

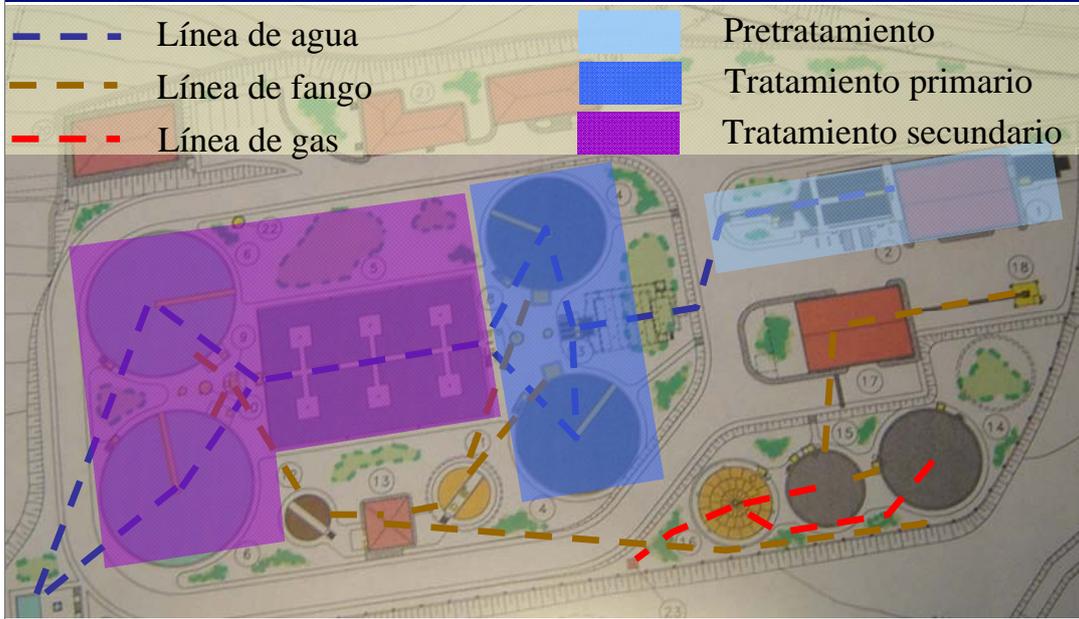


Universidad  
Carlos III de Madrid  
www.uc3m.es

Prof. Dr. D. A. Aznar Jiménez



Tratamientos secundarios de una EDARU, basado en la Estación depuradora de Linares, desarrollada por el Dr. D. Antonio Aznar, profesor de Ingeniería Química del Dpto. de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química de la Universidad Carlos III de Madrid, en colaboración con Aguas Jaén, empresa explotadora de dicha EDARU.



Como se puede observar en el esquema de la planta, esta consta de dos líneas paralelas de tratamiento de agua –línea azul- una línea de tratamiento de fangos –línea marrón- y otra de biogás –línea roja-. Los elementos mas importantes están resaltados en dicho esquema.

El pretratamiento (recuadro azul claro) consta de un aliviadero de tormentas en la obra de llegada, un pozo de gruesos, un sistema de bombeo, un sistema de rejillas automáticas, un desarenador-desengrasador y un medidor de caudal.

El tratamiento primario (recuadro azul oscuro) consta de dos decantadores.

El tratamiento secundario (recuadro violeta) está formado por un digestor aerobio con seis agitadores mecánicos y dos clarificadores.

El tratamiento de fangos consta de un espesador y una balsa de flotación, así como de un digestor anaerobio de alta carga y otro de baja carga.

La línea de biogás consta de un gasómetro de campana, una antorcha y los sistemas auxiliares de producción de energía.

Además de los sistemas principales indicados, existen otros sistemas auxiliares que no se indican en el esquema.



## •NATURALEZA

- Procesos biológicos.

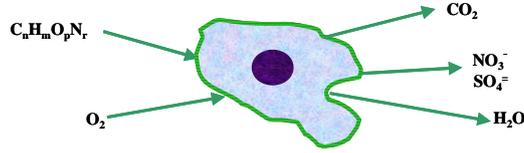
## •OBJETIVOS

- Eliminación de DBO

## •CORRIENTES QUE SEPARA

- Efluente acuoso tratado
- Fangos
- Gases combustibles (p. anaerobio) o no combustibles (p. aerobio)

El tratamiento secundario es el conjunto de operaciones, fundamentalmente de tipo biológico, cuyo principal objetivo es eliminar la materia orgánica e inorgánica biodegradable presente en el agua residual (DBO). Los procesos biológicos de depuración son una aplicación a escala industrial de los mecanismos de auto depuración de los cauces naturales, de manera que un ecosistema artificial que llamamos fango activo –constituido por micro y macroorganismos de diversos tipos- se alimenta de los contaminantes presentes en el agua.



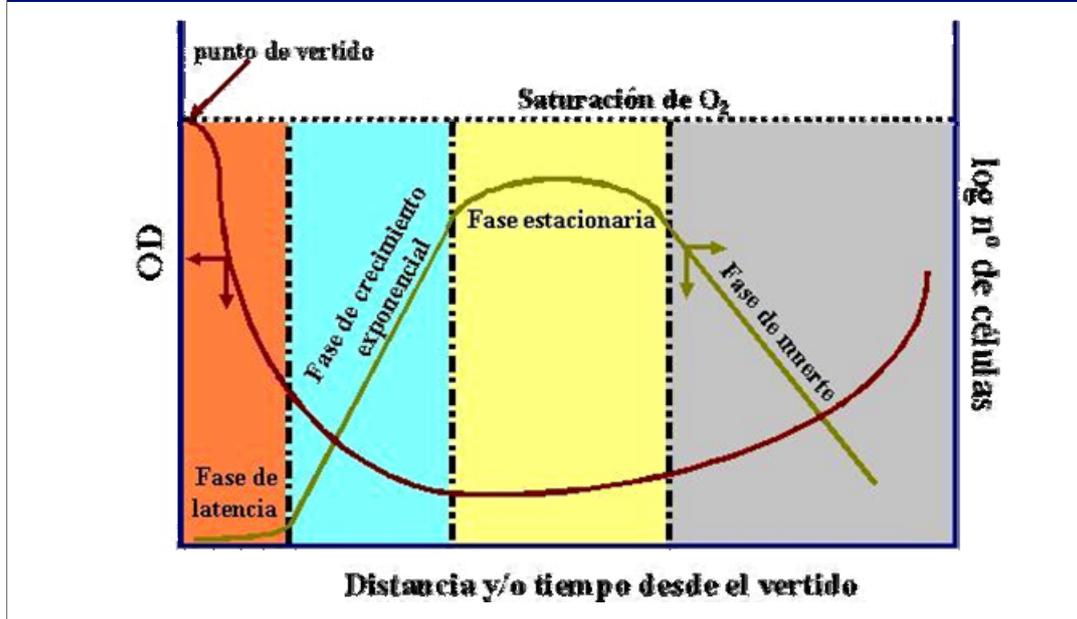
**Tabla 3.1**

		METABOLISMO BACTERIANO	
		AEROBIO	ANAEROBIO
<b>BALANCE DE CARBONO (%)</b>	Se incorpora a la biomasa	50	5
	Se desprende como gases	50	95
<b>BALANCE DE ENERGÍA (%)</b>	Endoenergía (pasa a las células)	60	6
	Exoenergía (se pierde en el medio)	40	4
	Quimioenergía (se acumula como biogás)	0	90

Los procesos biológicos de eliminación de contaminantes se basan en la asimilación de las sustancias como nutrientes a través de la pared celular, y mediante procesos de oxidación-reducción su transformación en metabolitos de bajo peso molecular, más biomasa y energía.

La característica fundamental de los tratamientos aerobios de depuración de aguas es que se realizan en presencia de oxígeno molecular (O<sub>2</sub>), lo cual provoca un medio fuertemente oxidante. La materia biodegradable presente en el agua (DBO) es asimilada por organismos –generalmente heterótrofos- los cuales mediante procesos de oxidación, la transforman en más biomasa (proceso anabólico) y metabolitos (proceso catabólico) de bajo peso molecular y alto estado de oxidación (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>=</sup> etc.), además de producir la energía necesaria para el desarrollo de los procesos biológicos de los organismos presentes en el medio.

Los procesos anaerobios se realizan en ausencia de oxígeno, empleándose como agente oxidante otras sustancias (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>=</sup>, etc.), produciendo como metabolitos compuestos en bajos estados de oxidación (ácidos húmicos, CH<sub>4</sub>, HS<sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, etc.), mas biomasa y energía.



Cuando en una masa de agua saturada en oxígeno se efectúa un vertido biodegradable en un cierto lugar y momento (ver figura 3.2), se observa que a medida que nos alejamos del punto de vertido y/o pasa el tiempo, el contenido en oxígeno disminuye, estabilizándose para un valor mínimo a partir del cual dicho contenido aumenta hasta recuperar el valor original. Esta evolución del contenido en oxígeno es debido a dos procesos contrapuestos:

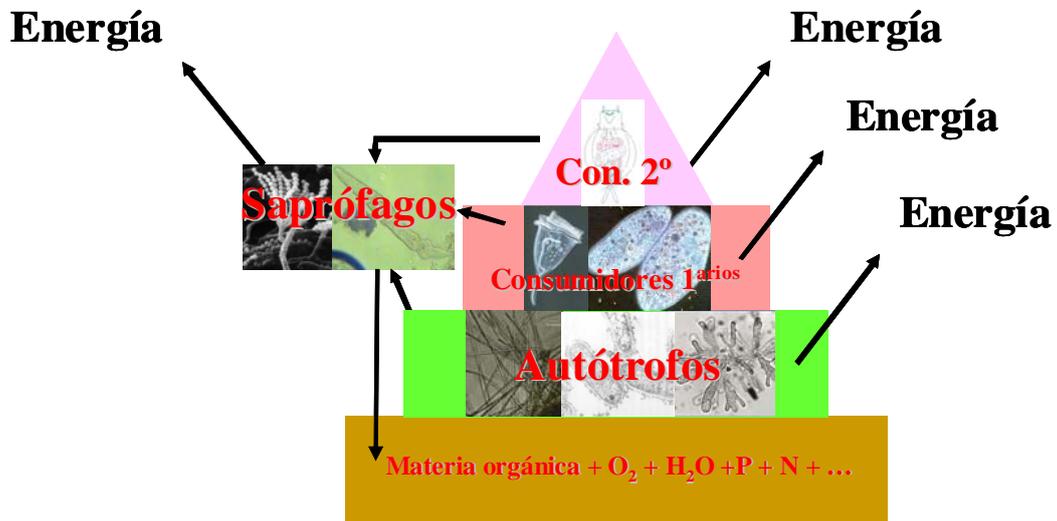
- consumo de oxígeno debido al proceso metabólico aerobio de biodegradación del vertido por los microorganismos heterótrofos presentes,
- solubilización del oxígeno atmosférico a través de la lámina de agua.

**Fase de latencia.** Es la etapa inmediatamente posterior a la adición del vertido. Se caracteriza por un crecimiento lento en el número de individuos, debido a que la actividad anabólica es escasa dado que los microorganismos presentes en el agua deben habituarse a las condiciones del vertido, y por lo tanto el consumo de oxígeno es bajo.

• **Fase de crecimiento exponencial.** Tiene preponderancia el metabolismo anabólico sobre el catabólico, lo cual provoca que aumente el contenido en biomasa del sistema.

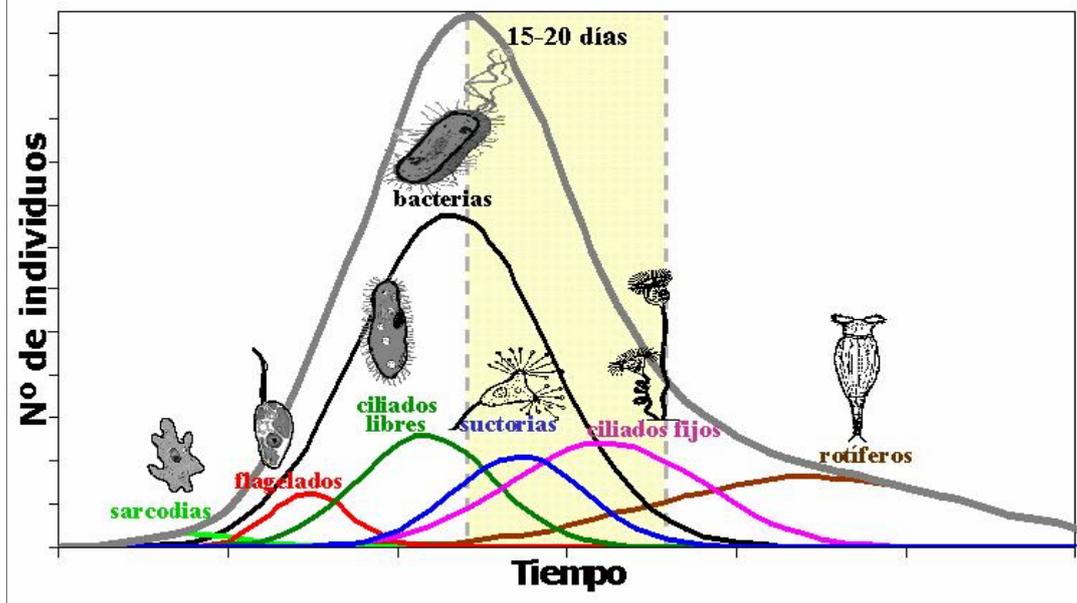
• **Fase estacionaria:** En un sistema en que no hay renovación de nutrientes, el aumento de la población de microorganismos además de depender del tiempo transcurrido, está controlado por la disponibilidad de alimento; de manera que a medida que aumenta la población de microorganismos, la cantidad de sustrato restante va disminuyendo, y con ello el crecimiento celular, motivo por el que va perdiendo importancia el metabolismo anabólico y pasando a equilibrarse con el catabólico

• **Fase de muerte o de respiración endógena:** Durante esta fase el número de nuevos individuos que se generan por metabolismo celular (ecuación 3.4) es sensiblemente inferior al de los que mueren (catabolismo). Esto provoca que haya una disminución neta de la biomasa con el tiempo



Parte de las relaciones más importantes que se establecen entre los organismos de un sistema aerobio de depuración las encontramos en la cadena trófica. En una comunidad biocenótica existen:

- especies productoras (autótrofas), que utilizando la energía solar (fotosintéticas) y las reacciones químicas (quimiosintéticas) para convertir la materia inorgánica en orgánica, y
- especies consumidoras (heterótrofas) que se alimentan de otras o de sus productos. Las especies consumidoras pueden ser: de primer orden (se alimentan de especies autótrofas), de segundo orden (se alimentan de heterótrofos de primer orden), y de tercer orden (se alimentan de heterótrofos de segundo orden), en principio podría haber especies heterótrofas de ordenes superiores, que se alimentarían de las de orden inmediatamente inferior, pero es poco corriente que la cadena se prolongue mas de cuatro o cinco eslabones
- especies descomponedoras o saprófagas -microorganismos que convierten la materia orgánica en materia inorgánica- que utilizan toda la quimioenergía residual del ecosistema y los nutrientes, con lo cual se cierra el ciclo trófico.



Cuando se somete un agua residual a un proceso de depuración aerobia, existe una evolución con el tiempo del tipo de especies y del número de individuos de cada una, de manera que se alcanza un equilibrio en cada momento entre los diversos niveles de la cadena trófica. Cuanto mayor es el tiempo que dejamos evolucionar el sistema, mayor es el número de organismos de los niveles superiores de la cadena, y con ello la cantidad de biomasa formada, de manera que la mayor parte de la materia biodegradable se transforma en metabolitos de bajo peso molecular (fangos altamente mineralizados). En amarillo está representado el intervalo de tiempos característicos para un fango biológico convencional, intervalo de tiempo en el que se alcanza un número elevado de bacterias (organismos autótrofos) encargados de la destrucción de la DBO, junto ciliados, rotíferos y suctorias (organismos heterótrofos) encargados de la eliminación de las mismas.



Aunque existe una gran diversidad de sistemas donde poder realizar los procesos de digestión aerobia, los sistemas más ampliamente instaurados en la actualidad -sobre todo para el tratamiento de aguas residuales urbanas- son los que se conocen como digestores aerobios, los cuales se basan principalmente en dos operaciones unitarias fundamentales:

- proceso de degradación aerobia de la DBO presente en el agua; operación que se efectúa en una balsa de digestión
- etapa de separación de la biomasa generalmente por sedimentación (sistemas digestor/decantador) o por filtración (reactores de biomembrana, MBR).

En función del régimen hidráulico de la balsa de digestión los sistemas se pueden dividir en: sistemas discontinuos de mezcla perfecta, de flujo pistón y continuos de mezcla perfecta.



## •Sistemas basados:

- **contacto con microorganismos**
  - ✓ **soportados**
  - ✓ **en dispersión**
- **con o sin aireación**

## •Sistemas

- **tratamiento efluentes de alta carga o gran volumen**
- **complejos**
- **alto coste.**

Los sistemas de depuración biológica aerobia se basan en el uso de microorganismos aerobios, generalmente mesófilos (12-38°C), que pueden encontrarse como biomasa :

- soportada en algún tipo de substrato natural (piedra triturada, carbón activo, ...) o sintético (plástico, cerámico, ...)
- en suspensión permaneciendo mezclado con el agua mediante algún sistema de aireación.

Los sistemas aerobios de lodos activos suelen necesitar un aporte forzado de oxígeno, para mantener las condiciones aerobias.

Son sistemas de alta eficiencia, por lo cual están indicados para el tratamiento de efluentes de alta carga o gran volumen. Tienen el inconveniente de ser sistemas técnicamente complejos y de alto coste de tanto de instalación como de mantenimiento.



- **Filtros percoladores**



- **Reactor biológico rotativo de contacto (CBR)**



- **Biofiltración**



Los sistemas de biomasa soportada más utilizados son:

- Los filtros percoladores
- Los reactores biológicos rotativos de contacto
- Los reactores de nitrificación de lecho fijo



**Lecho filtrante (turba, piedra volcánica, soportes poliméricos, ...)**

**Contacto con microorganismos soportados**

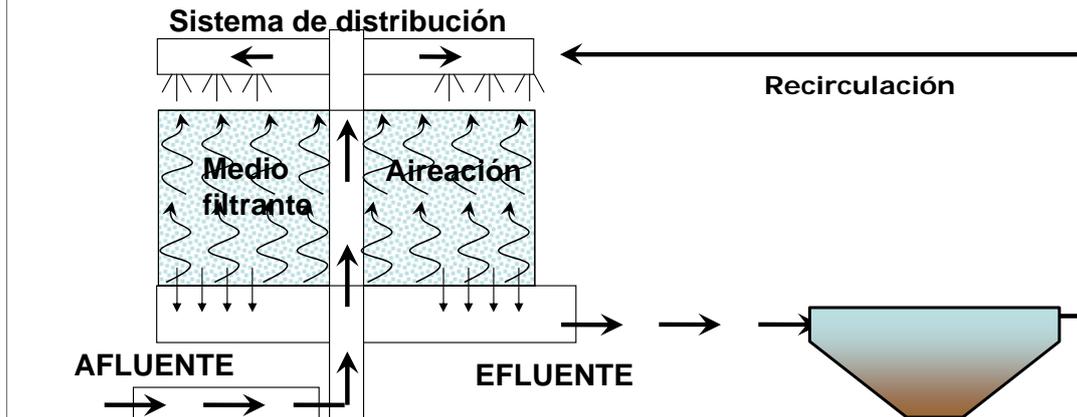


Los filtros percoladores son sistemas de lodos activos donde los microorganismos se encuentran soportados en un medio material natural (turba, puzolana, grava machacada, ...) o sintético (polimérico, escorias, ...).

Consisten generalmente en grandes depósitos cuyo interior se rellena del material filtrante, de manera que el agua a depurar se alimenta por la parte superior del sistema repartiéndola de manera homogénea por la superficie del filtro, y recogándose en la parte inferior. El relleno del filtro percolador suele ser de un material irregular para evitar su apelmazamiento y favorecer con ello la circulación del agua a tratar por toda la masa filtrante.

La biomasa queda adherida al soporte gracias la producción de sustancias poliméricas extracelulares (EPS) de origen microbiano que favorecen la incorporación de nuevas células al biofilm formado.

- Se hace pasar el agua residual a través de un lecho que soporta el fango adherido
- La aireación es por ventilación natural, o excepcionalmente forzada, normalmente en contracorriente
- Conforme el biofilm madura se dan procesos de desprendimiento
- Es necesaria una sedimentación secundaria para la separación de sólidos



Es necesario un proceso de sedimentación primaria para prevenir la rápida colmatación del filtro. La profundidad media del lecho es de unos 2 metros en el caso de rellenos naturales (mayor densidad) y de hasta 8 metros para rellenos poliméricos. Es necesaria la recirculación del efluente para diluir el influente incrementando la eficacia y favoreciendo la autolimpieza permanente por desprendimiento del biofilm formado (sloughing-off), es por ello que es necesario un proceso de sedimentación secundaria para separación de los sólidos sólidos.



$Q_{\text{diseño}} = 2,5 \text{ m}^3/\text{d}$ $F_c = 0,9$	$Q_{\text{rec}} = (0,5 \text{ a } 4) Q_{\text{diseño}}$ $[\text{DBO}_5]_{\text{afuente}} < 400 \text{ mg/L}$	$H_{\text{útil}} = 1,5 -$ $k_T = 1,035$
$W_{\text{DBO}} \text{ (kg/día)} =$	$W_{\text{DBO}} = Q_{\text{diseño}} \cdot [\text{DBO}_5]_{\text{afuente}} \cdot \frac{24}{1000}$	
$n^{\circ} \text{ pasos}_{\text{mat org}} =$	$n^{\circ} \text{ pasos}_{\text{mat org}} = \frac{\left(1 + \frac{Q_{\text{rec}}}{Q_{\text{diseño}}}\right)}{\left(1 + \left(1 - F_c\right)\left(\frac{Q_{\text{rec}}}{Q_{\text{diseño}}}\right)\right)^2}$	
$V_{\text{relleno}} \text{ (m}^3\text{)} =$	$V_{\text{relleno}} = \left(\frac{W_{\text{DBO}}/0,4536}{n^{\circ} \text{ pasos}_{\text{mat org}}}\right) \left(\frac{0,0085}{100 \left(\frac{[\text{DBO}_5]_{\text{afuente}} - [\text{DBO}_5]_{\text{efluente}}}{[\text{DBO}_5]_{\text{afuente}}}\right) 100 - 1}\right)^2 \cdot \frac{(43560)}{(3,2808^2)} \cdot \frac{1}{k_T^{1-20}}$	
$S_{\text{útil}} \text{ (m}^2\text{)} =$	$S_{\text{útil}} = \frac{V_{\text{relleno}}}{H_{\text{útil}}}$	
$\text{Re } c_{\text{min}} \text{ (m}^3/\text{h)} =$	$\text{Re } c_{\text{min}} = \frac{(C_H - C'_H) S_{\text{útil}} \cdot 3600}{1000}$	



$Q_{\text{diseño}}$        $C_H > 0,5 \text{ L/m}^2 \cdot \text{s}$        $H_{\text{útil}} > 4 \text{ m}$        $[\text{DBO}_5]_{\text{afluente}} < 400 \text{ mg/L}$   
 $[\text{DBO}_5]_{\text{efluente}}$        $k_T = 1,035$        $k_{c\ 20} = 0,11-0,25 \text{ (L/s)}^n/\text{m}^2$        $n = 0,5$

$$k_{20} \text{ (L/s)}^n/\text{m}^2 = k_{c20} \cdot \left( \frac{6,1}{H_{\text{útil}}} \right)^{0,5} \cdot \left( \frac{150}{[\text{DBO}_5]_{\text{afluente}}} \right)^{0,5}$$

$$C_H \text{ (0,5 L/m}^2 \cdot \text{s)} = C'_H = \left( \frac{(k_{20}/2,727)(k_T)^{T-20} \cdot H_{\text{útil}}^{3,28}}{\ln([\text{DBO}_5]_{\text{afluente}}/[\text{DBO}_5]_{\text{efluente}})} \right)^{1/n} \cdot 0,6778$$

$$S_{\text{útil}} \text{ (m}^2\text{)} = S_{\text{útil}} = \frac{Q_{\text{diseño}} \cdot 1000}{C'_H \cdot 3600}$$

$$V_{\text{relleno}} \text{ (m}^3\text{)} = V_{\text{relleno}} = S_{\text{útil}} \cdot H_{\text{útil}}$$

$$\text{Rec}_{\text{min}} \text{ (m}^3/\text{h)} = \text{Re } c_{\text{min}} = \frac{(C_H - C'_H) S_{\text{útil}} \cdot 3600}{1000}$$



Son una serie de discos de plástico ( $\varnothing \sim 1,5-3$  m), montados por la parte central sobre un eje con separación entre discos de 20-25 mm, que se encuentra dentro de un tanque cilíndrico o baño. El 40% del área superficial total de los biodiscos se encuentra sumergida.

Los microorganismos crecen en estos discos y se ponen en contacto con el sustrato al momento en el que el disco gira (1-4 rpm) y se sumerge en el tanque del agua residual. Así mismo, el oxígeno lo obtienen cuando esa parte del disco se encuentra fuera del agua.



Conjunto de discos de plástico (1,5-3 m de diámetro) unidos axialmente por un eje en torno al cual rotan (1 - 4 rpm), parcialmente sumergidos en un tanque (más del 40% sumergido en el agua a tratar). Los discos están fabricados de material corugado sobre el que se adhiere el fango exponiéndose alternativamente al agua residual y al oxígeno del aire. En algunos casos se introducen elementos que favorezcan la agitación y el proceso de atrapar el aire.

Se da un proceso de desprendimiento natural del biofilm, por lo que debe existir una etapa de decantación secundaria.



**El soporte es granular o corrugado**

**Se dan dos procesos en el mismo reactor:**

- **Degradación biológica de contaminantes**
- **Filtración física de materias en suspensión**

**Es necesario realizar periódicos lavados**



Reactores biológicos en los que la biomasa está adherida a un soporte y no en suspensión

El soporte es granular o corrugado de naturaleza mineral o polimérica.

Se dan dos procesos en el mismo reactor:

- **Degradación biológica de contaminantes**
- **Filtración física de materias en suspensión**

Es necesario realizar periódicos lavados para eliminar el exceso de biofilm (cada 24 – 48 h) formado no siendo necesario un proceso de decantación secundaria.

## •Con microorganismos en suspensión



Los digestores son balsas donde permanecen en contacto el agua a tratar con los microorganismos (fango) encargados de destruir la materia orgánica biodegradable soluble (DBO) presente en la misma.

La alimentación del reactor se efectúa mediante el aporte del agua a tratar –que contiene el alimento de los microorganismos en forma de DBO- y el de biomasa proveniente de la recirculación. En los digestores aerobios es necesario un aporte forzado de oxígeno para garantizar un ambiente rico en el mismo que facilite el proceso de oxidación de la DBO a  $\text{CO}_2$ , agua, nitratos y otros compuestos simples en alto estado de oxidación.

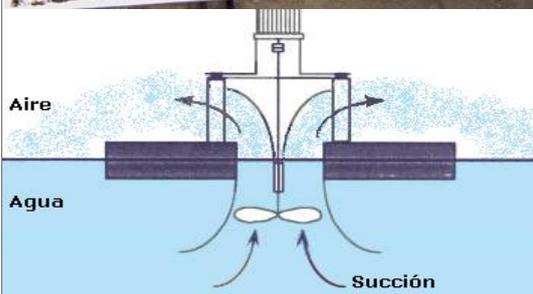
A la salida del digestor tenemos el agua tratada – casi exenta de DBO- junto con el fango activo, por lo cual es imprescindible separarlos, proceso que se realiza generalmente mediante decantación. El fango separado en el decantador secundario, es recirculado como alimentación del digestor, sangrandose una parte del mismo que se denomina fango en exceso y que constituye parte del material a tratar en la línea de fangos, si existe la misma.

Los sistemas de lodos activos mediante digestores están especialmente indicados para el tratamiento de grandes caudales con contenidos medios en DBO (200-400 mg/L).

En general los sistemas de digestores son reactores perfectamente agitados de manera que la biomasa debe mantenerse en suspensión para facilitar el contacto agua/microorganismos. Este proceso de suspensión se realiza de manera mecánica (agitadores), neumática (aireadores) o mixta.



de eje vertical

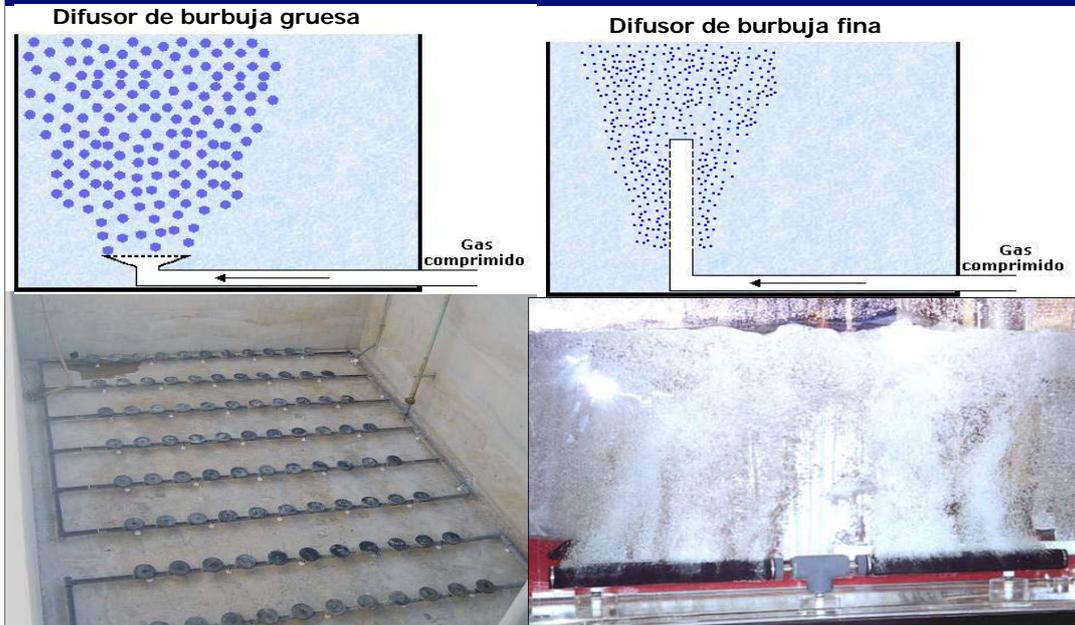


de eje horizontal



Los agitadores son sistemas mecánicos que mantienen el fango en suspensión gracias a la turbulencia que crean en la balsa del digestor. Pueden ser de eje vertical o de eje horizontal. El primer tipo es el más comúnmente empleado en reactores perfectamente agitados, mientras que el segundo se emplea, sobre todo, en los de flujo pistón.

Además de para mantener la biomasa en suspensión, los agitadores suelen diseñarse de manera que faciliten el contacto aire/agua y con ello la aireación del sistema y las condiciones aerobias requeridas.

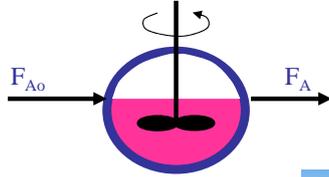


Al igual que los agitadores mecánicos, los sistemas neumáticos de tienen la doble función de mantener la biomasa en suspensión y de aportar el oxígeno suficiente para mantener condiciones aerobias en el medio.

Normalmente estos sistemas utilizan compresores que utilizan aire atmosférico, excepcionalmente emplean oxígeno puro dado su mayor precio.

La geometría de los difusores sumergidos en la balsa es muy diversa (discos, tubos, domos, platos, ...). En función del tipo de burbuja producido pueden ser

- De burbuja fina: suelen ser materiales porosos tanto cerámicos como poliméricos.
- De burbuja gruesa: normalmente son elementos con perforaciones.
- Sistemas de aire disuelto: se mezcla el agua y el aire a alta presión, obteniendo con ello una mejor disolución del mismo e inyectándose posteriormente la disolución en la balsa, donde sufre un proceso brusco de descompresión que provoca la insolubilización del aire y la creación de un gran número de burbujas de muy pequeño tamaño.



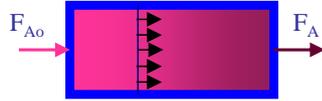
$$\tau \text{ (s)} = \frac{V_{\text{Reactor}} \text{ (m}^3\text{)}}{Q \text{ (m}^3\text{/s)}}$$

$$F_A = F_{\text{reactor}}$$



Un reactor continuo de mezcla perfecta es aquel cuyas propiedades son iguales en toda la masa de reacción y coinciden con las de la mezcla de reacción a la salida del mismo ( $F_A$ ). Actúan como balsa de homogeneización, de manera que las condiciones en el mismo son bastante estables en el tiempo, pudiendo asumir tanto puntas de carga como fluctuaciones de caudal.

El tiempo de reacción es el cociente entre el volumen útil del reactor y el caudal de alimentación ( $\tau = V/Q$ ).



$$\tau \text{ (s)} = \frac{V_{\text{Reactor}} \text{ (m}^3\text{)}}{Q \text{ (m}^3\text{/s)}}$$

$$F_A = f(\text{distancia})$$



Un reactor de flujo pistón es aquel cuyas propiedades varían en función de la posición. Son sistemas que pueden trabajar con bajas cargas.

El tiempo de reacción es el cociente entre el volumen útil del reactor y el caudal de alimentación.

Consisten en una balsa de gran longitud, en la que se introduce el afluente por un extremo, recogándose el efluente por el contrario, de forma que a medida que la corriente avanza espacialmente, también lo hace la reacción temporalmente, de forma que existe una correlación entre la coordenada espacial y la temporal definida como tiempo espacial. El tiempo espacial es  $\tau = V/Q$ .



- TEMPERATURA 12-38 °C (zona mesofílica)**
- pH 6,2-8,5**
- Relación de nutrientes**
  - ✓  $DBO_5/DQO > 0,4$
  - ✓  $DBO_5/N_{total} < 20$
  - ✓  $DBO_5/P_{total} < 100$
- Concentración de fangos activados (MLSSv)**
- Carga másica (kg  $DBO_5$ /kgMLSSv · d)**
- Consumo de oxígeno; 1,5-4,0 kg  $O_2$ /kg  $DBO_{ult}$**
- Edad del fango: 3-15 días**
- Caudal recirculación de fangos**

La temperatura del sistema de digestión suele estar comprendida entre los 12 y los 38 °C (zona mesofílica). Cuando las temperaturas de los digestores pueden alcanzar valores inferiores a este límite, se suele cubrir los digestores y dotarlos de sistema de calentamiento del agua.

El pH está comprendido entre 6,2 y 8,5, fuera de este intervalo la actividad de las bacterias aerobias es bastante baja.

La alimentación que se aporta (contaminantes) a la biomasa debe ser equilibrada de manera que debe cumplir unos requisitos mínimos en lo que se refiere a la relación de nutrientes, siendo los más importantes:  $DBO_5/DQO > 0,4$ ,  $DBO_5/N_{total} < 20$  y  $DBO_5/P_{total} < 100$

La concentración de fangos activados (MLSS) en el digestor es una variable importante, pues cuanto mayor sea este valor más rápido es el proceso. Sin embargo no se pueden superar unos ciertos límites (3000-4000mg/L) pues presenta problemas de explotación (bulking, sedimentabilidad, etc.)

Muy relacionada con la variable anterior está la carga másica (F/M (kg  $DBO_5$ /kgMLSS·d)) que debe mantenerse dentro de ciertos límites, pues sino se rompe el equilibrio de la cadena trófica.

Al ser un sistema aerobio existe un consumo de oxígeno (1,5-4,0 kg  $O_2$ /kg  $DBO_{ult}$ ) que viene dado por las necesidades de oxidación del contaminante a eliminar, así como por la tasa de transferencia desde las burbujas al agua.

La edad del fango ( $\theta$  (3-15 días)) viene dada por el tiempo de permanencia del mismo en el sistema. Cuanto mayor sea mayor será el grado de mineralización y menor el volumen de fangos producidos por unidad de  $DBO$  eliminada. Para obtener mayores



	<b>VENTAJAS</b>	<b>INCONVENIENTES</b>
Lecho bacteriano y disco biológico	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ bajo consumo de energía;</li> <li>✓ funcionamiento sencillo que necesita menos mantenimiento y control que la técnica de lodos activados;</li> <li>✓ buena decantabilidad de los lodos;</li> <li>✓ menos sensible a las variaciones de carga y a los tóxicos que en la técnica de los lodos activados;</li> <li>✓ generalmente adaptados para las pequeñas colectividades;</li> <li>✓ resistencia al frío (los discos están siempre protegidos por cubiertas o por un pequeño edificio).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ rendimiento inferior que en la técnica por lodos activados, debido en gran parte a las normas antiguas de diseño. Un dimensionado más realista debe permitir alcanzar una calidad de agua tratada satisfactoria;</li> <li>✓ costes de inversión bastante elevados (pueden ser aproximadamente 20% superior a la técnica de un lodo activado);</li> <li>✓ necesidad de pretratamientos eficaces;</li> <li>✓ sensible al atasco;</li> <li>✓ obras de tamaño importante si se imponen los objetivos de eliminación del nitrógeno.</li> </ul>
Lodo activado	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ adaptado para cualquier tamaño de colectividad (excepto las muy pequeñas);</li> <li>✓ buena eliminación del conjunto de los parámetros de contaminación (MES, DQO, DBO<sub>5</sub>, N mediante nitrificación y desnitrificación);</li> <li>✓ adaptado para la protección de medios receptores sensibles;</li> <li>✓ lodos ligeramente estabilizados;</li> <li>✓ facilidad de implantación de una desfosfatación simultánea</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ costes de inversión bastante importantes;</li> <li>✓ consumo energético importante;</li> <li>✓ necesidad de personal cualificado y de vigilancia regular;</li> <li>✓ sensibilidad a las sobrecargas hidráulicas;</li> <li>✓ decantabilidad de los lodos que no siempre es fácil de dominar;</li> <li>✓ fuerte producción de lodos que hay que concentrar.</li> </ul>



El tanque de digestión posee varios agitadores con objeto de que modificando el número de ellos que está en funcionamiento y la velocidad de cada uno se pueda controlar tanto el grado de mezcla (siempre debe estar asegurado) como el nivel de aireación.



El rotor del tanque de digestión produce la turbulencia necesaria para mantener la biomasa en suspensión y el contacto aire-agua para que la aireación sea correcta. El digestor se comporta como un tanque de mezcla perfecta.



Universidad  
Carlos III de Madrid  
www.uc3m.es

## FANGOS ACTIVOS: DESAGÜE DEL DIGESTOR

Prof. Dr. D. A. Aznar Jiménez



Desagüe tratamiento biológico. Mezcla de agua tratada y fango biológico.



Universidad  
Carlos III de Madrid  
www.uc3m.es

## DECANTADOR SECUNDARIO: VISTA GENERAL

Prof. Dr. D. A. Aznar Jiménez



Decantador secundario circular. Se puede observar en la superficie una capa de fangos flotantes, característica que los diferencia de los decantadores primarios. También es de destacar los chorros de agua dirigidos hacia la superficie con objeto de romper las espumas superficiales y mejorar la decantabilidad del fango.



Las rasquetas de flotantes tienen por objeto impulsar los fangos flotantes hasta el sumidero, de donde son llevadas a un pozo de flotantes donde son impulsadas hasta la balsa de flotación. Los decantadores secundarios presentan muchos más problemas de espumas que los primarios favorecidos por la formación de burbujas de gas por la respiración de la biomasa de los fangos.



Universidad  
Carlos III de Madrid  
www.uc3m.es

## DECANTADOR SECUNDARIO: RASQUETAS DE SUPERFICIE

Prof. Dr. D. A. Aznar Jiménez



Rasquetas de flotantes del decantador secundario.



Desagüe del decantador secundario.



Universidad  
Carlos III de Madrid  
www.uc3m.es

## DECANTADOR SECUNDARIO: SUMIDERO DE FLOTANTES

Prof. Dr. D. A. Aznar Jiménez



Sumidero de flotantes del decantador secundario.



Universidad  
Carlos III de Madrid  
www.uc3m.es

## DESAGÜE DEL TRATAMIENTO SECUNDARIO

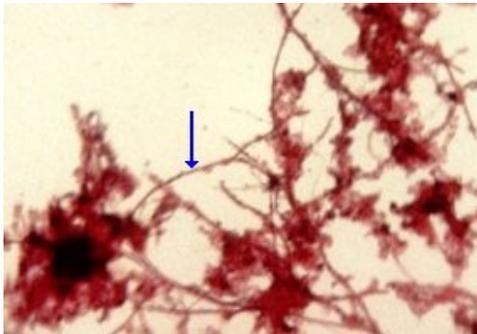
Prof. Dr. D. A. Aznar Jiménez



Desagüe de la planta de tratamiento.



**BULKING:** exceso organismos filamentosos Ss 30' > 200 mg/L



**Causas:** relación alimento/microorganismos (F/M), oscilaciones de carga, déficit de oxígeno, déficit nutrientes, pH bajos, etc.

**Soluciones:** H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>, aireación, ajuste nutrientes, disminuir tasa de recirculación, rediseño, etc.

Los procesos de decantación de fangos biológicos suelen presentar problemas de fangos voluminosos o "bulking", provocados por un crecimiento elevado de bacterias filamentosas que hacen que el floculo formado sea poco denso y decante mal, por lo que se elimina junto con el agua aumentando con ello la DBO residual del agua evacuada y disminuyendo la eficiencia del proceso de depuración biológica.

Se considera que un licor de mezcla de un digestor tiene problemas de bulking cuando el ensayo de sólidos Imhoff de sedimentables a 30 minutos da un volumen de fangos superior a 200 mg/L.

Las causas principales de bulking son la incorrecta relación F/M, pues al ser las bacterias filamentosas menos exigentes con las condiciones de alimentación, proliferan mejor cuando hay deficit de alimento. Lo mismo pasa cuando hay problemas de oscilaciones en la carga másica o en el caudal al afectar más a otros tipos de bacterias y microorganismos que a las filamentosas al poder adsorber mejor los nutrientes del medio a través de los filamentos que las que carecen de estos. Por causas similares bajos niveles de parámetros como la concentración de oxígeno u otros nutrientes también favorece la proliferación de filamentosas y con ello la aparición de bulking.

El problema de bulking se puede solucionar a corto plazo mediante el empleo de desinfectantes (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>, etc.), a medio plazo reajustando las tasas de aireación, nutrientes, recirculación, etc. y a largo plazo rediseñando el sistema resolviendo las causas de los problemas.



**FOAMING: exceso organismos filamentosos flotantes**



**Causas:** presencia de surfactantes, grandes volúmenes de gases, atrapamiento de espumas, etc.

**Soluciones:** cloración, aspersión superficial, eliminar zonas de atrapamiento, no recirculación de espumas, sustituir aire por oxígeno, etc.

Otro de los problemas más comunes de explotación de una instalación de fangos activos es el de generación de espumas o "foaming". Está muy relacionado con el bulking pues ambos implican una proliferación anormal de bacterias filamentosas, aunque en el caso del foaming es necesario que exista un atrapamiento de burbujas de gas que facilite la formación de la espuma.

Una de las causas de este atrapamiento de espumas es la presencia de elevadas dosis de surfactantes, en su mayor parte provenientes de los detergentes, el uso de grandes volúmenes de gas como en los procesos de desnitrificación, o un diseño incorrecto que favorezca el atrapamiento de las espumas en zonas muertas del decantador.

La solución de los fenómenos de foaming son en parte comunes a las de bulking (empleo de desinfectantes) además de la disminución del caudal de gases empleado (sustitución de aire por oxígeno) o sistemas de aspersión que rompan las espumas.



SISTEMAS DE DIGESTORES MAS COMUNES Y PARAMETROS DE EXPLOTACION DE LOS MISMOS.									
PROCESO	Modelo de flujo	Sistema de aireación	Eficiencia eliminación DBO (%)	T (d)	Cm (kg DBO <sub>5</sub> /kg MLSSV)	MLSS (mg/l)	$\tau=V/Q$ (h)	R/Q	Observaciones
Convencional	FP	D, AM	85-95	5-15	0,2-0,4	1500-3000	4-8	0,25-0,75	Agua residual urbana de baja carga. Sensible a cargas punta.
Reactor de mezcla completa	MP	D, AM	85-95	5-15	0,2-0,6	2500-4000	3-5	0,25-1,0	Aplicaciones generales. Admite cargas punta. "Bulking"
Aireación graduada	FP	D, AM	85-95	5-15	0,3-0,8	2000-3000	4-8	0,5-1,0	Modificación del proceso convencional. Aeración diferencial a lo largo del canal.
Aireación con alimentación escalonada	FP	D	85-95	5-15	0,2-0,4	2000-3500	3-5	0,25-0,75	Modificación del proceso convencional. Alimentación en diversas partes del canal para obtener un valor de Cm constante. Gran versatilidad.
Contacto y estabilización	FP	D, AM	80-90	5-15	0,2-0,6	4000-10000	3-6	0,5-1,5	Modificación del proceso convencional, en el que la longitud del canal de tratamiento es menor del necesario para estabilizar el fango, de forma que este se separa del agua tratada y se somete a un proceso posterior de estabilización. Utilizado para la ampliación de plantas.
Aireación prolongada	FP	D, AM	75-95	20-30	0,05-0,15	3000-6000	18-36	0,5-1,5	Modificación del proceso convencional. Indicado para bajas cargas orgánicas. Pequeñas depuradoras. Muy flexible.
Aireación de alta carga	MP	AM	75-90	5-10	0,4-1,5	4000-10000	2-4	1,0-5,0	Modificación del proceso de mezcla completa. Importante buena homogeneización.
Sistema de oxígeno puro	MP	AM	85-95	3-10	0,25-1,0	2000-5000	1-3	0,25-0,5	Modificación del proceso de mezcla completa, en el que la aeración se efectúa mediante oxígeno utilizando reactores en serie cubiertos, se recicla el exceso de oxígeno. Indicada con espacio restringido. Resiste cargas másicas elevadas.
Canal de oxidación	FP	AM	75-95	10-30	0,05-0,30	3000-6000	8-36	0,75-1,5	Modificación del proceso convencional en el que el canal es circular u ovalado, con aeración mecánica y velocidades de circulación de 0,24-0,35 m/s. Proceso flexible.
Reactor de flujo discontinuo secuencial	I	D	85-95	—	0,05-0,30	1500-5000	12-50	—	Modificación del proceso de mezcla completa, en el que el mismo tanque se emplea secuencialmente para las diversas etapas del tratamiento digestión-sedimentación. Permite la eliminación del N y P.
Deep-Shaft	FP	D	85-95	—	0,5-5	—	—	0,5-5	Modificación del proceso convencional, en que el flujo es descendente-ascendente (pozo profundo (100-150 m)).
Nitrificación de etapa única	FP	D, AM	85-95	8-20	0,10-0,25	2000-3500	6-15	0,5-1,5	Se elimina el amoníaco junto con la materia hidrocarbonada en la misma operación.
Nitrificación en etapas separadas	FP ó I	D, AM	85-95	15-100	0,05-0,20	2000-3500	3-6	0,5-2,0	El amoníaco se elimina en una etapa posterior a la de digestión de la DBO. Indicado cuando existen compuestos inhibidores.
MBR	MP	D	90-97	15-100	0,015-0,3	5000-15000	1,5-8	—	Modificación del proceso de mezcla completa. La separación biomasa-agua tratada se efectúa mediante ultra o microfiltración.

MP = Mezcla perfecta, FP = Flujo pistón, I = Intermitente, D = Difusores, AM = Aireadores mecánicos

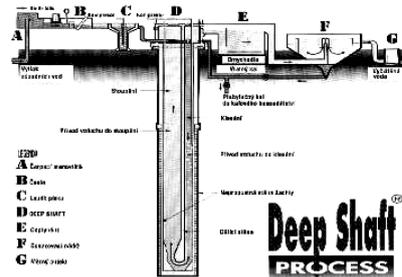
Otros tratamientos utilizados en la depuración biológica aerobia de aguas residuales.



Aireación prolongada



Canal de oxidación



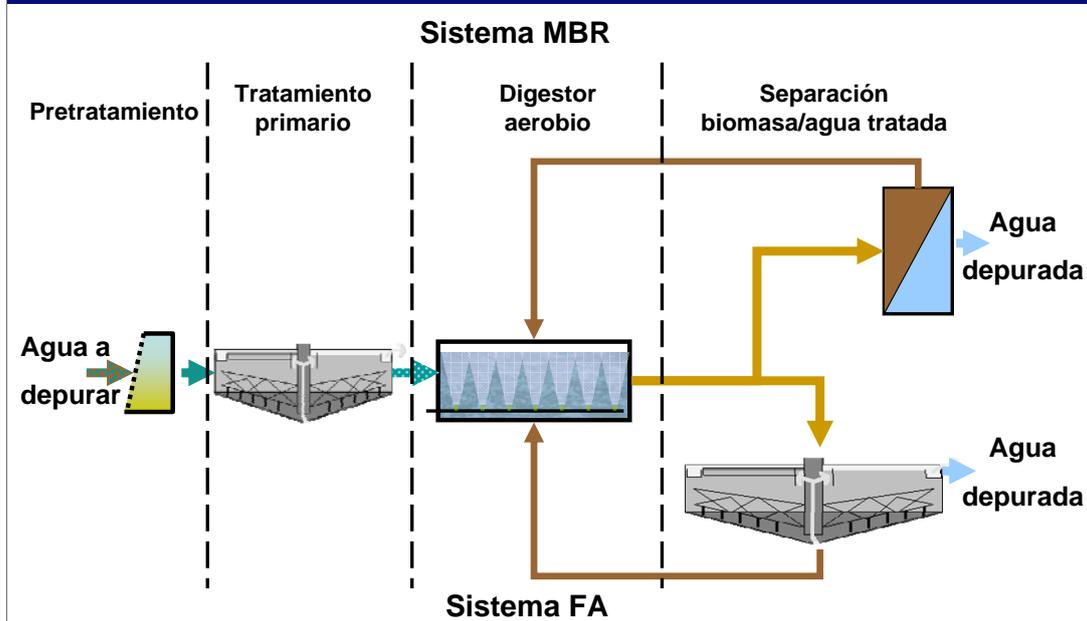
Deep-Shaft

**Aireación prolongada:** Se suele trabajar con relaciones F/M pequeñas y mayores tiempos de residencia, consiguiendo mayores rendimiento en la degradación de materia orgánica. Al ser altas las edades del fango la generación de fangos en exceso es pequeña. Es interesante su utilización, además, cuando se pretendan eliminar compuestos con nitrógeno simultáneamente con la materia orgánica.

**Reactores discontinuos secuenciales (SBR):** Todas las operaciones (aireación y sedimentación) se llevan a cabo en el mismo equipo, incluyendo una etapa de llenado y terminando con la evacuación del agua tratada. Es una opción muy válida para situaciones en las que se dispone de poco espacio, como ocurre en muchas industrias. Son versátiles en cuanto a las condiciones de operación.

**Canal de oxidación:** Modificación del proceso convencional de flujo pistón en el que el canal es circular u ovalado, con aeración mecánica y velocidades de circulación de 0,24-0,35 m/s. Proceso flexible que puede eliminar eficientemente N y P al poder crear zonas anóxicas.

**Deep-Shaft:** Modificación del proceso convencional de flujo pistón, en el que el flujo es descendente-ascendente (pozo profundo (100-150 m) aumentando la solubilidad del oxígeno y con ello la capacidad oxidante al aumentar la presión por la altura de la columna de agua. Es una sistema de desarrollo a escala preindustrial.



Los biorreactores de membranas (MBR) son una variante de los sistemas de depuración de aguas mediante fangos activos (FA) en que la separación biomasa / agua tratada se efectúa por filtración en vez de por decantación.

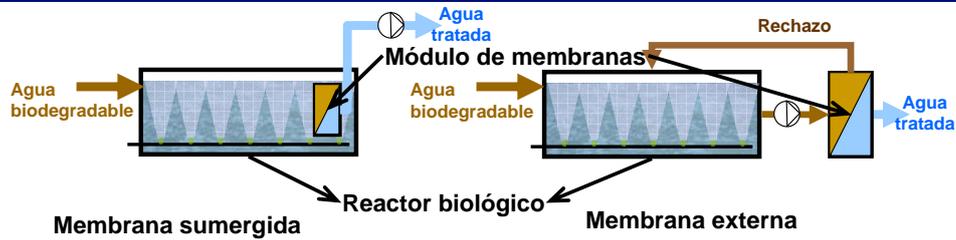
La tecnología MBR permite el tratamiento de aguas con altos contenidos en materia orgánica biodegradable y/o grandes caudales, estando indicada –entre otros usos- para pequeñas y medianas industrias del sector alimentario o de la industria química, con necesidades de depuración de aguas biodegradables.

Permite una reutilización del agua de proceso, disminuyendo con ello las necesidades de captación de la misma y por lo tanto los costes económicos, sociales y medioambientales inherentes a este proceso. Al obtener agua de mayor calidad y un volumen de fangos muy inferior que en los procesos FA, incide en que la empresa sea medioambientalmente más sostenible.



**Tabla 2.** Análisis comparativo de las ventajas e inconvenientes de los sistemas de birreactores de membrana frente a los de fangos activos

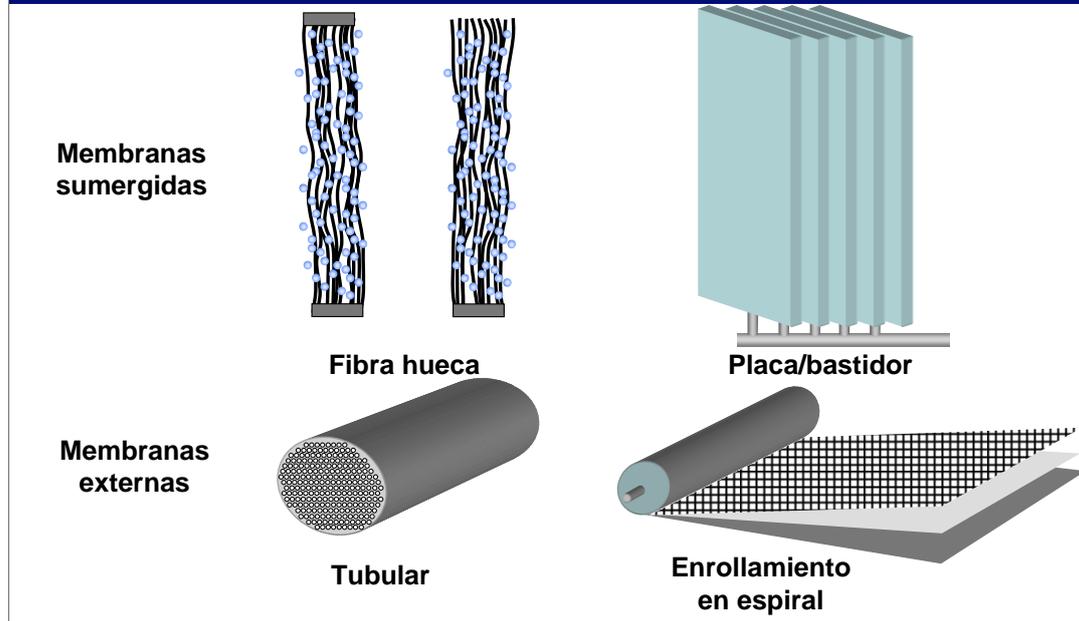
VENTAJAS	INCONVENIENTES
Mayor capacidad de tratamiento de agua para el mismo tamaño de instalación (2-5 veces).	Inversión inicial elevada.
Baja necesidad de espacio. Fácil implementación en procesos de fabricación ya existentes.	Consumos energéticos altos.
Menor producción de fango por metro cúbico de agua tratada ( $\approx 50\%$ ).	Requiere mayores trabajos de operación y mantenimiento (limpiezas).
Mayor calidad del agua depurada. Posible reutilización directa como agua de riego o para recarga de acuíferos (ausencia E.Coli y huevos de helmintos).	Vida útil y precio de las membranas de recambio.
Rápida depuración de aguas biodegradables, pudiendo incorporarse la eliminación de nitrógeno y fósforo de forma sencilla (mayor edad del fango).	Aumento de las necesidades de control de operación de la planta.
Sistemas muy robustos que pueden incorporarse al proceso productivo en muy poco tiempo y sin grandes necesidades de obra.	Aumento de la complejidad de las operaciones de funcionamiento de la planta.
Alta estabilidad del sistema durante su funcionamiento. Fácil automatización del proceso.	Dependencia tecnológica del proveedor



**Tabla 1.** Análisis comparativo de las ventajas e inconvenientes de los sistemas de membrana externa frente a los de membrana sumergida

MEMBRANA SUMERGIDA	MEMBRANA EXTERNA
Costes de bombeo reducidos	Costes de bombeo elevados (60-80%)
Costes de aireación elevados (90%)	Costes de aireación reducidos (20%)
Baja presión negativa transmembrana (0,05-0,5 bar)	Alta presión positiva transmembrana (0,5-5 bar)
Flujo operación reducidos (10-60 L/m <sup>2</sup> .h)	Flujo operación elevados (40-120 L/m <sup>2</sup> .h)
Limpieza poco frecuente	Limpieza frecuente
Menores costes de operación	Mayores costes de operación
Inversión inicial mayor	Inversión inicial menor
Concentración MLSS media (10-15 g/L)	Concentración MLSS alta (15-30 g/L)
Menor consumo energético (0,2-0,8 KWh/m <sup>3</sup> )	Mayor consumo energético (2-10 KWh/m <sup>3</sup> )

Basado en Gander, et al. 2000 y Stepenson, et al. 2000



De fibra hueca: formados por haces de fibras tubulares de alma hueca y de pequeño diámetro ( $<3$  mm) y gran longitud (hasta 2 metros). El material de las fibras es de tipo polimérico hidrófilo con tamaños de poro de  $0,04 - 0,5 \mu\text{m}$ . Los haces están formados por manojos de fibras que se reúnen en conjuntos de hasta varios miles, encapsulando uno o los dos extremos del haz en resina y procediéndose a succionar desde el interior (filtrado out-in). Es el tipo de módulo más compacto ( $1.000-10.000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ), pero la presencia de tal cantidad de fibras hace que sea más propenso al ensuciamiento. Las presiones de succión son de entre  $0,2$  y  $0,4$  bares, el consumo energético de aproximadamente  $0,8 \text{ Kwh}/\text{m}^3$ , y la concentración de sólidos  $10-12 \text{ kg MSSL}/\text{m}^3$ .

Placa/bastidor: las membranas se agrupan en módulos de placas planas, normalmente rectangulares dispuestas una al lado de otra en unidades individuales conectadas con el sistema de succión, siendo un sistema de filtración out-in. Están constituidas por polímeros hidrófilos de tamaño de poro de  $0,1-2 \mu\text{m}$ . Son fácilmente desmontables, pero disponen de una baja densidad de compactado ( $100-400 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ). No suelen presentar grandes problemas de ensuciamiento. Las presiones de succión son de entre  $0,2$  y  $0,4$  bares, el consumo energético de aproximadamente  $0,5 \text{ Kwh}/\text{m}^3$ , y la concentración de sólidos  $12-14 \text{ kg MSSL}/\text{m}^3$ .

Tubular: son módulos cilíndricos de  $10$  a  $20$  cm de diámetro y hasta  $3$  m de largo, de naturaleza cerámica, en cuyo interior se disponen las membranas poliméricas o cerámicas y de forma cilíndrica de diámetro hasta  $25,4$  mm y tamaño de poro de  $0,1-2 \mu\text{m}$ . Son muy poco compactos pero muy robustos, y pueden soportar flujos de gran velocidad, pero disponen de una muy baja densidad de compactado ( $20-30 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ). Toleran aguas con altos niveles de sólidos y se limpian mecánicamente con facilidad. Las presiones de filtración son de entre  $2,5$  y  $3,0$  bares, el consumo energético de aproximadamente  $0,9-3,5 \text{ Kwh}/\text{m}^3$ , y la concentración de sólidos  $15-30 \text{ kg MSSL}/\text{m}^3$ .

Enrollamiento en espiral: Se basan en un envoltorio de dos membranas enrolladas en espiral, separadas entre sí por el colector de permeado formando un cilindro. Son módulos muy compactos ( $700-1.000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ), pero el espaciador provoca que sean más susceptibles a la obstrucción.