacidad para adsorber más *DBO*. Por ello, previamente a ponerlos de nuevo en contacto con el agua, se pasan a un segundo estanque (estanque de estabilización), para que asimilen los

alimentos. A la salida de este estanque están de nuevo en condiciones de adsorber rápidamente la *DBO* de las aguas brutas. La figura 13 representa esquemáticamente esta modalidad.

El tiempo de retención del estanque de estabilización es de unas cuatro horas, pero referidas al caudal de lodos que se recirculan. De aquí la ventaja de esta modalidad, cuyos estanques de aireación tienen un volumen total de unas cuatro horas, referidas al caudal a tratar. En resumen, en esta modalidad también se adoptan cargas volúmicas superiores a la admitida en la clásica.

El oxígeno que se suministra se reparte entre los dos estanques; como en el estanque de estabilización es donde las células asimilan la *DBO*, es donde mayor consumo requieren. Del total, aproximadamente, un tercio se reparte en el estanque de contacto y dos tercios en el estanque de estabilización.

En la actualidad, casi todas las firmas comerciales disponen de plantas de *contac-stabilization*, de tipo compacto. En estas plantas se ha eliminado el decantador primario, pasando las aguas directamente al estanque de contacto; los lodos residuales decantados que es preciso

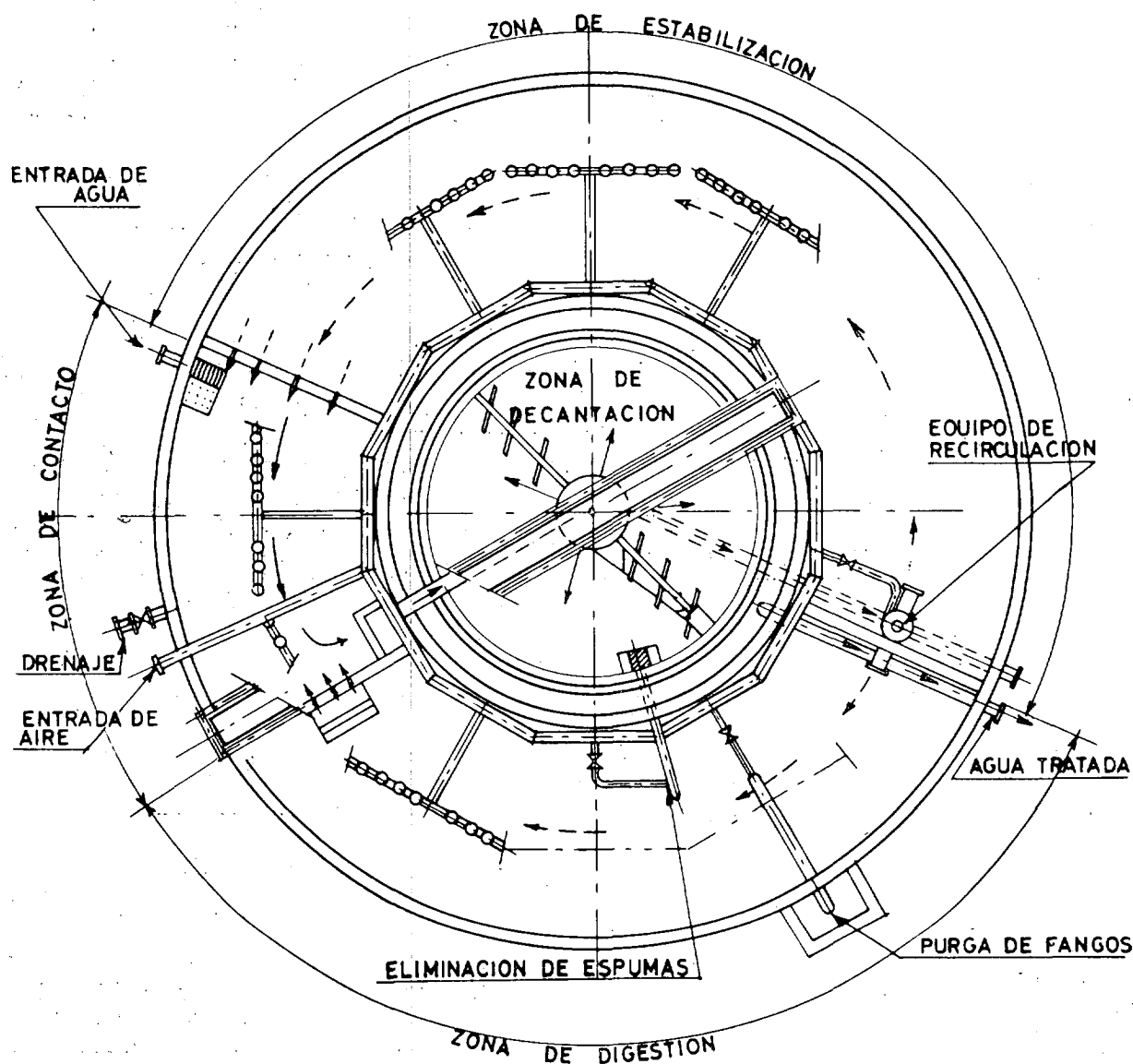


Figura 14.

eliminar, pasan a un compartimento donde se digieren mediante un proceso aerobio. La figura 14 representa, en planta, una instalación tipo.

Recirculación.—El caudal de recirculación, en esta modalidad, debe ser superior a los otros sistemas mencionados, ya que los lodos que se recirculan a la estabilización, están principalmente en fase logarítmica. En esta fase el índice de lodos es muy alto; del orden de 150. Suponiendo que la concentración de materias en suspensión en el estanque de contacto sea 2 500 mg./l., se obtiene, según la fórmula (i):

$$Re = \frac{MLSS \cdot SVI \cdot 100}{1,2 \cdot 10^6 - MLSS \cdot SVI} = \frac{2500 \cdot 150 \cdot 100}{1,2 \cdot 10^6 - 2500 \cdot 150} = 45;$$

en la práctica se utilizan valores desde el 40 al 70 por 100.

Volumen del estanque de aeración, en m.³ V_2
 R y Q , caudales en m.³/día.

$$(c) = \frac{X}{1000} \cdot V_1 + \frac{Y}{1000} \cdot V_2,$$

$$X \cdot (Q + R) = Y \cdot R.$$

De estas dos ecuaciones se deducen los valores de X e Y .

II. High-rate o Modified aeration (sistemas de alta carga o modificados).—En estos sistemas se adoptan cargas máxicas entre 2 y 5 kilos de DBO por kilo de materias en suspensión en aeración y día. Para conseguir medianos índices de fangos, se requiere mantener en el estanque de aeración una concentración en sólidos en suspensión baja, en general inferiores a 1 000 miligramos/litro. Aplicando la fórmula de cálculo de la recirculación, para un índice de fangos

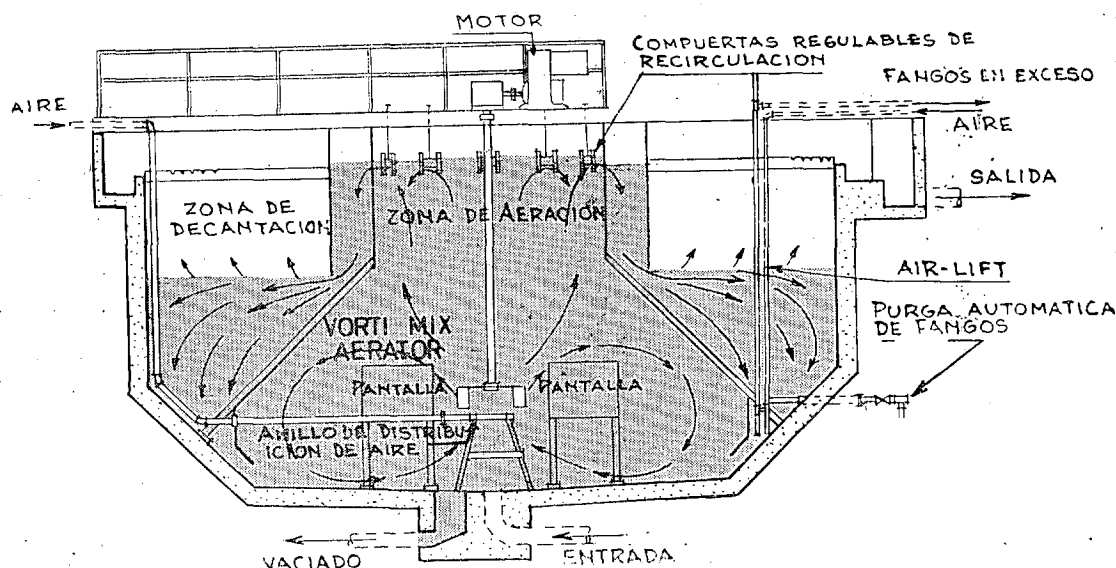


Figura 15.

Concentración de sólidos en suspensión en los estanques de aeración.—El total de sólidos en aeración se puede calcular por la fórmula (c), según la forma de cálculo de la modalidad clásica. Este total (c) estará repartido entre los dos estanques; la proporción que hay en cada uno se puede calcular como sigue:

Concentración de sólidos en contacto, en mgr./l. X
 Concentración de sólidos en estabilización, mgr./l. Y
 Volumen del estanque de contacto, en m.³ V_1

de 150, se obtiene un valor bajo, con relación a los otros sistemas:

$$Re = \frac{100 \cdot SVI \cdot MLSS}{1,2 \cdot 10^6 - SVI \cdot MLSS} = \frac{100 \cdot 150 \cdot 700}{1,2 \cdot 10^6 - 150 \cdot 700} = 9,5 \%$$

El rendimiento de eliminación de DBO es inferior a los otros sistemas; así se observa en la figura 2. En general, se admite un 60 a 70 por 100 cuando se tratan aguas decantadas, y entre 65 y 75 por 100, si son aguas sin previa decantación.

El exceso de fangos producidos es mayor que en el resto de los sistemas; pues abundan las células en fase logarítmica; se admiten valores alrededor de 0,75 kilos de fangos por cada kilo de *DBO* eliminado. El caudal a purgar, R_1 , se deduce aplicando la fórmula (k), obteniéndose en este caso:

$$\frac{R_1}{Q} = \frac{SVI \cdot DBO \cdot f \cdot p \cdot (100 - r)}{1,2 \cdot 10^{10}} =$$

$$= \frac{150 \cdot 325 \cdot 0,75 \cdot 70 \cdot 70}{1,2 \cdot 10^{10}} = 0,015;$$

o sea el 1,5 por 100, valor superior al obtenido en el sistema clásico, siendo ésta una de las desventajas de este procedimiento.

La carga volúmica es alta, por lo que, a pesar del bajo valor de *MLSS*, los tiempos de retención se reducen notablemente, admitiéndose valores entre dos y tres horas. De aquí que se denominan también *short term aeration*, o sea, procesos de corta aeración.

Las diferentes modalidades derivadas de estos sistemas, funcionan con las cargas másicas y volúmicas, entre:

	CM	CV
Rapid Block	0,4 a 0,8	2,4
Supra Activation	2,8 a 4	6,5

Consumo de oxígeno. — Del gráfico de la figura 2 se deduce que para una carga másica de 3 kilos, se precisan unos 0,45 kilos de O_2 /kilo de *DBO*/día; este valor es la mitad del deducido para los sistemas clásicos.

Basados en estos sistemas, trabajando en condiciones similares al *rapid-block*, existen diferentes aparatos de tipo combinado (zona de aeración y decantación secundaria en un mismo aparato), que se utilizan mucho. De éstos, hace ya años se construyeron en España varios del tipo *aero-accelator*, de patente *Infilco*, según esquema de la figura 15. Posteriormente, la firma *Degremont*, que fue la que ejecutó los aparatos anteriores, ha montado otros denominados *oxicontac*.

Estos aparatos tienen tiempos de retención pequeños, funcionando con valores de *MLSS* alrededor de 2 500 mg./l., lo que obliga a fuertes

recirculaciones (superiores al 100 por 100), que se realizan sin necesidad de bombas, interiormente en el aparato. El índice de lodos es alto, lo que unido al fuerte caudal ($Q + R$) que se introduce en la zona de decantación, provoca que cualquier desequilibrio origine el escape de lodos con el agua decantada y, por tanto, un menor rendimiento de eliminación de *DBO*.

Como ventaja presentan una apreciable reducción en el costo de primera instalación. Los consumos de oxígeno que señalan las firmas suministradoras son bastantes bajos, del orden de 25 a 35 m.³ por kilo de *DBO* aplicado.

III. Extended aeration (aeración prolongada; oxidación total). — Este sistema se describió en un artículo publicado en el mes de enero. Sin embargo, voy a resumir sus principales características, al objeto de completar este estudio.

Con este sistema no se suele utilizar una previa decantación primaria, pasando las aguas brutas directamente al estanque de aeración. Las condiciones de funcionamiento son las siguientes:

<i>MLSS</i>	3000 a 8000 mgr./l.
Carga másica (CM)	0,02 a 0,04 kilos <i>DBO</i> /Kg. <i>MLSS</i> /día.
Carga volúmica (CV)	0,12 a 0,25 kilos <i>DBO</i> /m. ³ -día.
Tiempo de retención (T)...	12 a 24 horas.
Consumo de oxígeno	1,5 a 1,8 Kg. de O_2 /Kg. <i>DBO</i> eliminado (unos 100 m. ³ de aire por kilo de <i>DBO</i>).
Lodos biológicos en exceso	0,14 Kg./kilos de <i>DBO</i> eliminado.
Rendimiento de eliminación <i>DBO</i> (P)	95 %.
Recirculación (Re)	50 a 100 %.

La cantidad de lodos biológicos en exceso es muy pequeña, admitiéndose que salgan con el efluente. Esto no quiere decir que en este sistema no se produzcan fangos residuales, pues como se vio en el número de enero existen otros orígenes que en total dan una apreciable cantidad.

Resumen de abreviaturas utilizadas.

DBO = demanda bioquímica de oxígeno a 20° C. y cinco días, expresada en mgr./l.

SSV = sólidos volátiles en suspensión en el estanque de aireación, expresados en mgr./l.

MLSS = total de sólidos en suspensión en el estanque de aireación, expresados en mgr./l.

X = total de sólidos en suspensión en el estanque de aireación de contacto.

Y = total de sólidos en suspensión en el estanque de aireación de estabilización.

Ss = sólidos en suspensión en las aguas residuales brutas, expresados en mgr./l.

CM = carga másica expresada en kilos, de *DBO* entrantes al estanque de aeración, por kilo de materias en suspensión que hay en él y por día.

CV = carga volúmica, expresada en kilos de *DBO* entrantes al estanque de aeración, por metro cúbico de estanque y por día.

SVI = índice de fangos o índice de Molhman

f = kilos de fangos que se forman por la acción biológica en la reducción de un kilo de *DBO* de las aguas.

Q = caudal de agua a depurar, en m.³/día.

R = caudal de recirculación, en m.³/día.

R₁ = caudal de lodos a eliminar del proceso biológico.

R_c = recirculación de lodos expresada en tanto por ciento del caudal a depurar.

r = rendimiento de eliminación de *DBO* en la decantación primaria, en tanto por ciento.

p = rendimiento de eliminación de *DBO* en la depuración biológica, en tanto por ciento.

V = volumen en m.³ del estanque de aeración.

V₁ = volumen en m.³ del estanque de aeración de contacto.

V₂ = volumen en m.³ del estanque de aeración de estabilización.

T = tiempo en horas del estanque de aeración, referido al caudal a tratar.

Bibliografía.

"Activated Sludge Process Variation. The Complete Spectrum". *Water and Sewage Works*. Reference number 1964.

"A Generalized Approach to Activated Sludge". *Water Works and Wastes Engineering*, julio, agosto, octubre, noviembre y diciembre de 1965.

"Homogeneous Activated Sludge" 1. *Water and Wastes Engineering*, julio 1967.

"Principios y criterios de diseño de la oxidación total". *Revista de Obras Públicas*, enero 1968.