

# Fundamentos lodos activos y tipos de reactores. Módulo Gestión de Aguas Residuales y Reutilización

## Máster en Ingeniería y Gestión del Agua

2016

PROFESOR  
Jaime La Iglesia Gandarillas

Para ver este archivo, debe  
instalar el software de un  
decompressor.

Esta publicación está bajo licencia Creative Commons Reconocimiento, Nocomercial, Compartirigual, (by-nc-sa). Usted puede usar, copiar y difundir este documento o parte del mismo siempre y cuando se mencione su origen, no se use de forma comercial y no se modifique su licencia. Más información: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

1.	INTRODUCCIÓN.....	3
2.	OBJETIVO.....	3
3.	BASES DE PARTIDA.....	3
4.	FANGOS ACTIVADOS (BIOMASA SUSPENDIDA).....	6
	<b>4.1 Alta carga.....</b>	<b>9</b>
	<b>4.2 Fangos activos convencionales .....</b>	<b>10</b>
	<b>4.3 Aireación prolongada .....</b>	<b>11</b>
	<b>4.4 Reducción de nutrientes.....</b>	<b>13</b>
	<b>4.5 Canales de oxidación.....</b>	<b>13</b>
	<b>4.6 Reactores biológicos secuenciales.....</b>	<b>14</b>
	<b>4.7 Proceso de contacto estabilización.....</b>	<b>16</b>
	<b>4.8 Sistema A-B .....</b>	<b>16</b>
5.	PROCESOS BIOPELÍCULA (BIOMASA ADHERIDA).....	17
	<b>5.1 Filtros percoladores o lechos bacterianos .....</b>	<b>18</b>
	<b>5.2 Biodiscos .....</b>	<b>20</b>
	<b>5.3 Lechos aireados sumergidos.....</b>	<b>25</b>
	<b>5.4 Sistemas MBBR.....</b>	<b>26</b>
6.	OTROS PROCESOS.....	26
	<b>6.1 Biofiltros.....</b>	<b>27</b>
	<b>6.2 Biomasa fija sobre lecho móvil. Procesos híbridos.....</b>	<b>27</b>
	<b>6.3 Biorreactores con membranas.....</b>	<b>27</b>
	<b>6.4 Parámetros de funcionamiento de otros procesos.....</b>	<b>29</b>
	<b>6.5 Nuevas tendencias.....</b>	<b>30</b>
7.	COMPARATIVA ENTRE LA BIOMASA EN SUSPENSIÓN Y LA BIOMASA FIJA.....	30
8.	BIBLIOGRAFIA.....	31

## 1. INTRODUCCIÓN

Una depuradora entre otras cosas es una fábrica de biosólidos donde separamos la materia orgánica y otros componentes del agua con el objetivo de poder verter este agua al cauce con unos parámetros que cumplan la legislación vigente y en el caso de que no la haya, la devolvamos a la naturaleza en unas condiciones que eviten problemas sanitarios y que no perjudiquen al medio donde se vierten.

En este documento se explica cómo dimensionar los procesos y tipos de depuración , entre todos ellos abarcan más del 90% de los sistemas existentes actualmente.

## 2. OBJETIVO

El objetivo que se pretende conseguir con este documento es marcar las pautas para diseñar los diferentes procesos biológicos de una depuradora de agua residual urbana.

En cada uno de los apartados siguientes se establecen los parámetros para el cálculo y dimensionamiento de cada uno de los diferentes tipos de biológicos. Lógicamente y en función de diversos condicionantes se podrá elegir entre unos sistemas u otros o simplemente no utilizarlos.

## 3. BASES DE PARTIDA

A la hora de dimensionar una depuradora es fundamental saber qué cantidad y cómo es la materia prima que entra. Es decir necesitamos saber el caudal de agua que va a ser tratado y qué características de contaminación tiene esta agua. El dimensionamiento que aparece en los contenidos del documento está establecido para depuradoras de aguas residuales urbanas donde se utilizarán procesos biológicos para eliminar la contaminación. Los parámetros que caracterizan las aguas residuales urbanas suelen estar entre un rango más o menos de:

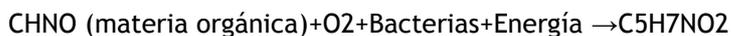
- Sólidos en suspensión (SS): 200 - 400 mg/l
- DBO5: 200 - 400 mg/l
- DQO: 400 - 800 mg/l
- pH agua residual: alrededor 6-8
- Dotación: 150 - 300 l por habitante y día
- Carga de DBO5: 50 - 75 g por habitante y día

- Carga de SS: 50 - 90 g por habitante y día
- En otros casos habrá que analizar nutrientes: nitrógeno, como Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK): 30 - 80 mg/l y Fósforo (P): 5 - 20 mg/l, por si se quieren eliminar para evitar la eutrofización de los receptores del agua depurada.

En este documento se van a establecer los parámetros más comunes para dimensionar los procesos y tipos de depuración que abarquen más del 90% de los sistemas existentes actualmente.

Los procesos que se van a estudiar son procesos biológicos de depuración aerobia. Los organismos aerobios durante la respiración usan el oxígeno como receptor final de los electrones. El oxígeno tiene un potencial muy bajo de reducción y cuando se utiliza en el tratamiento de depuración es muy eficiente. Siempre que se pueda, se usarán sistemas aerobios pues son más rápidos y aceleran el proceso de depuración. En el caso de los organismos anaerobios, estos utilizan receptores de electrones con un potencial mucho más alto de reducción que el oxígeno, esto implica que la respiración es menos eficiente y por eso los rendimientos de depuración son mucho más lentos que en los procesos aerobios.

Estos procesos biológicos son realizados por un grupo de microorganismos (bacterias y protozoos) que en presencia de oxígeno usan la materia inorgánica y orgánica como fuente de energía transformándola en gases y materia celular según la reacción:



Después de un tiempo de retención suficiente en la cuba entre la materia orgánica del agua residual, los microorganismos (bacterias) y el oxígeno, la materia orgánica del medio disminuye transformándose en nuevas células, gases y otros productos que seguirán actuando sobre el agua residual. A estas reacciones se les denomina oxidación biológica porque los microorganismos usan oxígeno para realizarla.

A modo de resumen, el objetivo con estos tratamientos aerobios es la reducción de la materia orgánica existente en el agua residual y la disminución de los microorganismos patógenos y fecales.

Básicamente existen los siguientes procesos de tratamientos biológicos aerobios:

Fangos activados de biomasa suspendida o en suspensión, entre ellos se tienen:

Alta carga

Fangos activos convencionales

Aireación prolongada

Reducción de nutrientes (se explican en otro documento específico)

Canales de oxidación

Reactores biológicos secuenciales, del inglés SBR (Sequential Biological Reactor)

Proceso contacto estabilización

Sistema A-B

Procesos de cultivo fijo o biopelícula o biomasa adherida, entre ellos se tienen:

lechos bacterianos o filtros percoladores

Contadores biológicos rotativos o biodiscos

Lechos aireados con relleno sumergido fijo, del inglés SAF (Sumerged Aerated Filter)

Lechos aireados con relleno móvil, del inglés MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor)

**Otros sistemas**, entre ellos se tienen:

Biofiltros del inglés BAF (Biological Aerated Filter)

Procesos híbridos. Biomasa fija con biomasa en suspensión, del inglés IFAS (Integrated Fix-film Activated Sludge).

Biorreactores con membranas

Nuevas tendencias en experimentación como pueden ser la resonancia magnética, la nanotecnología, fotocátalisis solar o la bioelectrogénesis

Lógicamente y en cada caso, se deberán de estudiar las particularidades de cada depuradora en función de numerosos parámetros que marcarán cual es la mejor depuradora que se quiere dimensionar. Con carácter general estos parámetros suelen ser, entre otros: la cantidad de población que se va a tratar y su proyección a futuro, contaminación del agua, ubicación de la

depuradora, desarrollo económico y social de la zona, situación geográfica, disponibilidad de espacio, punto de vertido, posibilidad de reutilización del agua.

## 4. FANGOS ACTIVADOS (BIOMASA SUSPENDIDA)

El proceso de fangos activados o biomasa suspendida consiste en una balsa o depósito en donde hay microorganismos y flóculos en suspensión, obteniéndose éstos mediante la acción metabólica de aquellos. Para ello necesitan una fuente de energía que obtienen de la contaminación presente en la materia orgánica. Durante el proceso se aporta oxígeno y se recirculan parte de los fangos del clarificador para mantener una concentración adecuada de biomasa suspendida. Una vez alcanzada la floculación adecuada, las aguas con los flóculos pasan a un clarificador o decantador secundario donde se produce la separación del biosólido por un lado y del agua depurada por otro.

Los diferentes procesos se diferencian fundamentalmente en la edad del fango, es decir, el tiempo que los microorganismos permanecen en el tratamiento. La depuración en estos procesos se debe a dos fenómenos diferenciados: contacto y estabilización. Precisamente el menor o mayor grado de estabilización se debe a un menor o mayor tiempo de permanencia en la balsa de fangos activados. Las tecnologías, fuera de patente, más comúnmente utilizadas son:

Alta carga

Media carga

Aeración prolongada

Reducción de nutrientes

Las fórmulas empleadas para calcular los tratamientos biológicos son:

Edad del fango o tiempo de retención celular (TRC): representa el tiempo que el sustrato o licor mezcla permanece en el sistema.

$$\text{Edad del fango o tiempo de retención celular (TRC)} = \frac{MLSS * V}{Qd * (DBO5e - DBO5s) * Fe}$$

Carga másica o carga de contaminación del sistema es la relación de la carga que entra y los kilogramos de sustrato o licor mezcla.

$$Carga\ másica\ C_m = \frac{(Q_m * DBO5e)}{KgMLSS}$$

La concentración de microorganismos en el reactor son los kg de sustrato o licor mezcla que tenemos en la cuba de aireación por unidad de volumen.

$$Kg\ MLSS = V\ (m^3) * [MLSS]\ (Kg/m^3)$$

Carga volúmica, es la carga orgánica contaminante por día en el agua residual, expresada por los kg de DBO5 de entrada en al biológico al día respecto al volumen total del biológico en m<sup>3</sup>.

$$Carga\ volúmica\ C_v = \frac{(Q_d * DBO5e)}{V(m^3)}$$

Tiempo de retención hidráulica, representa el tiempo que el influente permanece en el sistema.

$$TRH = V/Q_m$$

Para la reducción de nutrientes, nitrificar desnitrificar y eliminar fósforo, se emplearán otras fórmulas que se explican en documento diferenciado de éste.

Siendo:

[MLSS] = concentración del licor mezcla en kg/m<sup>3</sup> o mg/l (ppm)

V = volumen en m<sup>3</sup>

Q<sub>m</sub> = Caudal medio de entrada en el biológico en m<sup>3</sup>/h

(DBO5)<sub>e</sub> = DBO5 que entra en el biológico en ppm

(DBO5)<sub>s</sub> = DBO5 que sale del biológico en ppm, la que marque la legislación. En España según decreto 271 de la CEE es 25 ppm

Fe = tasa de extracción de fangos son los Kg de fango que se producen por Kg de DBO5 eliminada.

Para calculara la tasa de extracción de fangos se pueden usar las siguientes fórmulas empíricas y se toma, redondeando con un decimal, el valor más alto:

CHUDOBA (en desuso)

$$Fe = 0,57 / (1 + 0,16 * \text{Edad fango}) + 0,14 + (0,5 * \text{SS entrada} / \text{DBO5 entrada biológico})$$

HUISKEN (comúnmente utilizada)

$$Fe = 1,2 * \text{Carga másica}^{0,23} + 0,5 (\text{SS} / \text{DBO5} - 0,6)$$

Siempre que la relación SS/DBO5 sea mayor que 0,6. Si es menor o igual se usa directamente

$$Fe = 1,2 * \text{Carga másica}^{0,23}$$

NORMA ATV ALEMANA

$$Fe = 0,75 + 0,6 * r - (0,102 * Ef * Ft) / (1 + 0,17 * Ef * Ft)$$

Siendo:

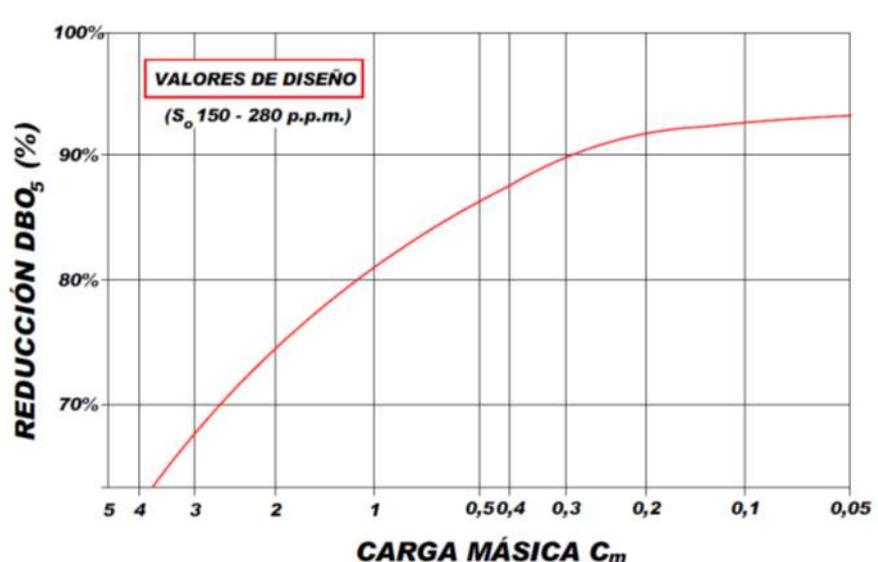
Ft = factor temperatura para la respiración endógena  $1,072^{(t-15)}$

t = temperatura del agua en grados centígrados

r = SS entrada en el reactor biológico / DBO5 entrada en el reactor biológico

Ef = Edad del fango

En la gráfica siguiente podemos ver los rendimientos en la eliminación de DBO5 función de la concentración inicial de DBO5 ( $S_0$ ) en la entrada del biológico y de la carga másica ( $C_m$ ).



Fuente Cedex

El anterior gráfico relaciona empíricamente la carga másica  $C_m$  y la  $DBO_5$  en el efluente clarificado, teniendo en cuenta la parte soluble de la  $DBO_5$  y los sólidos en suspensión  $SS$  existentes en dicho efluente.

$$DBO_5 \text{ soluble en el efluente (mg/l)} = DBO_5e / (1 + (K_m * DBO_5e) / (MLSS * C_m))$$

$$DBO_5 \text{ consecuencia de los SS (mg/l)} = SS * \text{factor } f(C_m)$$

$$f(C_m) = 0,8 * C_m^{1/2} \text{ si } C_m < 0,5$$

$$f(C_m) = 0,58 \text{ si } C_m > 0,5$$

Siendo  $K_m$  = factor de eliminación de  $DBO_5$  en días<sup>-1</sup>, función de la temperatura

km	°C
120	5
180	10
360	20
720	30

Calculando la  $DBO_5$  soluble y la  $DBO_5$  consecuencia de los  $SS$ , la suma de las dos nos dará la  $DBO_5$  total de salida que tendrá que ser < de 25 ppm, caso de la legislación 271 de la CEE.

### 4.1 Alta carga

La edad del fango es de unos 0,25 a 0,5 días, la reducción de contaminación se debe únicamente al efecto contacto, por lo que los rendimientos no son muy elevados, en torno al 60% en eliminación de  $DBO_5$  y 80% en eliminación de  $SS$ . Debido a esto es frecuente su empleo como una primera etapa. A continuación se pone un decantador como clarificador, aunque se calcula como primario en el caso de que se derive la alta carga y se pase directamente a la siguiente etapa. Posteriormente se mejora calidad del efluente en otra segunda etapa de menor carga. Se usa para reducir contaminaciones altas por encima de 400-500 ppm en  $DBO_5$  antes de entrar en el biológico.

Datos previos:

MLSS	2.000	ppm
EDAD DEL FANGO (TRC)	0,25-0,5	d
CARGA MÁSICA	2-5	Kg DBO5/kg MLSS/d
TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA (TRH)>	0,5-1	h
ALTURA BIOLÓGICO	4-6	m
Kg O2/ Kg DBO5 media eliminada	0,1-0,2	
Kg O2/ Kg DBO5 punta eliminada<	0,5	
RENDIMIENTOS REDUCCIÓN DBO5<	60%	
RENDIMIENTOS REDUCCIÓN SS<	80%	

Con estos datos y utilizando las fórmulas del apartado anterior despejamos de cada fórmula V y obtenemos un volumen de biológico. Se elegirá el volumen mayor para que se cumpla cualquiera de los parámetros que se indican en la tabla de arriba. Es decir por edad de fango, por carga másica y por tiempo de retención hidráulica, el volumen tiene que cumplir.

### 4.2 Fangos activos convencionales

Es un proceso de biomasa suspendida (fangos activos) con edades del fango medias (entre 4 y 6 días) que se caracterizan por una reducción de la contaminación por contacto y posterior asimilación. Se suele utilizar como tratamiento secundario en plantas convencionales que sólo requieran la eliminación de la contaminación de origen carbonosa.

Datos previos:

MLSS	2.500-3.500	ppm
------	-------------	-----

EDAD DEL FANGO (TRC)>	4-6	d
CARGA MÁSCICA	0,2–0,3	Kg DBO5/kg MLSS/d
TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA (TRH)>	4-8	h
ALTURA BIOLÓGICO	4-6	m
Kg O2/ Kg DBO5 eliminada media	1	
Kg O2/ Kg DBO5 eliminada punta	2-2,5	
RENDIMIENTOS REDUCCIÓN DBO5>	90%	
RENDIMIENTOS REDUCCIÓN SS>	90%	

### 4.3 Aireación prolongada

Es un proceso de biomasa suspendida (fangos activos) con edades del fango elevadas superiores a los 20 días, dependiendo de la temperatura, que se caracterizan por una reducción de la contaminación no solo de origen carbono sino también la de origen en el ciclo del nitrógeno y del fósforo. Además no hay necesidad de tratar posteriormente el fango pues se estabiliza en la propia cuba de aireación. El agua entra directamente en la cuba sin decantación primaria previa. Se necesita una clarificación posterior al proceso biológico para separar el fango activo mineralizado del agua limpia. La temperatura influye mucho en la estabilización del fango. A menor temperatura se necesita más edad del fango para conseguir una estabilización adecuada.

ESTABILIZACIÓN FANGO VIA AEROBIA	
(Fuente Cedex)	
T°C	Edad del fango en días
5	> 35
10	20
12	17

13	16
15	14
17	12,67
18	12
20	10

Se suele utilizar como tratamiento en plantas hasta 100.000 habitantes equivalente por su facilidad de explotación. Poblaciones mayores implicarían grandes superficies para el biológico y consumos excesivos de energía eléctrica para la aportación de oxígeno en el proceso de aireación.

Datos previos:

<b>MLSS</b>	3.500-4.500	ppm
<b>EDAD DEL FANGO (TRC)*</b> * Depende de la temperatura	10-30	d
<b>CARGA MÁSICA&lt;</b>	0,1	Kg DBO5/kg MLSS/d
<b>TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA (TRH)*&gt;</b> *Depende de la edad del fango	24	h
<b>ALTURA BIOLÓGICO</b>	4-6	m
<b>Kg O2/ Kg DBO5 media eliminada &gt;</b>	2	
<b>Kg O2/ Kg DBO5 punta eliminada &lt;</b>	4	
<b>RENDIMIENTOS REDUCCIÓN DBO5&gt;</b>	90%	
<b>RENDIMIENTOS REDUCCIÓN SS&gt;</b>	90%	

\*Es importante tener en cuenta la zona geográfica donde se va a dimensionar la depuradora. No es lo mismo calcular en zonas tropicales con temperaturas constantes a lo largo del año de unos 25°C que en zonas frías. Por ejemplo en el Nordeste de Brasil (temperatura media 24 °C todo el año) con 5 días de edad del fango consigues su mineralización sin necesidad de un tratamiento posterior. La tendencia es no calcular por debajo de 12°C para evitar edades del fango excesivas, lo normal es no pasar de 20 días de edad del fango.

#### 4.4 Reducción de nutrientes

Es un proceso de biomasa suspendida (fangos activos) que se caracteriza por una reducción de la contaminación no solo de origen carbonada sino también la de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo. Se diseña para para reducir los nutrientes en el agua depurada y con ello evitar procesos de eutrofización y contaminación de las aguas por nutrientes. Si el agua va a ser regenerada y posteriormente utilizada en agricultura, en algunos casos no es necesario reducir nutrientes y así estos pueden ser aprovechados por las plantas.

En las depuradoras se emplean diversos métodos para la eliminación de nitrógeno basados todos ellos en la presencia de oxígeno para la nitrificación y posteriormente la ausencia de oxígeno para la desnitrificación. Para la eliminación de fósforo se combinan selectores anaerobios y aerobios.

Este proceso se presenta como documento aparte de estos apuntes, donde se incluye el cálculo de la aireación y el estudio de la recirculación externa e interna, válido para los demás sistemas estudiados en este documento.

#### 4.5 Canales de oxidación

Es un canal ovalado o circular. Normalmente funciona como proceso de aireación prolongada sin decantación primaria previa, con largos tiempos de retención hidráulica y alta edad de fangos. Posteriormente se emplea un decantador secundario a modo de clarificador.

Los parámetros de dimensionamiento que se suelen usar en canales de oxidación son:

	Proceso convencional	Aireación Prolongada
MLSS (kg/m <sup>3</sup> )	2,5-3,5	3,5-4,5
EDAD DEL FANGO (TRC) días	4-8	18-30
CARGA MÁSCICA Kg DBO5/kg MLSS/d	0,2-0,4	<0,1
TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA (TRH) h	4-8	20-34

Kg O2/ Kg DBO5 eliminada media	1	>2
Kg O2/ Kg DBO5 eliminada punta <	2-2,5	4-4,5
VELOCIDAD HORIZONTAL EN CANAL (m/s)	0,3	0,3
RENDIMIENTOS REDUCCIÓN DBO5	90%	95%
RENDIMIENTOS REDUCCIÓN SS	90%	95%

Con estos criterios calcularemos el volumen que cumpla para todos los parámetros. Los consumos de oxígeno son dados para condiciones estándar.

#### 4.6 Reactores biológicos secuenciales

Para mejorar el rendimiento de reducción de nutrientes en los canales de oxidación debido a la existencia de niveles de O2 en las zonas anóxicas superiores a los necesarios y tiempos de retención hidráulica insuficientes para el proceso de desnitrificación se implementaron sistemas de desnitrificación secuencial.

En estos sistemas llamados SBR (Sequential Biological Reactor) o reactor biológico secuencial las mismas operaciones unitarias que se llevan a cabo en un proceso convencional de fangos activos ocurren de forma secuencial e un único depósito, mediante automatismos que controlan cada fase del proceso. Muchos de estos sistemas están sometidos a patentes, como el Biotenitro-biotenifo, el ICEAS o el Nereda entre otros.

Los SBR se suelen implantar de forma modular y el equipamiento incluye el sistema de introducción del agua residual, la retirada de agua depurada, la instalación de aeración, la extracción de fangos y eventualmente la instalación de mezcla. Cuando la introducción del agua residual se hace de forma intermitente en determinados intervalos de tiempo, se requiere un almacenamiento previo, o disponer de varias unidades funcionando en paralelo.

El intervalo de tiempo que empieza con el final de la extracción del agua tratada y termina con el fin de la próxima extracción se denomina ciclo. Cada ciclo se divide en una serie de fases de proceso que pueden ser las siguientes:

Fase de llenado.- Intervalo de tiempo en el que se introduce el agua residual en el tanque.

Fase de mezcla.- Tiempo en el cual el contenido del tanque sin introducción de oxígeno se mezcla y en el que se generan condiciones anóxicas y/o anaeróbicas del medio.

Fase de redisolución biológica de fósforo. Tiempo anaerobio dentro de la de fase de mezcla.

Fase de aeración.- Tiempo en que tiene lugar la aeración, incluyendo proceso de nitrificación.

Fase de sedimentación.- Tiempo en el que sedimenta el fango activo.

Fase de reacción.- Tiempo en el que tienen lugar procesos biológicos aerobios, anóxicos o anaerobios.

Fase de retirada del agua clarificada. Tiempo durante el cual el agua clarificada y en su caso el fango en exceso se retira.

Fase de reposo. Tiempo durante el cual el tanque espera a un nuevo relleno (opcional).

Fase de trabajo.- Tiempo, que abarca todo el ciclo, excluyendo los tiempos de espera o reposo.

Dos tanques SBR pueden equivaler a una planta de fangos activos con dos reactores y dos decantadores secundarios. Se pueden realizar cambios de operación, modificando la duración y secuencia de las fases de un ciclo. Además, existe la posibilidad de controlar la operación de forma automática y controlar las oscilaciones en la entrada a la planta.

Los criterios de dimensionamiento son:

	<b>SBR CONVENCIONAL</b>
<b>MLSS (kg/m<sup>3</sup>)</b>	4.5-5,5
<b>CARGA MÁSICA Kg DBO5/kg MLSS/d</b>	0,1-0,2
<b>CARGA VOLUMÉTRICA Kg DBO5/kg DBO5/d</b>	0,5-0,8
<b>ZONA ANÓXICA</b>	En periodos de no aireación en la cuba
<b>RENDIMIENTOS REDUCCIÓN DBO5</b>	95%
<b>RENDIMIENTOS REDUCCIÓN SS</b>	90%

Con estos criterios calcularemos el volumen que cumpla para todos los parámetros. Hay que tener muy en cuenta los tiempos de llenado y vaciado para poder realizar todas las fases del ciclo.

### 4.7 *Proceso de contacto estabilización*

Por otro lado se desarrollaron otros sistemas para aprovechar las propiedades del fango activado. Sabiendo que el proceso de fangos activos la eliminación de la materia orgánica medida como DBO5 tiene lugar en dos etapas, una rápida de adsorción y otra más lenta de oxidación, se diseña el tratamiento en dos cubas diferentes la primera de contacto y la segunda de estabilización.

Los criterios de dimensionamiento son los siguientes:

	Cuba de contacto	Cuba de estabilización
MLSS (kg/m <sup>3</sup> )	1-3	4-8
CARGA MÁXICA Kg DBO5/kg MLSS/d	0,2-0,6	0,2-0,6
TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA (TRH) h	<1	3-6
Kg O2/ Kg DBO5 eliminada media	0,5	1
Kg O2/ Kg DBO5 eliminada punta	0,7	2-2,5
RENDIMIENTOS REDUCCIÓN DBO5	60%	95%
RENDIMIENTOS REDUCCIÓN SS	90%	95%

### 4.8 *Sistema A-B*

Durante el desarrollo de las plantas de contacto estabilización se observó que la relación DBO5/N-NO3H en la segunda etapa solía tener un valor de dos, por lo que no se podía desnitrificar si no se realizaba un aporte externo de materia carbonosa para llegar a una relación superior a tres y conseguir la desnitrificación deseada.

Para cumplir con las mayores exigencias de los organismos de cuenca en cuanto a eliminación de nutrientes y altas cargas contaminantes, el profesor Botto Böhnke de Alemania desarrolló el proceso A-B. El proceso se caracteriza por tener una primera etapa denominada A de muy alta carga volumétrica, del orden de 10 kg DBO5/m<sup>3</sup>, seguida de otra etapa denominada B diseñada con parámetros convencionales. La principal característica es que las recirculaciones son independientes

y por lo tanto los fangos activos de cada etapa no se mezclan, teniendo cada etapa poblaciones microbianas distintas.

Los criterios de dimensionamiento son los siguientes:

	ETAPA A	ETAPA B
MLSS (kg/m <sup>3</sup> )	3-5	3-3,5
CARGA MÁSCICA Kg DBO5/kg MLSS/d	<5	0,1-0,4
CARGA VOLUMÉTRICA Kg DBO5/V(m <sup>3</sup> )/d	10-12	0,3-1,2
TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA (TRH) h	<1	2-10
EDAD DEL FANGO (TRC) días	0,5	3-15
Kg O <sub>2</sub> / Kg DBO5 eliminada	<0,2	1
CARGA HIDRÁULICA DECANTADOR INTERMEDIO-POSTERIOR m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /h	Q <sub>med</sub> < 1,3 Q <sub>max</sub> < 2,3	Q <sub>med</sub> <0,8 Q <sub>max</sub> <1,5
RENDIMIENTOS REDUCCIÓN DBO5	<55%	>90%
RENDIMIENTOS REDUCCIÓN SS	<65%	>90%

## 5. PROCESOS BIOPELÍCULA (BIOMASA ADHERIDA)

Procesos de cultivo fijo de biopelícula o biomasa adherida, que se van a estudiar son los siguientes:

Filtros percoladores o lechos bacterianos

Contadores biológicos rotativos o biodiscos

Lechos aireados sumergidos del inglés SAF (Sumerged Aerated Filter)

MBBR del inglés Moving Bed Biofilm Reactor

## 5.1 Filtros percoladores o lechos bacterianos

Los lechos bacterianos o filtros percoladores son depósitos rellenos de un material de gran superficie específica, natural o artificial, sobre los que se distribuye el agua a tratar uniformemente a lo largo de la superficie de todo el lecho. Los microorganismos depuradores presentes en el agua forman una película sobre dicho relleno, en la que la parte exterior se encuentra en condiciones aerobias debido a la aireación natural en el depósito y la interior en condiciones anaerobias que a lo largo del tiempo se va desprendiendo del soporte y generando nuevas capas.

La base fundamental de los filtros percoladores es disponer de una superficie elevada con el objetivo de que se desarrolle una gran masa de microorganismos para que eliminen la materia orgánica biodegradable. Posteriormente se dispone de un clarificador para separar el agua tratada del fango desprendido la película del medio.

Los filtros percoladores precisan de una ventilación adecuada. Para ello están provistos de un falso fondo que permite recoger el agua depurada, la biomasa desprendida y la circulación del aire. Este aire a través del filtro circula por corrientes de convección, basadas en la diferencia de temperatura entre el agua residual y el aire atmosférico.

$$v \text{ (m/min)} = 0,074 \cdot T(^{\circ}\text{C}) - 0,14$$

Siendo:

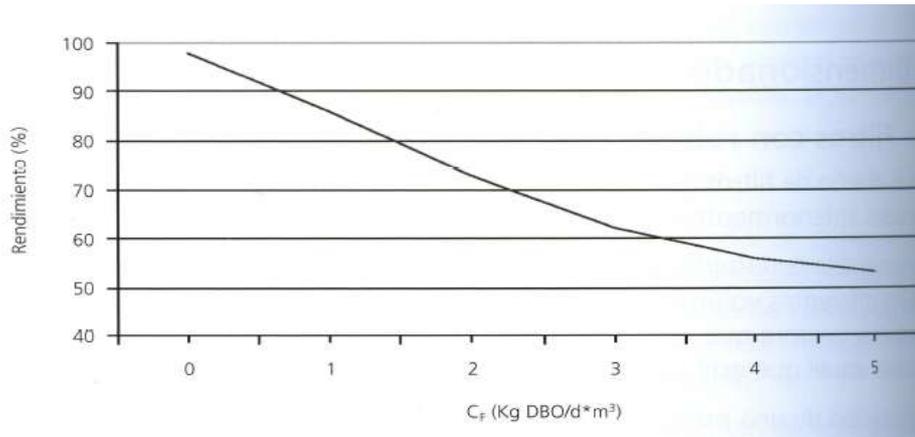
v: velocidad del aire en m/min

T: temperatura en °C

De la fórmula anterior se deduce que con diferencias de temperaturas entre el agua y el aire menores de 2°C el filtro no se aireará. En ese caso se puede generar una circulación forzada del aire mediante soplantes.

Los filtros percoladores pueden estar rellenos de piedras o plásticos. Nos centraremos en los de relleno plástico que son los que se usan actualmente debido a su gran superficie específica.

Los fabricantes de los diferentes rellenos disponen de unas gráficas en las cuales representan las cargas del filtro  $C_F$  según el rendimiento deseado:



A partir de la DBO<sub>5</sub> de entrada en el filtro y la exigida a la salida, en %, obtendremos el rendimiento del filtro y la carga necesaria.

La carga admisible por el filtro se calcula según:

$$C_F = \text{kgDBO}_5 \text{ entrada/día} \cdot \text{m}^3 \text{ relleno}$$

De la tabla y en función del rendimiento deseado obtenemos el C<sub>F</sub> o carga del filtro en Kg/m<sup>3</sup> día, siendo el volumen V (m<sup>3</sup>) = kg DBO<sub>5</sub>/d / C<sub>F</sub> (kg/m<sup>3</sup>\*d)

Conocido el volumen y con una altura aproximada, h entre 6 y 8 metros (los rellenos de piedra alturas máximas de 2 metros), según fabricantes obtenemos la superficie del filtro S (m<sup>2</sup>) = V(m<sup>3</sup>) / h (m), esta no debe ser mayor de 30 m. El caudal mínimo de irrigación debe estar comprendido entre 10 y 15 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> d.

Los parámetros más característicos de funcionamiento son:

FILTRO PERCOLADOR	MEDIA	MÁXIMA
CARGA ORGÁNICA Kg/m <sup>3</sup> d <	1	2,5
CARGA SUPERFICIAL m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h	>1	<2
RENDIMIENTOS REDUCCIÓN DBO <sub>5</sub> <	90%	70%
RENDIMIENTOS REDUCCIÓN SS <	95%	75%

En el caso de bajos caudales, por ejemplo durante la noche, y para mantener una biomasa constante se pueden hacer recirculaciones. Los rendimientos pueden ser de hasta el 90% en eliminación de DBO<sub>5</sub> y 95% en eliminación de SS. Este sistema se suele usar para poblaciones de hasta 50.000 habitantes equivalentes.

## 5.2 Biodiscos

Los biodiscos son un proceso biológico de tratamiento de aguas residuales que se caracteriza por presentar más del 95% de la biomasa activa en forma fija a un soporte. El medio soporte o biodiscos está constituido por un conjunto de placas de material plástico de diseño especial, ensambladas en un eje horizontal, formando un conjunto cilíndrico, girando lentamente sobre dicho eje, y permaneciendo un 40% de su superficie sumergida en el agua a tratar.

La película de microorganismos fijado en el material plástico alcanza concentraciones de hasta 50.000 mg/l de sólidos en suspensión, que equivale a un reactor biológico con biomasa en suspensión del orden de 15.000 mg/l. Esta elevada concentración de microorganismos permite alcanzar altas eficacias de tratamiento con tiempos de retención mínimos

Mediante el movimiento giratorio del biodiscos, la película de microorganismos alterna su contacto con el agua residual a tratar y con el oxígeno del aire. Cuando la película está en contacto con el aire absorbe oxígeno del mismo, mientras que cuando está sumergida absorbe el contenido en materia soluble a degradar.

El rozamiento de la biomasa fijada en el biodisco cuando éste se desplaza en el agua residual favorece el desprendimiento del exceso de biomasa formada, mantiene su espesor contante y evita el taponamiento del biodisco. Posteriormente precisa de una decantación para separar el efluente de los fangos desprendidos del biodisco.

El oxígeno penetra en el vertido que moja las superficies de contacto y produce una variación en la concentración de oxígeno disuelto.

La velocidad de difusión del oxígeno viene dada por la ley de Fick:

$$D N/d T = D a d C/d Z$$

Siendo:

N = número de moles de substancia transferidos.

t = tiempo (segundos).

D = coeficiente de difusión (cm<sup>2</sup>/segundos)

A = área de contacto (cm<sup>2</sup>)

C = concentración (moles/cm<sup>3</sup>)

Z = distancia en la dirección en que se produce la difusión (cm)

La aportación de oxígeno al agua se efectúa por contacto íntimo entre el aire y el agua. La capa límite mono molecular se satura y el oxígeno viaja hacia zonas más profundas.

En el caso de los biodiscos, y en el de lechos bacterianos con una carga hidráulica adecuada, al ser la capa de agua que está en movimiento sobre las superficies de muy poco espesor, alcanza valores cercanos a los de saturación.

TEMPERATURA ( ° C)	VALOR DE SATURACIÓN (gr/m3)
7	14,6
10	11,24
11	11
13	10,53
15	9,3
25	8,48

Valor saturación oxígeno en el agua f (temperatura)

El dimensionamiento de los biodiscos lo establecen las casas comerciales, sin embargo la formulación cinética del biodisco cuando se ha estabilizado el proceso de crecimiento de la biomasa nos permite obtener la superficie específica necesaria del biodisco.

$$Q S = Q S_o - R_c A$$

Siendo:

Q =Caudal medio de entrada en m<sup>3</sup>/día

S<sub>o</sub>=(SDBO<sub>5</sub>)<sub>E</sub> en entrada

S=(SDBO<sub>5</sub>)<sub>S</sub> en salida

$R_c$  = Substrato específico consumido en  $gr/m^2$  día, calculado por la expresión de Monod aplicable a aguas residuales urbanas:  $R_c = 19,4 S / (15,1 + S)$

$A$  = superficie de los biodiscos en  $m^2$ , **despejamos A** que es lo que queremos obtener.

Esta ecuación se modifica introduciendo dos factores correctores, uno de temperatura y otro del estado de aireación del agua. Es la siguiente:

$$A = Q (S_o - S) T_c P / R_c$$

Siendo:

$$T_c = 1,0537(12,7 - T)$$

Válida para  $T < 12,7$  C

Este factor corrige la disminución de actividad de las bacterias responsables de la oxidación de la materia orgánica, a bajas temperaturas, aumentando ligeramente la superficie del biodisco.

Para  $T > 12,7$  °C  $T_c = 1$

$P = 1$ , para aguas no tratadas previamente, o pretratadas aerobiamente

$P = 1,5$ , para aguas tratadas anaeróbicamente, según criterio de los suministradores de biodiscos.

Determinación de la (SDBO<sub>5</sub>)E función de la (DBO<sub>5</sub>)E

$$SDBO_5 = DBO_5 \text{ TOTAL} - DBO_5 \text{ SUSPENDIDA}$$

$$DBO_5 \text{ SUSPENDIDA} = K \text{ (sólidos en suspensión)}$$

Siendo:

$$K = 0,5 \text{ (Para vertidos urbanos con SST} > \text{ DBO}_5)$$

$$K = 0,6 \text{ (Para vertidos urbanos con SST} < \text{ DBO}_5)$$

$$\text{Para determinar la DBO}_5 \text{ efluente} = SDBO_5 + 0,5 (S.S)$$

La superficie obtenida del cálculo hay que situarla en una etapa o en dos etapas, comprobando que en la primera etapa la carga en SDBO5 no sobrepasa el valor de 24,4 gr/m<sup>2</sup>·día y en la segunda de 12,4 gr/m<sup>2</sup>·día, considerando que en la primera etapa se elimina alrededor del 60% de la (SDBO5).

### DIMENSIONAMIENTO DEL CLARIFICADOR SECUNDARIO EN BIODISCOS

Dado que en este proceso, no llega al decantador secundario un licor mezcla, sino un efluente que contiene flóculos en una concentración muy inferior, por lo que no se forma un manto de fangos significativo, siendo la velocidad ascensional el factor fundamental para el diseño.

En la tabla adjunta se fijan los parámetros de diseños aconsejados, válidos para una punta de caudal igual a 2,5 Qmed.

S.S. efluente(mg/l)	V. ascensional(m/h)	DBO5 salida(mg/l)	DBO soluble diseño (mg/l)
35	1,53	35	17,5
30	1,36	30	15
25	1,19	25	12,5
20	0,94	20	10
15	0,85	15	7,5

Las alturas cilíndricas habituales están comprendidas entre 2,5 y 3 m.

La superficie del decantador, una vez conocida la velocidad ascensional, será:

$$A = Q/V$$

Siendo:

A =superficie en planta del decantador (m<sup>2</sup>)

Q =caudal medio (m<sup>3</sup>/h)

V =velocidad ascensional (m/h), de la tabla

## CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN DE FANGOS EN BIODISCOS

Los sólidos en suspensión existentes a la entrada del biodisco son incrementados por la DBO soluble que se transforma en DBO suspendida durante el proceso de biofloculación.

$$SSe = SSi + K \cdot SDBO5$$

Siendo:

SSe = sólidos en suspensión en el efluente (mg/l)

SSi = sólidos en suspensión en el influente (mg/l)

K = constante de transformación

La constante K depende del grado de digestión aerobia al que se halla sometido el fango, lo cual está relacionado con la DBO soluble del efluente de los biodiscos.

DBO5 soluble efluente (mg/l)	K
7,5	0,08
10	0,1
12,5	0,15
15	0,2
17,5	0,3
20	0,4
25	0,5
30	0,6
40	0,8
50	0,96

La producción de fangos en el decantador se calcula según  $P_x = (Q S_{Se})/1000$

Siendo:

$P_x$  = Producción de fangos (Kg/d)

$Q$  = Caudal (m<sup>3</sup>/d)

$S_{Si}$  = sólidos en suspensión en el influente(mg/l)

$S_{Se}$  = sólidos en suspensión en el efluente (mg/l)

Los rendimientos pueden ser de hasta el 95% en eliminación de DBO5 y 95% en eliminación de SS. Este sistema se suele usar para poblaciones de hasta 50.000 habitantes equivalentes.

### 5.3 Lechos aireados sumergidos

Los lechos aireados sumergidos del inglés BAF (Biological Aereated Filter) son un tipo de reactores en los cuales la biopelícula se desarrolla sobre un soporte sumergido y sin movimiento alguno. El aire se introduce por la parte inferior, normalmente mediante difusores de membrana. Previamente se necesita una decantación primaria y un clarificador a la salida del proceso. El agua puede introducirse en el reactor por la parte inferior o a contra corriente por la parte superior.

A diferencia de los biofiltros, no requieren operación de limpieza por contralavado. El control del crecimiento de la biopelícula se consigue mediante el rozamiento y el burbujeo provocados por la aireación. Al igual que ocurre con los biodiscos o con los filtros percoladores tras un largo periodo de funcionamiento, la calidad del efluente disminuye, debido al atascamiento del lecho, o al desprendimiento de biopelícula en exceso, que debe ser eliminada mediante con aire.

Como medio soporte se emplean diversos tipos de relleno, estructurados o de elementos con formas diversas. Se suelen emplear medios plásticos con elevado porcentaje de huecos y con una superficie específica máxima del orden de varios cientos de m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>.

La combinación de unidades SAF aireadas y no aireadas permite la eliminación de nitrógeno en el efluente. Se suelen usar para aguas el tratamiento de aguas regeneradas.

Datos previos:

MLSS	3.000-3.500	ppm
CARGA ORGÁNICA	0,5-1,5	Kg DBO5/m <sup>3</sup> d
TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA (TRH)>	4-8	h
RELLENO PLÁSTICO>	100	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
RETROLAVADO CON AIRE	10-20	mn
CONSUMOS	0,5-2	Kwh/ Kg DBO5
RENDIMIENTOS REDUCCIÓN DBO5>	90%	
RENDIMIENTOS REDUCCIÓN SS>	90%	

### 5.4 Sistemas MBBR

En este tipo de proceso el relleno flota y se mueve en el licor mezcla. Se denominan MBBR de sus siglas en inglés Moving Bed Biofilm reactor. La superficie específica del elemento soporte, sometida a patente, suele ser de 750 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> y el llenado no suele ser mayor del 70%. Para la nitrificación el relleno tiene una mayor superficie específica del orden de 1.000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, el llenado está en el entorno del 50%. Hay que tener cuidado con evitar que el relleno se escape de su compartimento durante el proceso. La producción de fangos es similar a la de los fangos activos convencionales con o sin reducción de nutrientes. Necesitan altos aportes de oxígeno para mantener la agitación y una decantación posterior. Los parámetros de dimensionamiento de detallan más adelante en tabla conjunta con dimensionamiento de otros procesos apartado 6.4

## 6. OTROS PROCESOS

Otros sistemas que se están desarrollando, algunos muy implantados y otros en fase de experimentación son los siguientes:

Biofiltros del inglés BAF (Biological Aerated Filter)

Procesos híbridos. Biomasa fija con biomasa en suspensión, del inglés IFAS (Integrated Fix-film Activated Sludge).

Biorreactores con membranas

Nuevas tendencias en experimentación como pueden ser la resonancia magnética, la nanotecnología, fotocatalisis solar o la bioelectrogénesis

### 6.1 Biofiltros

Similar a los lechos bacterianos, pero con un medio soporte que además actúa como medio filtrante, y disponiendo además de una ventilación forzada. La retirada de fangos se hace mediante lavado con aire y agua, por lo que no es necesario instalar una decantación posterior, pero sí un depósito de recuperación de agua de lavado. Los decantadores primarios se deben calcular con un 25% más de incremento de caudal por el agua de lavado de los biofiltros. Es importante que la entrada de sólidos en el biofiltro sea menor de 125 ppm, sino es así habría que poner un físico-químico antes del biológico. Los materiales empleados como soporte y medio filtrante están protegidos bajo patente, Biostyr TM, Biofor DN. Puede alcanzar rendimientos hasta del 95%, tanto en eliminación de DBO5 como de SS.

### 6.2 Biomasa fija sobre lecho móvil. Procesos híbridos.

La combinación de biomasa fija sobre lecho móvil con fangos activos denominado IFAS (del inglés Integrated Fix-film Activated Sludge), combina proceso de biopelícula con biomasa en suspensión permite grandes mejoras en procesos de ampliación. Si se ponen reactores anaerobios en cabecera del proceso se favorece el relanzamiento del fósforo y su posterior eliminación en las zonas aerobias.

### 6.3 Biorreactores con membranas

Se denominan MBR de las siglas en inglés membrane biological reactor. Es una combinación de fangos activos y filtración por membranas. Es un proceso muy avanzado y el efluente permite que sea utilizado como agua terciaria. Reduce mucho el espacio al no ser necesaria la decantación secundaria y el tratamiento terciario posterior en el caso de que se quiera usar agua regenerada. Las membranas se pueden colocar sumergidas en el reactor existente o en otro anexo. El flujo a través de la membrana oscila entre 15-25 l/m<sup>2</sup>/h. Hay muchos tipos de membrana, planas, tubulares y dependiendo de la calidad final que se desee pueden ser de microfiltración o ultrafiltración. La concentración en el licor mezcla de acuerdo a los proveedores de las membranas puede llegar hasta los 15.000 ppm. En cualquier caso todavía no están bien experimentadas y en su uso para ampliación de EDAR se suele trabajar con concentraciones de no más de 10 kg/m<sup>3</sup>. Los costos energéticos son muy elevados, se necesita un tratamiento previo muy bueno y la reposición

de membranas, cada cuatro o cinco años implica un sobre coste debido a las patentes de las mismas.

### 6.4 Parámetros de funcionamiento de otros procesos

Los parámetros de dimensionamiento de estos sistemas más novedosos se resumen en la tabla siguiente, hay parámetros que se desconocen pues dependen de las patentes de las casas comerciales:

	BIOFILTROS (Biostyr, Biofor, Biopur)	MEMBRANAS (Zenon, Hyflux, Kubota)	PROCESOS HÍBRIDOS (Anoxkaldnes, Hybas)	
			MBBR	IFAS
MLSS (kg/m <sup>3</sup> )	Según relleno	5.000-10.000	Según relleno	3.000-4.000
CARGA MÁSICA Kg DBO5/kg MLSS/d	NO	< 0,1	NO	0,1- 0,2
CARGA DE DBO5 Kg DBO5/m <sup>3</sup> /d <	3	NO	Según relleno	NO
TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA (TRH) h	1-2	6-12	6-12	4-8
CARGA VOLUMÉTRICA Kg DBO5/V/d	NO	0,2-0,5	0,5-0,7	0,4-0,6
ZONA ANÓXICA* %	0-50	0-50	0-50	0-50
ZONA ANAEROBIA* %	5	5	5	5
Kg O2/ Kg DBO5 eliminada : MEDIA Y MÁXIMA	1,5-2 2,5-5	1,75-2,5 3-6	2-3 2,5-5	2-2,5 2,5-5
RENDIMIENTOS REDUCCIÓN DBO5	90 %	95 %	90 %	90 %
RENDIMIENTOS REDUCCIÓN SS	95 %	99 %	95 %	90 %

\*Puede ser en la misma cuba o en cuba independiente

### 6.5 Nuevas tendencias

Hoy en día se está experimentando a pequeña escala con novedosas tecnologías, fundamentalmente orientadas al desarrollo de tratamientos que reduzcan el consumo de energía. Entre estos procesos están:

Sistemas de resonancia magnética, utiliza la misma tecnología que la resonancia convencional mediante campos magnéticos que separan y eliminan los contaminantes del agua residual.

Sistemas bioelectrogénicos, utilizando bacterias que oxidan la materia orgánica, siendo el receptor de electrones un conductor como el grafito, almacenando energía limpia.

Utilización de nanomateriales naturales o modificados para filtración de aguas residuales.

Aplicación de técnicas de fotocatalisis solar para la desinfección y eliminación de patógenos en las aguas residuales.

## 7. COMPARATIVA ENTRE LA BIOMASA EN SUSPENSIÓN Y LA BIOMASA FIJA

A continuación se adjunta una tabla con las ventajas e inconvenientes más generales entre los sistemas de biomasa en suspensión y biomasa fija:

	BIOMASA EN SUSPENSIÓN	BIOMASA FIJA
CAPEX	MEDIO	ALTO
OPEX	ALTO	MEDIO
NECESIDADES DE ESPACIO	ALTO	BAJO*
REDUCCIÓN DE NUTRIENTES	ALTO	BAJO
FLEXIBILIDAD DEL SISTEMA	ALTA	MEDIA
CAPACIDAD FRENTE A TÓXICOS	BAJA	MEDIA

\*Lecho bacteriano alto

## **8. BIBLIOGRAFIA**

Metcalf-Eddy, 2.002: Tratamiento y Depuración de Aguas Residuales. Ed Labor, Barcelona.

Vertido y Reutilización. 3ª Edición. Mc Graw Hill, Inc.

Depuración de Aguas Residuales, Aurelio Hernández Muñoz. Colección Señor Nº 9, Servicio de Publicaciones de la E.T.S.I.C.C.P.

Manual Técnico del Agua. Degremont.

Fangos activos. Eliminación Biológica de Nutrientes. Bases teóricas de la Nitrificación y desnitrificación. Juan Antonio Cortacans Torre.

ATV. ATV Standard ATV-DVWKV-A 131 E. Dimensioning of single stage activated sludge plants. Mayo 2.000

Curso del Cedex XXXIII de Agua Residual. Varios autores. Madrid.

Parámetros de depuración en aguas residuales. José Genaro Batanero Bernabéu y Jorge Chamorro Alonso. Madrid.

DWA German Association for Water, Wastewater and Waste 2000

Activated Sludge Plants, DWA Publishing, Hennef, Germany.

Water Environment Federation Manual of Practice No. 8 (WEF 'MOP 8')

Design Of Municipal Wastewater Treatment Plants MOP 8

Water treatment solutions. Lenntech. (Holanda)

Universidad Técnica de Delft (Holanda)

G. y R. MARAIS et al. Publicaciones sobre eliminación de nutrientes. University of Cape Town.

Materiales complementarios, links de internet:

<http://www.epa.gov/>

<http://www.lenntech.es>

<http://www.epa.gov/espanol/>

<http://www.americanscientist.org>

<http://www.ibama.gov.br/search/esgoto>

<http://www.eea.europa.eu/es/themes/water>

<http://www.wastewaterengineering.com>

<http://worldwidescience.org>

[http://www.citg.tudelft.nl/no\\_cache/en/about-faculty/departments/watermanagement](http://www.citg.tudelft.nl/no_cache/en/about-faculty/departments/watermanagement)

<http://www.tudelft.nl/en/study/master-of-science/master-programmes/civil-engineering/msc-programme/tracks/watermanagement/specialisations/water-resources-management> (Universidad de Delft en Holanda)

<http://www.civil.uct.ac.za/george-ekama>

<http://www.susana.org/en/partner/details/473> CPU (Centre for Water and Sanitation Research - Cape Peninsula University of Technology en Sudáfrica)

<http://es.scribd.com/doc/69715929/0-INDICE-NORMAS-ATV-13-02-06#scribd> (Normas, estudios e informes de grupos de trabajo elaborados por la ATV Alemana)