

**UNIVERSIDAD DE ALMERÍA**

Escuela Politécnica Superior y Facultad de Ciencias  
Experimentales



*Departamento de Ingeniería*

*Área de Ingeniería Química*

# **Diseño de un reactor biológico de fangos activos**

Trabajo Fin de Grado Ciencias Ambientales

Julio 2014

**Alumna: Nuria Jiménez Torres**

**Director: Pedro A. González Moreno**



# ÍNDICE

1. Objetivos (p.3)
2. Antecedentes bibliográficos (p.4)
3. Resultados y discusión (p.20)
4. Conclusiones (p.35)
5. Bibliografía (p.37)

# 1. OBJETIVOS

Con la redacción de este trabajo se pretende:

- Conocer el diseño y funcionamiento de una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR).
- Conocer el diagrama de flujo de las líneas de aguas y lodos.
- Conocer el diseño de un reactor biológico y aplicarlo a un nivel básico.
- Calcular el volumen y los tiempos de retención hidráulico y celular.
- Comparar los datos reales de funcionamiento del sistema de fangos activos de la EDAR El Bobar con los datos calculados.

## 2. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

### ▪ ¿Qué es una EDAR?

Una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR), es una instalación en la que las aguas que proceden de las redes de alcantarillado de los núcleos de población, se someten a un tratamiento cuya finalidad es reducir sus niveles de contaminación hasta alcanzar unos límites aceptables y legales previamente establecidos.

Por regla general, tras este tratamiento, el agua tratada se devuelve al medio, por ejemplo como ocurre con las aguas depuradas de la EDAR El Bobar.

Una EDAR la podemos entender como un lugar al que llega una materia prima; que serían por ejemplo, las aguas residuales domésticas procedentes del sistema de pluviales, y del que sale un producto, que sería el agua tratada, y otros subproductos como fangos y gases.

A grandes rasgos, en estas estaciones depuradoras el tratamiento consiste en separar los diferentes productos y sustancias contaminantes que lleva el agua, ya sea en suspensión o en disolución.

Al depurar las aguas residuales, se persiguen una serie de objetivos:

- Proteger el Medio Ambiente gracias a la reducción de la contaminación de las aguas tratadas.
- Ahorrar energía con un sistema adecuado de depuración.
- Aprovechar los subproductos que se obtienen tras el tratamiento de las aguas contaminadas.



*Imagen 1: Vista aérea EDAR El Bobar, (Almería).*

- **Caracterización de las aguas residuales**

Las aguas residuales, especialmente las de origen urbano, están constituidas por una mezcla muy compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos y por una elevada cantidad de microorganismos. Debido a esta elevada complejidad en cuanto a su composición, no resulta práctico caracterizarlas con un análisis químico y biológico exhaustivo, por lo que se recurre a la utilización de unos parámetros empíricos que permiten cuantificar la carga contaminante del agua residual.

Estos parámetros se agrupan en dos grupos:

**Parámetros para la determinación de materia orgánica o biológica de un agua**

- ***DBO<sub>5</sub> (Demanda Bioquímica de Oxígeno)***

Cuantifica el oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de los sustratos orgánicos durante cinco días. Proporciona información sobre la materia orgánica biodegradable que contiene el agua residual.

$$DBO_5 \text{ (mg/L)} = \frac{DO_1 - DO_2}{v}$$

DO<sub>1</sub>: oxígeno disuelto al principio del ensayo

DO<sub>2</sub>: oxígeno disuelto después de 5 días de incubación a 20°C

- ***DQO (Demanda Química de Oxígeno, mg/L)***

Proporciona información sobre la materia total (orgánica e inorgánica) que puede oxidarse en unas determinadas condiciones.

**Parámetros para la determinación de los sólidos contenidos en el agua residual**

- ***Sólidos totales (ST)***

Es la masa del residuo que queda tras un proceso de evaporación y secado a 104°C. Una parte de estos sólidos está disuelta (sólidos disueltos totales, SDT) mientras que otra se encuentra en suspensión.

- ***Sólidos en suspensión totales (SST)***

Incluye la materia sedimentable así como los sólidos que debido a su pequeño tamaño o a la existencia de fuerzas electrostáticas no sedimentan. Se determinan mediante filtración del agua.

Se cumple que: ST= SDT + SST

➤ **Sólidos en suspensión volátiles (SSV)**

No todos los sólidos en suspensión son biodegradables, ya que una parte puede corresponder a sustancias inorgánicas. Los sólidos en suspensión biodegradables son los SSV, ya que se determinan mediante un proceso de calcinación a 500- 550 °C. El término SSV se suele usar para determinar el contenido en biomasa de un determinado agua.

▪ **Etapas de tratamiento en una EDAR**

El tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que tienen el fin de eliminar los contaminantes presentes en el agua. El objetivo es poder producir agua limpia o reutilizable en el ambiente y un residuo sólido (fango).

Como ya se ha mencionado, las aguas residuales urbanas se caracterizan porque su principal contaminante es materia orgánica biodegradable y en su tratamiento se pueden distinguir cuatro fases, aunque en el caso de la EDAR El Bobar, no se realiza el tratamiento terciario.

A continuación se muestran de manera esquemática todas las etapas de tratamiento que se pueden dar en una EDAR, (figura 1):

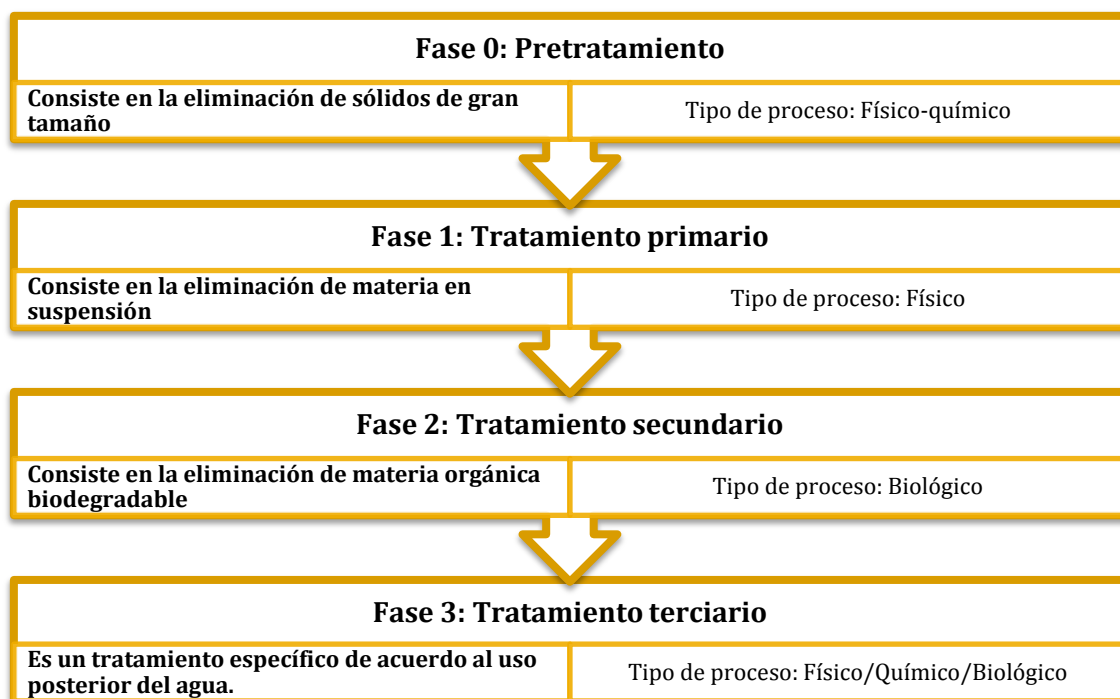


Figura 1: Etapas de tratamiento de una EDAR

En la imagen 2, se reflejan los tratamientos mencionados en la figura 1:



Imagen 2: Esquema de una EDAR

- **Clasificación de los tipos de procesos biológicos que se aplican a la depuración de aguas**

Los tratamientos biológicos podemos clasificarlos atendiendo a dos criterios: según el tipo de proceso y según el tipo de metabolismo que utilizan los microorganismos para degradar la materia orgánica.

Según el tipo de proceso:

➤ **Procesos de cultivo en suspensión**

En este tipo de proceso, los microorganismos que degradarán la materia orgánica, se mantienen en suspensión dentro del líquido. Según el tipo de instalación usada, los más utilizados en estaciones depuradoras son:

- Lagunas aireadas y lagunas de estabilización.
- Proceso de fangos activos.
- Digestor anaerobio.

Las lagunas aireadas y las facultativas son instalaciones de bajo coste y de ingeniería sencilla, pero mucho menos eficaces que el proceso de fangos activos y la digestión anaerobia de los lodos.





***Imagen 3: Ejemplo de lagunas facultativas en Ginebra,(Colombia). La flecha azul indica pequeñas lagunas con algunas mejoras que están en fase de prueba. La flecha roja indica la laguna facultativa a tamaño real.***



***Imagen 4: Ejemplo de digester anaerobio.***

➤ **Procesos de cultivo fijo**

En estos procesos, los microorganismos están fijados a un medio inerte, como por ejemplo, plásticos diseñados especialmente para cumplir con esta función.

Es el caso por ejemplo de la depuración mediante biodiscos: Es un sistema formado por un árbol en el cual se insertan discos de propileno. Este árbol gira muy lentamente, haciendo que los discos se vayan sumergiendo parcialmente en una cuba por donde circula el agua residual que se quiere depurar.

El contacto entre el agua residual y los discos, favorece que se forme flora bacteriana sobre ellos, y esta, al ir sumergiéndose alternativamente en el agua, va recogiendo la materia orgánica que necesita para su desarrollo y nutrición, para luego ponerse en contacto con el aire.

Una vez que la capa de flora bacteriana agota su ciclo vital, se separa de manera autónoma de la superficie de los discos en forma de flóculos que son fácilmente sedimentables.



*Imagen 5: Ejemplo de cultivo fijo: biodiscos. Vista exterior e interior*

Según el tipo de metabolismo de los microorganismos:

➤ **Procesos aerobios**

Son procesos que se dan en presencia de oxígeno (entre 1,5-2,0 mg O<sub>2</sub>/L), ya que los microorganismos que actúan en la conversión lo necesitan para su metabolismo. El más común en la depuración de aguas residuales es el proceso de fangos activos.

➤ **Procesos anaerobios**

Son procesos que se dan en ausencia de oxígeno (con valores muy por debajo de 0,1 mg O<sub>2</sub>/L). Este tipo de microorganismos no necesitan oxígeno para su metabolismo. Un ejemplo de este tipo de procesos es la digestión anaerobia de fangos.

### ➤ **Procesos anóxicos**

En este proceso, los microorganismos que actúan en la conversión de la materia orgánica metabolizan el nitrógeno de los nitratos en nitrógeno gas, en ausencia de oxígeno. Las principales vías bioquímicas que emplean estos microorganismos no son anaerobias, sino modificaciones de las vías aerobias.

Existen algunos microorganismos denominados facultativos, que pueden actuar en presencia y en ausencia de oxígeno.

Todos los procesos biológicos que se utilizan en la depuración de aguas residuales, tienen su origen en fenómenos y procesos que se dan en la naturaleza. La diferencia es, que en una estación depuradora, los procesos se aceleran mediante sistemas denominados reactores biológicos o biorreactores.

### ▪ **Línea de aguas y fangos en las EDAR**

Dentro del esquema general básico de funcionamiento de una EDAR, se distinguen dos líneas: **línea de aguas** y **línea de fangos**.

### ➤ **Línea de aguas**

En esta parte, el agua residual se somete a una serie de procesos físicos y biológicos para eliminar la carga contaminante que contiene.

En esta línea de tratamiento, hay dos factores que deben de tenerse en cuenta:

-La **carga contaminante del agua a tratar**. Pues según su composición y cantidad, los tratamientos aplicables serán unos u otros.

-La cantidad de **contaminación que se desea o debe de eliminarse**.

Se pueden distinguir las siguientes fases en la línea de aguas:

### **Pretratamiento**

Comprende el conjunto de elementos (estáticos o dinámicos) mediante los cuales se elimina toda la materia (flotante, arenas, gravas..), que debido a su naturaleza o tamaño pueden originar problemas en los tratamientos posteriores. Los procesos pertenecientes a esta fase son: desbaste, tamizado, desarenado y desengrasado.

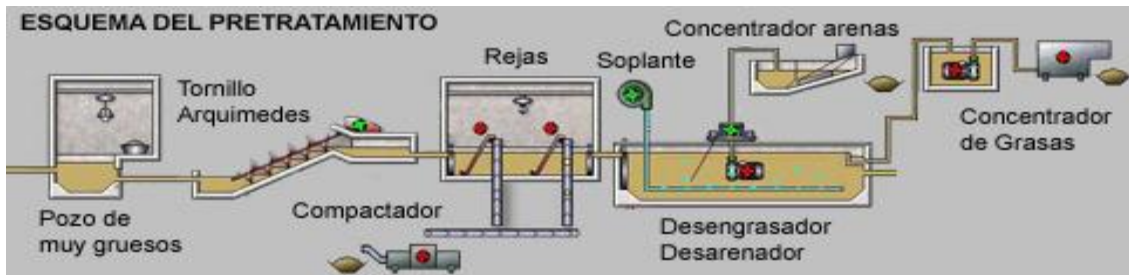


Imagen 6: Esquema de la fase de pretratamiento de una EDAR. (Línea de aguas).

### Tratamiento primario

Tiene como objetivo la separación por medios físicos de las partículas en suspensión que no hayan podido ser retenidas en la fase de pretratamiento. Esta fase es muy poco efectiva en cuanto a eliminación de materia orgánica se refiere. Los procesos pertenecientes a esta fase son: sedimentación primaria, flotación, coagulación-floculación<sup>1\*</sup>, neutralización y homogeneización.

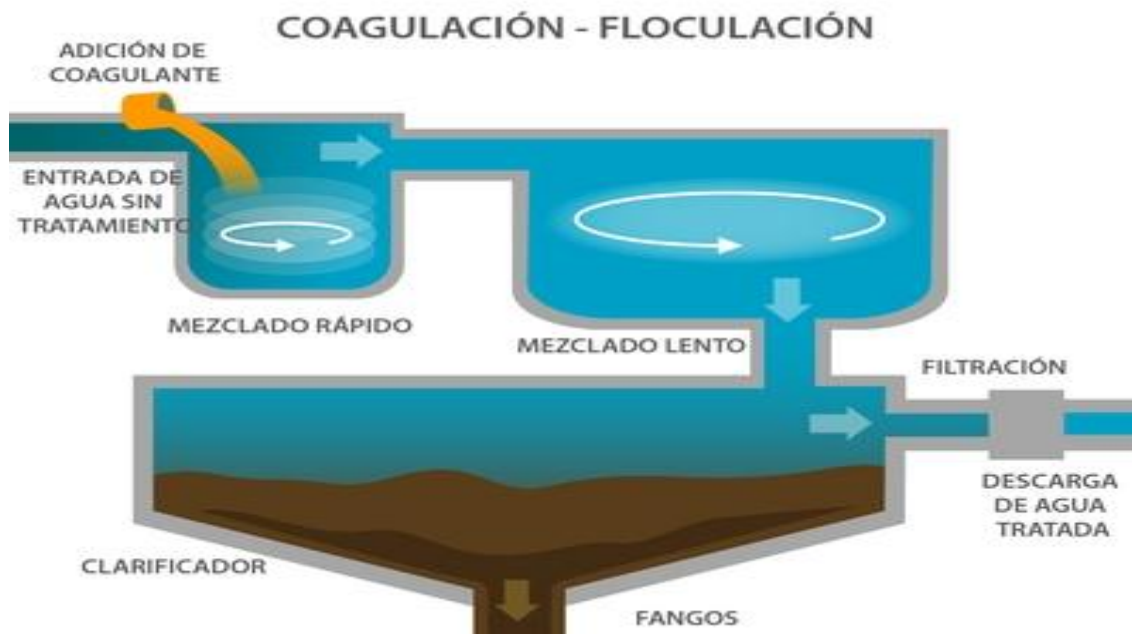
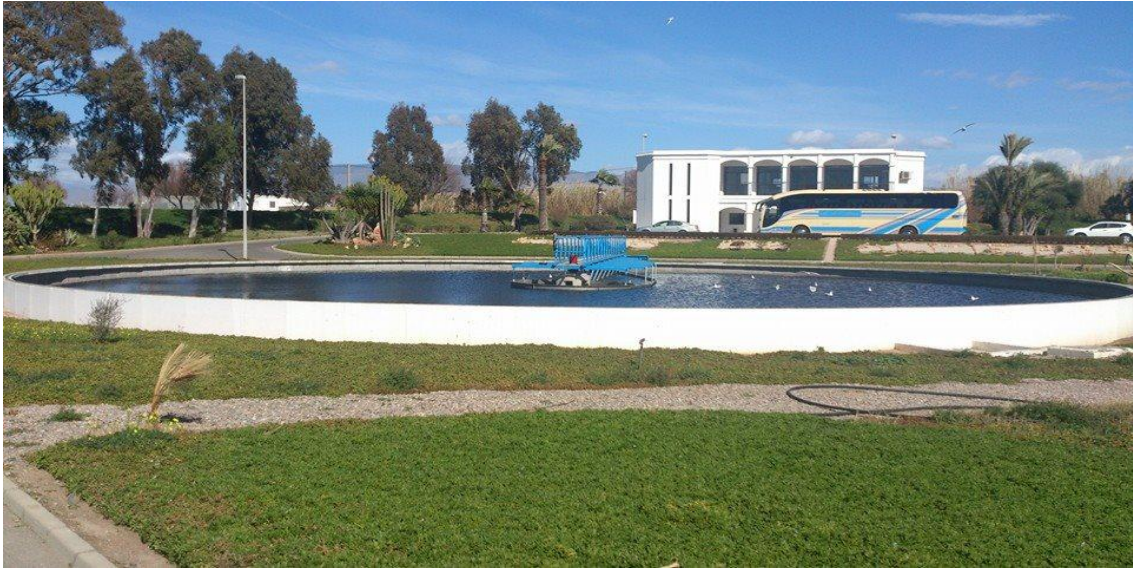


Imagen 7: Ilustración del proceso de coagulación-floculación

<sup>1</sup> \* La coagulación-floculación consiste en añadir sustancias como el hidróxido de hierro, que induzcan la floculación de forma que se favorezca la sedimentación de partículas sólidas, macromoléculas y coloides presentes en el agua.



*Imagen 8: Ejemplo de sedimentador en la EDAR El Bobar, Almería*

### **Tratamiento secundario**

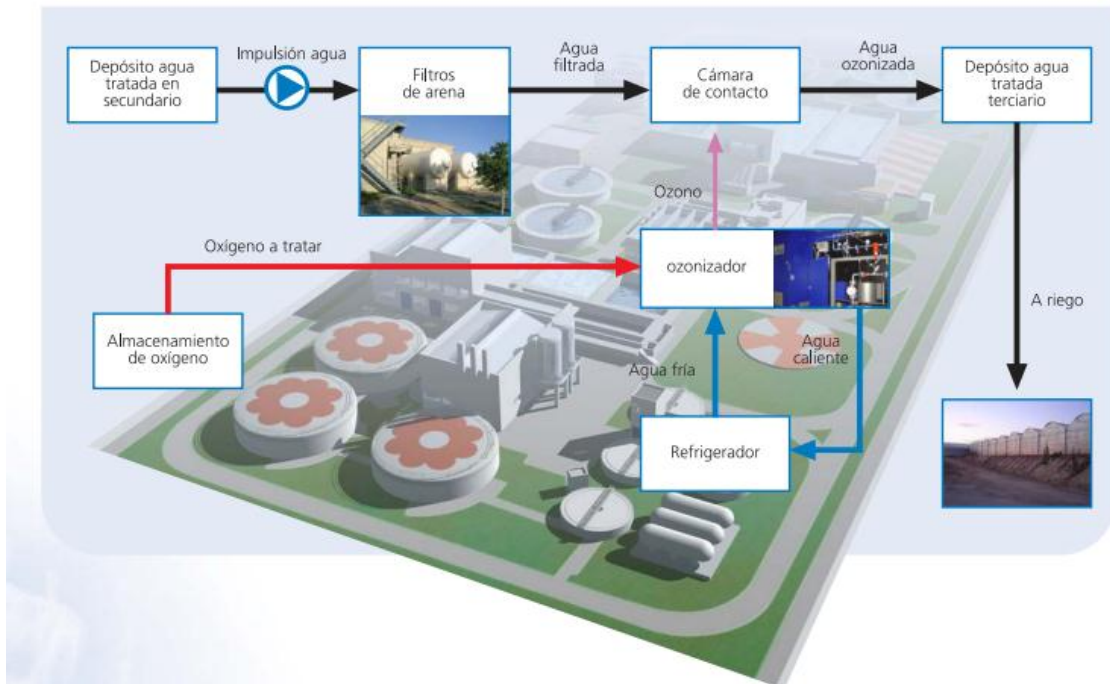
La función de esta fase es la eliminación o reducción de la contaminación orgánica presente en el agua por acción de microorganismos que la transforman en sólidos sedimentables que puedan separarse fácilmente.



*Imagen 9: Reactor biológico en EDAR EL Bobar, Almería.*

## Tratamiento terciario

En esta fase tienen lugar una serie de tratamientos complementarios que permiten obtener mejores rendimientos en la eliminación de materia en suspensión, así como reducir otros contaminantes como nutrientes y metales que no se eliminan con los tratamientos biológicos convencionales. Entre los tratamientos avanzados podemos destacar: eliminación de nutrientes (N y P), eliminación de compuestos nitrogenados...etc.

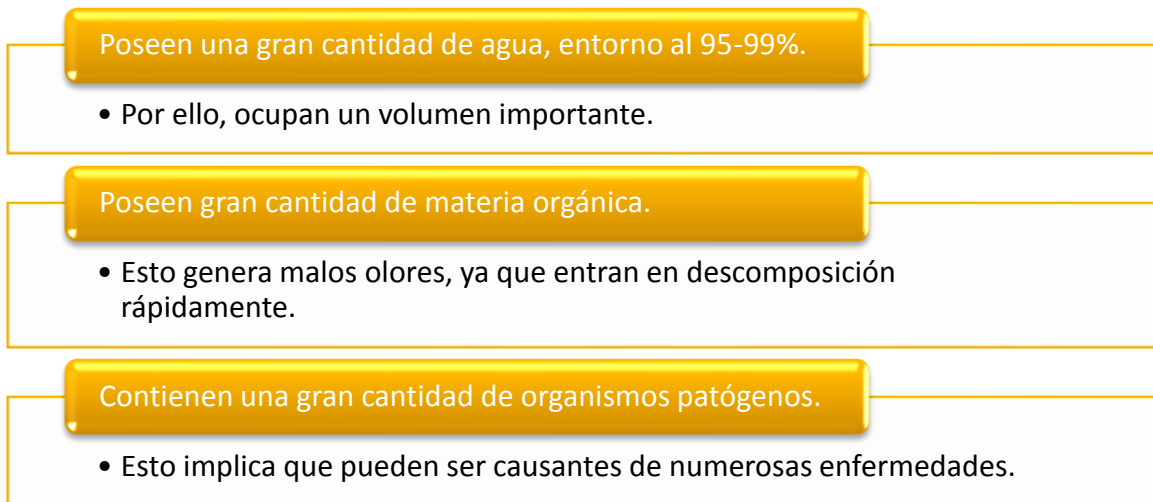


*Imagen 10 : Esquema del tratamiento terciario de una EDAR*

### ▪ Línea de fangos

Al tratar de eliminar la contaminación del agua, se generan una serie de subproductos llamados fangos, en los cuales se concentra toda esa contaminación eliminada del agua y cuyo tratamiento y eliminación puede ser complicado.

Los dos principales focos de producción de fangos son el tratamiento primario y el tratamiento secundario. Estos fangos producidos presentan las siguientes características:



*Figura 2: Principales características de los fangos de una EDAR*

En el tratamiento de estos fangos deben darse tres fases que vayan dirigidas a reducir lo máximo estos problemas mencionados:

### **Espesamiento**

Con este proceso se busca la reducción del agua presente en los fangos para evitar el manejo de grandes volúmenes. Gracias a esto, además de reducir el volumen de los tanques que contendrán los fangos posteriormente, también se reduce la cantidad de calor que se necesita para procesos como la digestión anaerobia, con lo cual se ahorra dinero y energía.



*Imagen 11: Ejemplo de espesador de fangos*

## **Digestión de la materia orgánica**

Este proceso sirve para evitar problemas de fermentación y putrefacción de la materia orgánica. Los procesos de estabilización o digestión de fangos más comunes son: digestión aerobia, digestión anaerobia, estabilización por cal y compostaje.



*Imagen 12: Ejemplo de digester de fangos en la EDAR El Bobar, Almería*

## **Deshidratación**

Consiste en la eliminación de la mayor cantidad de agua posible, mediante un medio físico, de manera que estos fangos resulten manejables y transportables.



*Imagen 13: Ejemplo de un tipo de deshidratador de fangos*



Estos fangos se generan de forma continua y su eliminación supone un problema de gran importancia ya que no debe hacerse de forma incontrolada. No se puede concebir la idea de retirar la contaminación de un medio como el agua, para luego trasladarla a otro medio como el suelo o el aire.

Existen diversas alternativas. Descargar los fangos en un vertedero, tiene un objetivo explícito de simple eliminación de este subproducto, mientras que si se usan con fines agrícolas se persigue un fin de recuperación. Otras alternativas como la incineración, pueden entenderse en ambos sentidos, según se diseñe con intención de recuperación energética o no.

A continuación se exponen ambas líneas (fango y agua) en conjunto en su funcionamiento en una EDAR típica (Imagen 14) y el diagrama de flujo de la EDAR el Bobar (imagen 15):

## ESQUEMA DE TRATAMIENTO

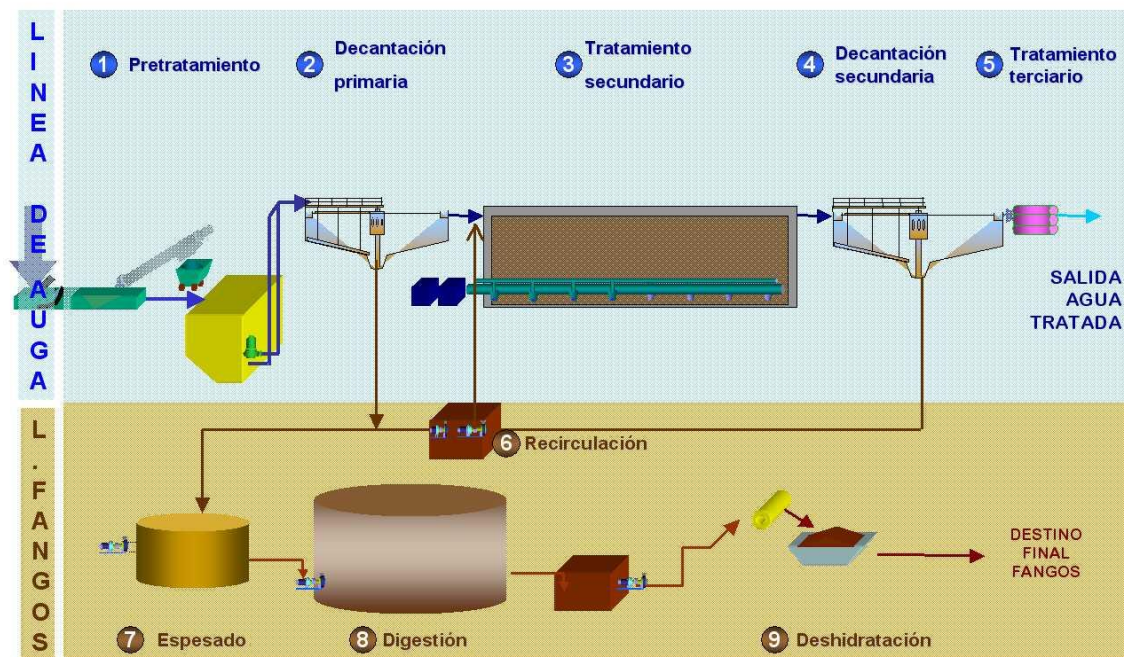


Imagen 14: Líneas de fango y agua de una EDAR convencional

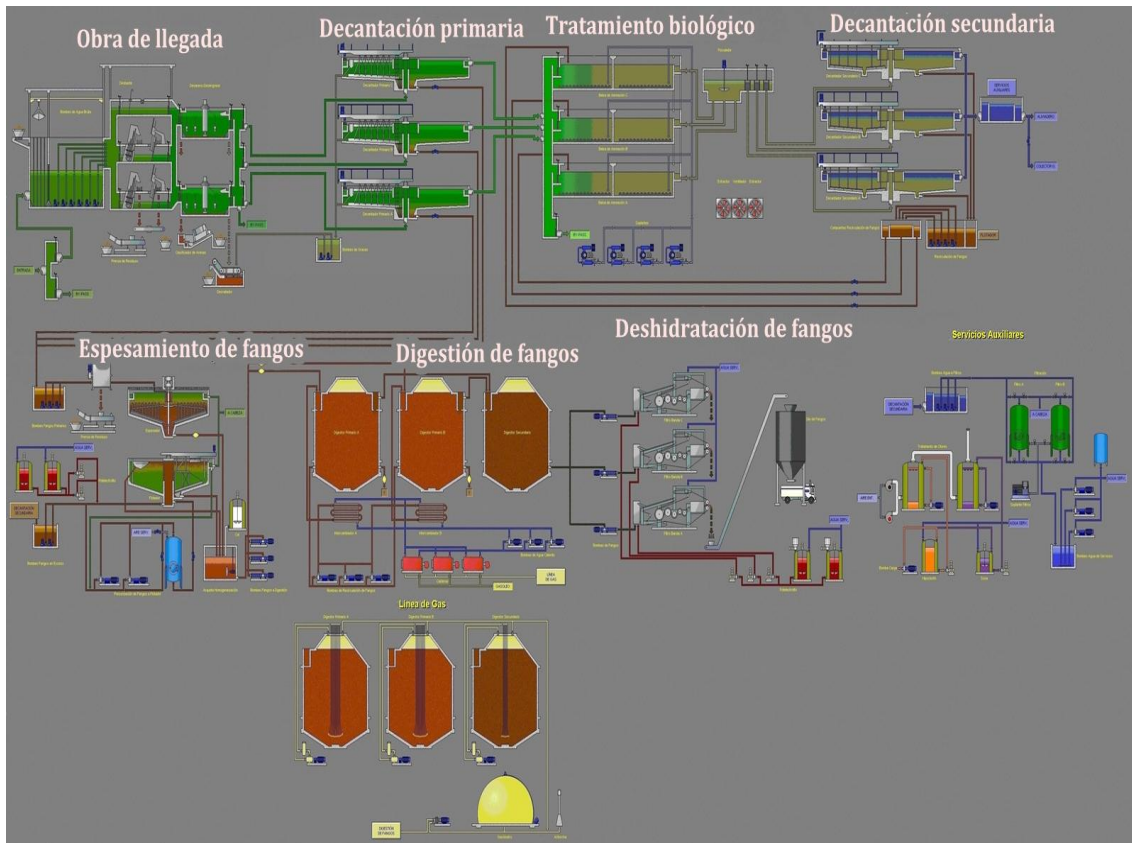


Imagen 15: Diagrama de flujo de las líneas de agua y fangos EDAR El Bobar, (Almería).

- **Proceso de fangos activos**

La depuración biológica por fangos activos es un tipo de proceso biológico empleado en el tratamiento de aguas residuales convencionales que consiste en el desarrollo de un cultivo bacteriano disperso en forma de flóculos en un biorreactor o reactor biológico aireado y agitado, que es alimentado con el agua residual. La aireación implica que es un proceso aerobio (suministra oxígeno necesario a los microorganismos). Además la aireación favorece una buena mezcla en el biorreactor (lo que puede permitir considerarlo como un reactor de mezcla perfecta), evita sedimentos y homogeniza la mezcla de los flóculos bacterianos con el agua residual.

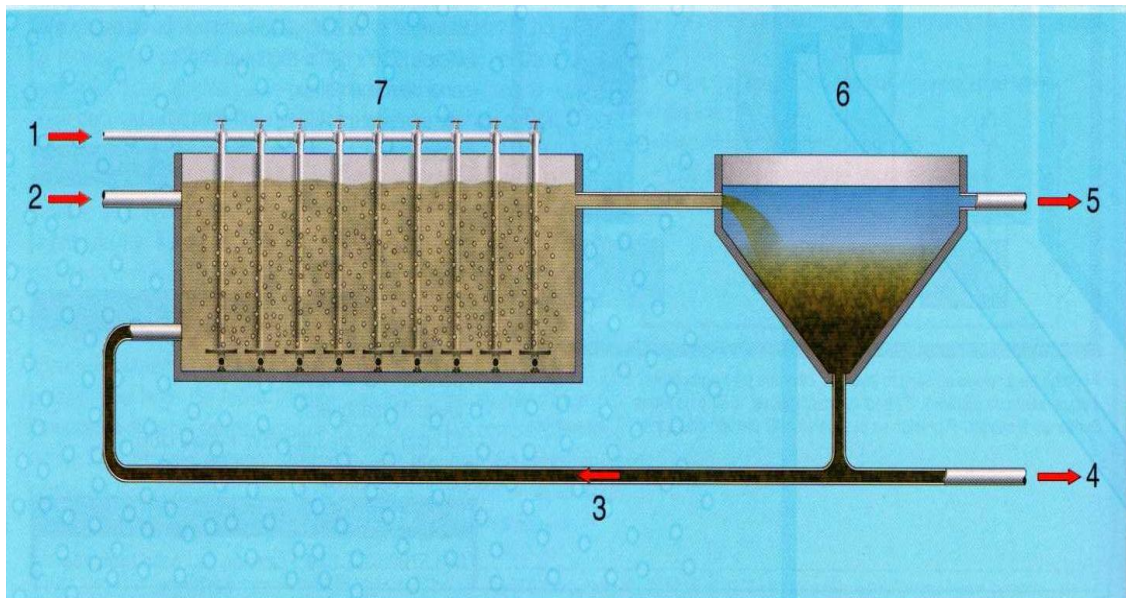
Las bacterias son capaces de metabolizar como nutrientes los contaminantes orgánicos presentes en el agua. Los procesos que aquí se producen son exactamente los mismos que en los ríos o lagos naturales, pero en los tanques de aireación, los organismos se agrupan en un espacio reducido y en gran número.

Al cabo de un tiempo determinado (denominado tiempo de residencia), la mezcla de reacción se conduce hasta un tanque de sedimentación para la separación del agua residual tratada y la biomasa generada. Una parte de las células sedimentadas se recirculan para mantener en el biorreactor la concentración de células deseada,

mientras que otra parte puede purgarse del sistema. De este modo, el biorreactor puede funcionar en estado estacionario. Sin la corriente de purga, la biomasa se iría acumulando indefinidamente en el sistema (sistema no estacionario), ya que la biomasa en la corriente de salida sería inferior a la que se genera en el biorreactor.

El correcto diseño del biorreactor, requiere no sólo asumir que tipo de mezcla ocurre dentro de este, sino también conocer la cinética de crecimiento microbiano tipo Monod y que prácticamente todo el consumo de sustrato (materia orgánica), se invierte en formar biomasa son aproximaciones aceptables. Como existen multitud de microorganismos y sustratos diferentes, el modelo cinético presenta valores promedio.

En la siguiente imagen se muestra el principio básico de funcionamiento de un sistema de fangos activos:



*Imagen 16: Funcionamiento de un sistema de fangos activos. (1: aire, 2: agua residual, 3: lodo de retorno, 4: lodo en exceso, 5: agua depurada, 6: decantador secundario, 7: tanque de aireación).*

#### ▪ Cinética del crecimiento microbiano

Para tener un control efectivo del tratamiento biológico que se realiza al agua residual en el biorreactor, es necesario conocer cómo crecen los microorganismos que realizan la depuración, que principalmente son bacterias.

El modelo de crecimiento más utilizado, basado en la evolución del número de células, tiene cuatro etapas. Para obtener este modelo se usan biorreactores con funcionamiento discontinuo, donde se analiza la concentración de células a distintos tiempos. En el modelo pueden distinguirse cuatro etapas:

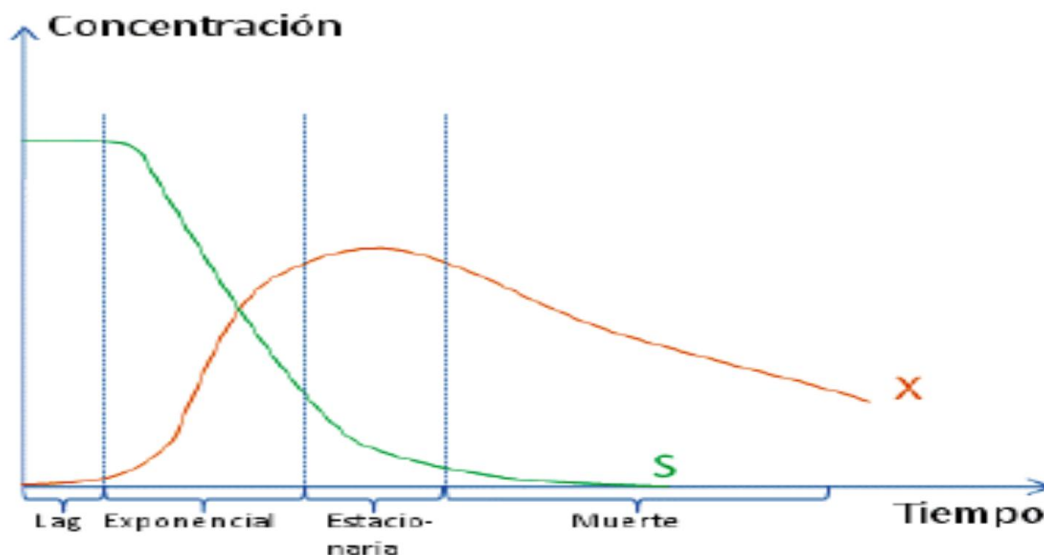
**-Etapa lag:** Tiempo necesario para que las células se adapten al medio.

**-Etapa de crecimiento exponencial:** Las células se reproducen a la máxima velocidad que les permiten sus propias características y el medio donde crecen. El crecimiento celular es proporcional a la concentración de células.

**-Etapa estacionaria:** La población celular permanece estacionaria. El crecimiento está limitado por la disponibilidad de los nutrientes. La generación de células nuevas se compensa con la muerte de células viejas

**-Etapa de muerte:** Cuando los nutrientes en el medio se agotan, la tasa de mortalidad excede a la de generación de células nuevas.

El crecimiento celular está relacionado con el consumo de sustrato, mostrándose a continuación esta cinética en un reactor discontinuo (gráfica 1):



**Gráfica 1:** Cinética de crecimiento celular. La X representa la concentración de biomasa y la S, la concentración de materia orgánica.

En esta gráfica (1), podemos observar como a medida que la materia orgánica (S), va disminuyendo, la concentración de biomasa (X), va aumentando. Esto es debido a que esta biomasa usa como fuente de “alimento” la materia orgánica disponible en el medio para crecer y reproducirse. En un momento determinado, (etapa estacionaria), la concentración de biomasa no aumenta de la misma manera que al inicio, debido a la limitación de nutrientes que supone que cada vez haya menos concentración de materia orgánica. Finalmente, cuando los nutrientes del medio se agotan, la biomasa comienza a sufrir un descenso acusado de su concentración.

La velocidad de crecimiento celular  $r_x$  (etapa de crecimiento exponencial), es proporcional a la propia concentración de biomasa X. Se ha demostrado que la

constante de proporcionalidad  $\mu$  depende de la concentración de sustrato y se puede expresar aceptablemente para una gran variedad de microorganismos mediante la ecuación de Monod, resultando el siguiente modelo para la velocidad de crecimiento celular, (ecuación 1):

$$(r_x) \left( \frac{g \text{ biomasa}}{L \cdot h} \right) \equiv \frac{dX}{dt} = \mu \cdot X = \frac{\mu_m \cdot S}{K_S + S} \cdot S$$

**Ecuación 1**

Donde  $\mu$  recibe el nombre de velocidad específica de formación de biomasa (g de biomasa formada/ g biomasa seca·h, o simplemente h<sup>-1</sup>), (ecuación 2):

$$\mu = \frac{\mu_m \cdot S}{S + K_S}$$

**Ecuación 2**

<b><math>\mu_m</math></b>	Máxima velocidad específica de crecimiento (g. sustrato/g.biomasa·h, ó simplemente h <sup>-1</sup> )
<b><math>K_S</math></b>	Constante de Monod o de semisaturación (g/L)
<b>X</b>	Concentración de biomasa (masa/volumen, g/L)
<b>S</b>	Concentración de nutrientes o sustrato limitante, en este caso, materia orgánica degradada por los microorganismos (masa/volumen, g/L)

**Tabla 1: Nomenclatura utilizada en las ecuaciones 1 y 2**

$\mu_m$  y K son constantes cinéticas que han de determinarse experimentalmente para cada microorganismo o conjunto de ellos en unas determinadas condiciones.

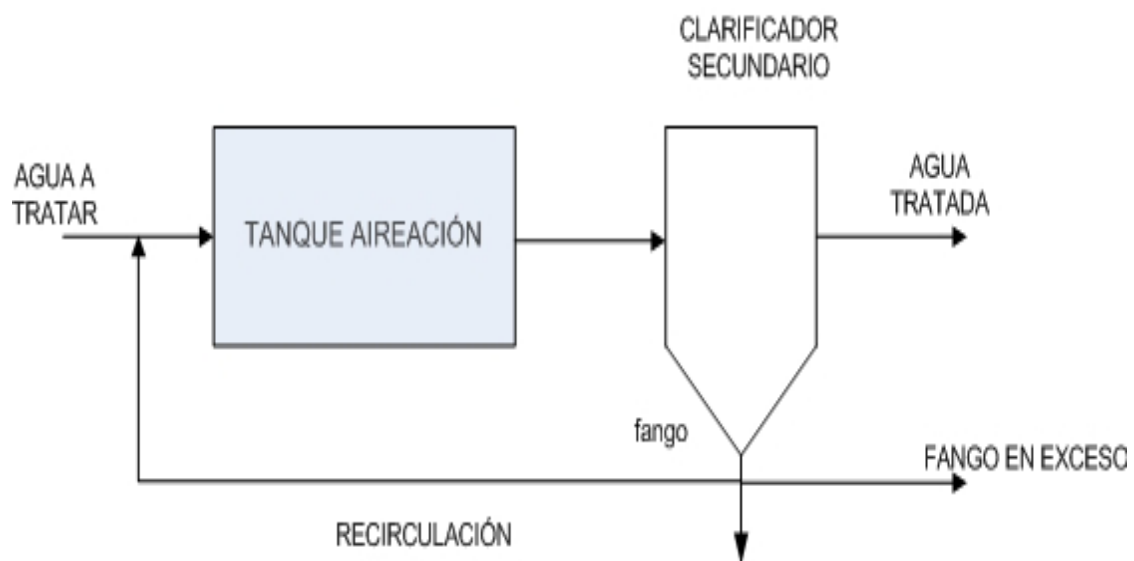
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A la hora de diseñar cualquier instalación para el tratamiento de aguas residuales, se debe de tener en cuenta las características del efluente, los resultados que queremos obtener y las diferentes opciones disponibles en cuanto a instalaciones.

Existen tratamientos biológicos aerobios y anaerobios. Los procesos aerobios son los que más convienen a la hora de convertir la materia orgánica presente en el agua residual, mientras que los anaerobios resultan más interesantes para la conversión de la materia orgánica presente en los lodos que se producen tras tratar el agua residual.

De los procesos aerobios disponibles, el de fangos activos es el más empleado. No existe un sólo tipo de de proceso de fangos activos, ya que existen numerosas variaciones en función de las diferentes calidades de aguas, o para obtener agua con ciertos parámetros de calidad.

En cualquier caso, el tratamiento de aguas residuales mediante fangos activados desde el punto de vista de su funcionamiento, se lleva a cabo mediante el siguiente diagrama de flujo, (figura 4):



*Figura 3: Diagrama de flujo de un sistema de fangos activados*

## Descripción del diseño del proceso

El objetivo de este apartado es discutir los principios de diseño de un reactor biológico de fangos activados con recirculación.

En la siguiente imagen se muestra el diagrama de flujo del proceso con las variables a tener en cuenta, (figura 5).

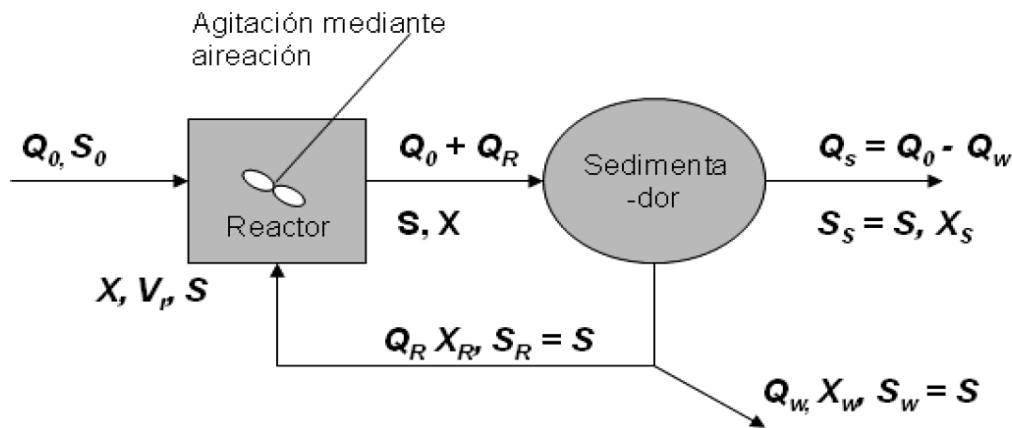


Figura 4: Diagrama de flujo con sus respectivas variables

En las siguientes tablas se especifica la notación empleada, (tablas 2, 3 y 4):

Caudales (m <sup>3</sup> )	
Símbolo	Definición
$Q_0$	Caudal de entrada
$Q_R$	Caudal de recirculación
$Q_S$	Caudal de salida
$Q_W$	Caudal de purga

Tabla 2: Notación empleada referente a los caudales

Materia Orgánica (mg DBO/L)	
Símbolo	Definición
$S_0$	Concentración de M.O. a la entrada
$S_R$	Concentración de M.O. en recirculación
$S_S$	Concentración de M.O. a la salida
$S_W$	Concentración de M.O. en la purga
$S$	Concentración de M.O. en el reactor

Tabla 3: Notación empleada referente a la materia orgánica

<b>Biomasa (mg SSV/L)</b>	
<i>Símbolo</i>	<i>Definición</i>
$X_R$	Concentración de biomasa en recirculación
$X_S$	Concentración de biomasa a la salida
$X_W$	Concentración de biomasa en la purga
$X$	Concentración de biomasa en el reactor

**Tabla 4:** Notación empleada referente a la biomasa

El caudal de entrada ( $Q_0$ ), es decir, el agua residual a tratar, entra en el sistema con un valor determinado de concentración materia orgánica representado por  $S_0$ .

El objetivo de todo el proceso es reducir ese valor de concentración de materia orgánica mediante oxidación por degradación biológica aerobia hasta unos límites aceptables y que cumplan con la legislación.

La alimentación inicial se mezcla con fango procedente de la recirculación y entra en el reactor biológico.

Partimos de una serie de aproximaciones referentes a este reactor biológico, ya que aplicamos el modelo de reactor continuo mezcla perfecta al proceso de fangos activos:

- Suponemos que el reactor o tanque de aireación es un Reactor Continuo Mezcla Perfecta (RCMP).
- Suponemos que el sedimentador separa completamente toda la biomasa. Luego  $X_s \cong 0$ , porque toda la biomasa son sólidos en suspensión que sedimentan. El agua residual contiene bacterias pero estas no causan una degradación neta de la materia, por lo que suponemos que la concentración de bacterias en el agua residual a tratar es despreciable,  $X_0=0$ .
- Se asume que sólo las células son las partículas que sedimentan y que además lo hacen en el sedimentador secundario y no en el reactor. Además, se supone que la materia orgánica (el sustrato), es soluble y por tanto sólo son considerados como sólidos las células. Esta hipótesis se basa en que los tiempos de retención en el sistema son suficientemente grandes como para lograr que los compuestos orgánicos inicialmente presentes en el agua se hidrolicen a sustancias más pequeñas y solubles. El considerar al sustrato como soluble, implica que la concentración de la materia orgánica en el efluente que abandona el sistema  $S_s$  es igual a la de la corriente de salida del reactor  $S$ , y a su vez igual a la concentración de sustrato en los lodos que se forman en el sedimentador  $S_w$ . El sedimentador separa la fase sólida (biomasa), de la líquida, pero la concentración de sólidos en las corrientes (que si cambian), no afecta a la concentración de sustrato en la fase líquida. Por tanto:  $S \approx S_s \approx S_w$



- Suponemos que la transformación de la materia orgánica en biomasa, se produce únicamente en el reactor y que toda la biomasa se encuentra en el reactor y no sale de ahí.

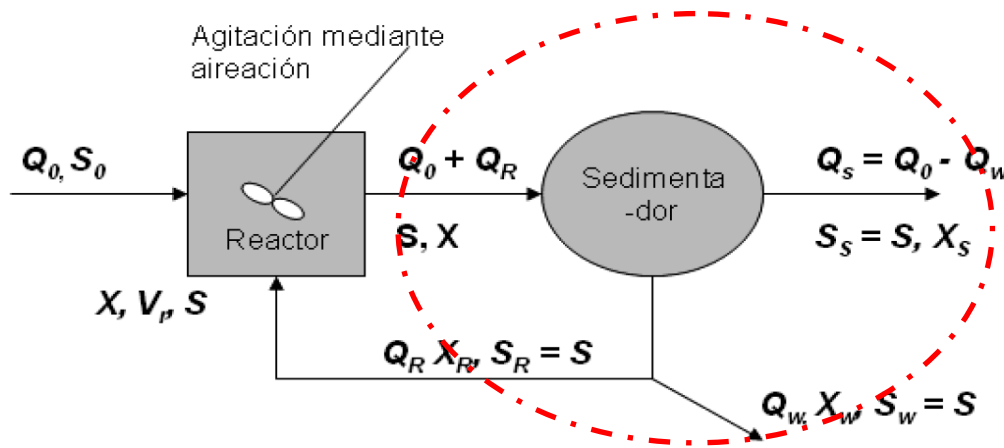
Como ya hemos mencionado, la corriente de purga  $Q_R$ , se combina con el caudal inicial  $Q_0$ , para formar una alimentación combinada  $Q_0 + Q_R$ .

De este modo podemos definir la relación de recirculación según la ecuación 3:

$$R \equiv \frac{Q_R}{Q_0}$$

**Ecuación 3**

Ahora, podemos realizar un balance de materia a la biomasa en el sedimentador en estado estacionario (figura 6):



**Figura 5: Balance de materia a la biomasa en el sedimentador**

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} + \underbrace{\text{Crecimiento Neto}}_0$$

$$0 = (Q_0 + Q_R) \cdot X - Q_S \cdot X_S - Q_W \cdot X_W - Q_R \cdot X_R$$

**Ecuación 4**

Y también podemos realizar un balance de materia a la biomasa del sistema completo,(figura 7):

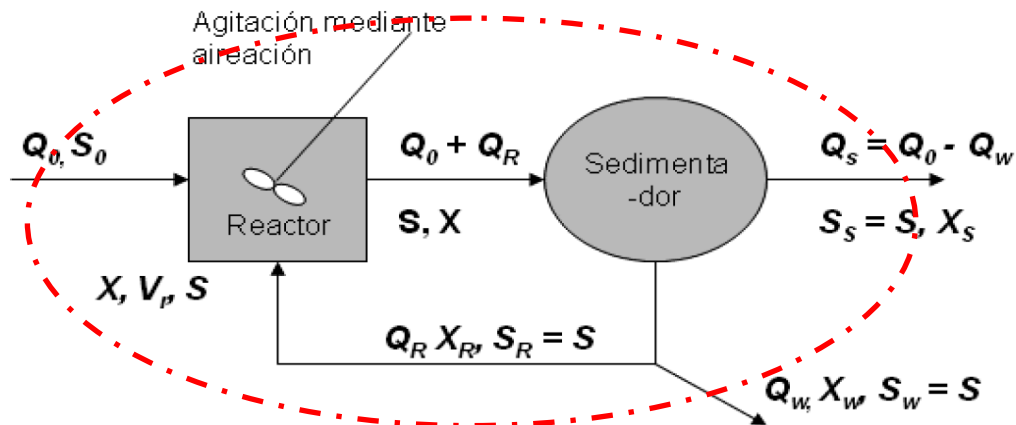


Figura 6: Balance de materia a la biomasa en el sistema

**Acumulación**= **Entrada** - **Salida** + **Generación Neta**

$$V_r \cdot \frac{dX}{dt} = \underbrace{Q_0 \cdot X_0}_0 - \underbrace{Q_s \cdot X_s}_0 - \underbrace{Q_w \cdot X_w}_0 + V_r \cdot (r_x - r_d)$$

Ecuación 5

Algunos términos de la ecuación 5 se anulan al valer 0 debido a que la concentración de células (biomasa), en el afluente de alimentación es nula ( $X_0=0$ ), que la cinética sigue el modelo de Monod y que prevalecen condiciones estacionarias (acumulación=0).

De aquí podemos deducir la fórmula para calcular la corriente de lodos L, que se define según la ecuación 6:

$$L \equiv [Q_s \cdot X_s + Q_w \cdot X_w]$$

Ecuación 6

Pero como suponemos que la concentración de biomasa al salir  $X_s=0$ , la corriente de lodos nos queda como (ecuación 7):

$$L = Q_w \cdot X_w$$

Ecuación 7

Para el sistema de la figura 5, podemos calcular el tiempo medio de retención hidráulica, que es el tiempo medio teórico que permanecen las partículas de líquido en un proceso de tratamiento, ya sea para todo el sistema  $\tau_H$  ó sólo para el reactor,  $\tau_{Hr}$  según las ecuaciones 8 y 9:

$$\tau_H = \frac{V_r + V_s}{Q_0}$$

**Ecuación 8**

$$\tau_{Hr} = \frac{V_r}{Q_0}$$

**Ecuación 9**

Gracias a la ecuación del tiempo medio de retención hidráulico (ecuación 9), podemos calcular el tiempo medio de retención celular,  $\tau_x$ . Este representa la masa de células o biomasa presente en el sistema, es decir en el reactor biológico, ya que como hemos mencionado antes, consideramos que la biomasa sólo se encuentra en el biorreactor, respecto de la velocidad con la que la biomasa se elimina del sistema. Mientras que el tiempo de retención hidráulica es simplemente el tiempo de residencia en el sistema, el tiempo de retención celular indica la edad de los lodos formados (ecuación 10):

$$\tau_x = \frac{\tau_{Hr}}{1 + R - R \cdot \frac{X_R}{X}}$$

**Ecuación 10**

Obtenido el valor del tiempo medio de retención celular (ecuación 10), gracias al balance de materia de la biomasa en el sedimentador; podemos usarlo para la ecuación que nos permite conseguir el valor de la materia orgánica, (S), (ecuación 11), procedente del balance de materia de la biomasa al sistema (ecuación 5):

$$S = \frac{k_s \cdot (1 + \tau_x \cdot k_d)}{\tau_x (\mu_m - k_d) - 1}$$

**Ecuación 11**

Como se puede observar, el valor de la materia orgánica está en función a una serie de parámetros cinéticos biológicos ( $K_s$ ,  $K_d$ ,  $\mu_m$ ) y el tiempo medio de retención celular,  $\tau_x$ . Esta última, es una variable de diseño del reactor y todos esos parámetros serán calculados más adelante.

La ecuación que nos permite obtener un valor de S (ecuación 11), es la misma que si se tratara de un reactor continuo mezcla perfecta, pero sin recirculación. Lo único que cambia es que se sustituye el valor del tiempo de residencia hidráulico por el tiempo de retención celular, lo cual es importante, ya que esto nos permite diseñar un sistema que tenga un alto valor de tiempo medio de retención celular, de forma que la concentración del sustrato S a la salida del sistema sea pequeña independientemente del volumen del tanque, lo que permite hacer más viable el proceso al emplearse tanques más pequeños y por consiguiente, baratos.

También podemos hacer un balance de materia al sustrato (materia orgánica) del sistema,(figura 8):

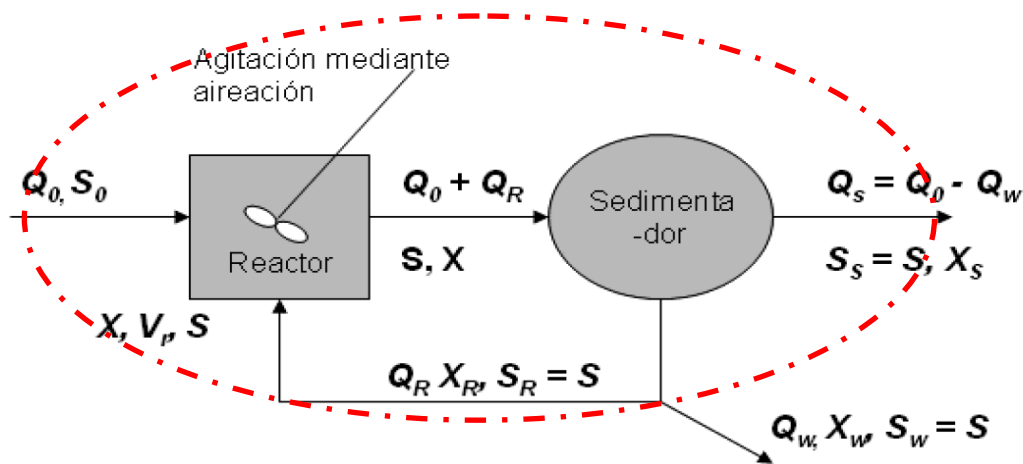


Figura 7: Balance de materia orgánica del sistema completo

**Acumulación = Entrada - Salida + Consumo**

$$0 = Q_0 \cdot S_0 - \underbrace{(Q_0 - Q_w) \cdot S - Q_w \cdot S}_{-Q_0 S} + V_r \cdot (-r_s)$$

Ecuación 13

Y mediante la ecuación 13 y las ecuaciones cinéticas siguientes (14 y 15):

$$r_x = \frac{\mu_m \cdot S}{S + K_S}$$

Ecuación 14

$$r_d = k_d \cdot X$$

Ecuación 15

Puede obtenerse a partir del balance de materia de la figura 8 la fórmula que nos permite obtener el valor de biomasa (X), (ecuación 16):

$$X = Y \cdot \frac{\tau_x}{\tau_{HR}} \cdot \left[ \frac{S_0}{1 + \tau_x \cdot k_d} - \frac{K_S}{\mu_m \cdot \tau_x - (1 + \tau_x \cdot k_d)} \right]$$

**Ecuación 16**

Y como podemos ver, X es función de una serie de parámetros cinéticos biológicos ( $K_S$ ,  $k_d$ ,  $\mu_m$ ), más  $S_0$  y  $\tau_x$ .

Para que la biomasa sedimente correctamente, se recomienda que  $[F/M] = \frac{Q_0 \cdot S_0}{V_r \cdot X} < 0.6$

Teniendo en cuenta esto, y sabiendo que las variables de diseño son el tiempo de retención celular  $\tau_x$  (ecuación 10), y la concentración de biomasa en el reactor (ecuación 16), X; y asumiendo que los valores de X suelen estar comprendidos entre 1500 y 4000 mg SS/L y que  $\tau_x$  puede calcularse a partir del tiempo de retención hidráulico  $\tau_w$ , (ecuación 17), en base a factores de seguridad (FS) pre-establecidos, cuyo valor en plantas convencionales oscila entre 10 y 80.

$$\tau_w \approx \frac{1}{\mu_m - k_d} \rightarrow \tau_x = FS \cdot \tau_w$$

**Ecuación 17**

Con las variables de diseño identificadas, y sabiendo que hay una serie de magnitudes conocidas que son las siguientes:

- Caudal y características del agua residual:  $Q_0$ ,  $S_0$ ,  $X_0$
- Concentraciones máximas en el agua depurada:  $S_{max}$  y  $X_S$
- Concentración X en los lodos:  $X_w$
- Parámetros cinéticos (incluido Y)

Obtenemos que hay un total de 7 variables a calcular:  $Q_S$ ,  $Q_w$ ,  $Q_R$ ,  $Q_1$ ,  $Q_2$ , S, y V

Como hay un total de 5 balances de materia independientes y 2 relaciones conocidas, se conocen los valores de  $\tau_x$  e Y, hay un total de 7 ecuaciones, lo que nos indica que el sistema puede determinarse por completo.

Para poder calcular estas 7 variables, es necesario seguir una secuencia de cálculos partiendo de una serie de datos de los que debemos de disponer. Algunos de estos

datos vienen ya establecidos gracias a diferentes ensayos de laboratorio, mientras que otros dependen del tipo y cantidad de agua residual que estemos tratando, como el caudal de entrada al biorreactor. Estos últimos son datos reales de la EDAR El Bobar. Los datos necesarios son los siguientes (tabla 5):

• $K_s$ (mg DBO <sub>5</sub> /L)	140
• $K_d$ (día <sup>-1</sup> )	0,18
• $\mu_m$ (día <sup>-1</sup> )	1,8
• $Y$ (mg SSV/ mg DBO <sub>5</sub> consumida)	0,4
• $X_r$ (mg SSV/L)	8000
• $Q_0$ (m <sup>3</sup> )	32193
• $S_0$ (mg DBO <sub>5</sub> /L)	412
• $S_s$ (mg DBO <sub>5</sub> /L)	19

**Tabla 5: Datos reales para el cálculo de las variables**

Una vez obtenidos todos los datos anteriores, podemos comenzar a seguir la secuencia de cálculos para obtener las 7 variables necesarias.

Primero se calculan los dos parámetros de diseño utilizados:  $\tau_x$  y  $X$ . Para calcular el  $\tau_w$ , que nos permitirá obtener valores del tiempo de retención celular  $\tau_x$  se utiliza la ecuación 18:

$$\tau_w = \left( \frac{\mu_m \cdot S_0}{S_0 + K_s} - K_d \right)^{-1}$$

**Ecuación 18**

Sustituyendo los valores de los que disponemos en la ecuación 18:

$$\tau_w = \left( \frac{1,8 \cdot 412}{412 + 140} - 0,18 \right)^{-1} = 0,86 \text{ días}$$

Elegimos un valor para el factor de seguridad (FS), que puede oscilar entre 10 y 80. Con él podemos calcular el tiempo de retención celular,  $\tau_x$ . (Ecuación 19):

$$\tau_x = FS \cdot \tau_w$$

**Ecuación 19**

Después pasamos a calcular la concentración de materia orgánica (S), medida en mg DBO<sub>5</sub>/L según la ecuación 20:

$$S_{cal} = \frac{K_s \cdot (1 + \tau_x \cdot K_d)}{\tau_x \cdot (\mu_m - K_d) - 1}$$

**Ecuación 20**

Luego comprobamos si esos valores son menores que los que exige la legislación para poder seguir con los cálculos.  $S_{cal} < S_{max}$  Si no lo fuera, habría que modificar los valores del factor de seguridad. En España, el valor de  $S_{max}$  está fijado en 25 mg DBO<sub>5</sub>/L.

Con el valor de  $\tau_x$  (ecuación 19), y el valor de  $S_{cal}$  (ecuación 20), podemos comprobar qué valor de  $\tau_x$  permite obtener una  $S_s=19$  mg DBO<sub>5</sub>/L, que es la presente en el agua de la depuradora El Bobar. (Ver tabla 6).

<i>FS</i>	$\tau_x$	<i>S<sub>cal</sub></i>
<b>10,0</b>	8,59	27,6
<b>14,0</b>	12,03	24,0
<b>18,0</b>	15,47	22,0
<b>22,0</b>	18,91	20,8
<b>26,0</b>	22,35	20,0
<b>30,0</b>	25,78	19,4
<b>34,0</b>	29,22	18,9
<b>38,0</b>	32,66	18,6
<b>42,0</b>	36,10	18,3
<b>46,0</b>	39,54	18,0
<b>50,0</b>	42,97	17,8
<b>54,0</b>	46,41	17,7
<b>58,0</b>	49,85	17,5
<b>62,0</b>	53,29	17,4
<b>66,0</b>	56,73	17,3
<b>70,0</b>	60,16	17,2
<b>74,0</b>	63,60	17,1
<b>78,0</b>	67,04	17,0
<b>82,0</b>	70,48	16,9
<b>86,0</b>	73,92	16,9

**Tabla 6: Primeros valores obtenidos según la secuencia de cálculo establecida**

Como se observa en la tabla 6, el FS elegido para que el valor de  $S_s$  coincida con el de la depuradora de El Bobar a fin de poder obtener las correspondientes conclusiones posteriormente, es 34. También obtenemos el valor de la otra variable de diseño,  $\tau_x = 29,22$  días, ya que es una función del FS elegido.

El siguiente parámetro de diseño a definir es X. En este caso hemos seleccionado un valor de 3500 mg SSV/L, por ser con el que opera el sistema de fangos de la EDAR El Bobar. Este valor debe estar entre 1500 y 4000 mg SSV/L.

A continuación comenzamos el cálculo de las demás variables desconocidas en la instalación, teniendo siempre en cuenta que  $\tau_x = 29,22$  días y  $S_s=19$  mg DBO<sub>5</sub>/L.

Comenzamos calculando el valor del tiempo de retención hidráulica ( $\tau_{Hr}$ ), medida en días, según la ecuación 21:

$$\tau_{Hr} = Y \cdot \frac{\tau_x}{X} \cdot \left[ \frac{S_0}{1+\tau_x \cdot K_d} - \frac{K_S}{\mu_m \cdot \tau_x - (1+\tau_x \cdot K_d)} \right]$$

*Ecuación 21*

Sustituyendo por sus respectivos valores en la ecuación 21:

$$\tau_{Hr} = 0,4 \cdot \frac{29,22}{3500} \cdot \left[ \frac{412}{1+29,22 \cdot 0,18} - \frac{140}{1,8 \cdot 29,22 - (1+29,22 \cdot 0,18)} \right] = 0,21 \text{ días} = 5 \text{ horas}$$

Una vez hecho esto, podemos calcular el volumen necesario (V), medido en m<sup>3</sup> según la ecuación 22:

$$V = Q_0 \cdot \tau_{Hr}$$

*Ecuación 22*

Sustituyendo en la ecuación 22:

$$V = 32193 \cdot 0,21 = 6751 \text{ m}^3$$

Luego calculamos el valor de [F/M], también llamada carga másica, cuyo valor se recomienda que sea menor que 0,6, según la ecuación 23:

$$\left[ \frac{F}{M} \right] = \frac{S_0}{\tau_{Hr} \cdot X}$$



**Ecuación 23**

Si sustituimos en la ecuación 23 por sus valores correspondientes:

$$\left[\frac{F}{M}\right] = \frac{412}{0,21 \cdot 3500} = 0,56 \text{ mg DBO}_5/\text{mg SSV} \cdot \text{d}$$

Ahora podemos calcular el valor de  $Q_w$  medido en  $\text{m}^3/\text{día}$  según la ecuación 24:

$$Q_w = \frac{V \cdot X}{\tau_x \cdot X_w}$$

**Ecuación 24**

Sustituyendo nos queda:

$$Q_w = \frac{6751 \cdot 3500}{29,22 \cdot 8000} = 101 \text{ m}^3/\text{día}$$

Después se puede calcular el valor del caudal de oxígeno necesario  $Q_{O_2}$  en  $\text{kg}/\text{día}$  según la ecuación 25:

$$Q_{O_2} = Q_0 \cdot (S_0 - S) - 1,42 \cdot (Q_w \cdot X_w)$$

**Ecuación 25**

Sustituyendo en la ecuación 25:

$$Q_{O_2} = 32193000 \cdot (412 - 19) - 1,42 \cdot (101 \cdot 8000) = 11506 \text{ kg}/\text{día}$$

Ahora calculamos la relación de recirculación (R), según la ecuación 26:

$$R = \frac{(\tau_x - \tau_{Hr}) \cdot X}{(X_R - X) \cdot \tau_x}$$

**Ecuación 26**

Sustituyendo en la ecuación 26:

$$R = \frac{(29,22-0,21) \cdot 3500}{(8000-3500) \cdot 29,22} = 0,77$$

Gracias a la ecuación 26, podemos calcular el valor del caudal de recirculación ( $Q_R$ ) en  $m^3/día$  según la ecuación 27:

$$Q_R = R \cdot Q_0$$

*Ecuación 27*

Sustituyendo en la ecuación 27:

$$Q_R = 0,77 \cdot 32193 = 24859 \text{ m}^3/día$$

Y ahora podemos calcular los valores del caudal de salida ( $Q_S$ ), caudal 2 y caudal 1 ( $Q_2, Q_1$ ) en  $m^3/día$  según las ecuaciones 28, 29 y 30 respectivamente:

$$Q_S = Q_0 - Q_W$$

*Ecuación 28*

$$Q_2 = Q_R + Q_W$$

*Ecuación 29*

$$Q_1 = Q_S + Q_2$$

*Ecuación 30*

Sustituyendo por los valores correspondientes en las ecuaciones 28, 29 y 30 nos queda:

$$Q_S = 32193 - 101 = 32092 \text{ m}^3/día$$

$$Q_2 = 24859 + 101 = 24960 \text{ m}^3/día$$

$$Q_1 = 32092 + 24960 = 57052 \text{ m}^3/día$$

Finalmente podemos calcular la eficacia en % según la ecuación 31:

$$E(\%) = \frac{(S_0 - S) \cdot 100}{S_0}$$

*Ecuación 31*

Sustituyendo la ecuación 31 por sus valores:

$$E(\%) = \frac{(412 - 19) \cdot 100}{412} = 95,4 \%$$

## 4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos, tomando como variable de diseño,  $X=3500$  mg SSV/L, tiempo de retención celular  $\tau_x= 29,22$  días y  $FS=34$ , se resumen en la siguiente tabla:

$Q_s$	32092 m <sup>3</sup> /día
$Q_w$	101 m <sup>3</sup> /día
$Q_R$	24859 m <sup>3</sup> /día
$Q_1$	57052 m <sup>3</sup> /día
$Q_2$	29960 m <sup>3</sup> /día
$S$	18,9 mg DBO <sub>5</sub> /L
$V$	6751 m <sup>3</sup>

*Tabla 7: Resultados obtenidos de las variables*

Con los datos obtenidos en la tabla 7, todos los caudales del sistema de fangos activos quedan definidos, así como el volumen del reactor biológico.

Como ya se ha comentado, el FS se ha elegido de forma que el valor de  $S$  calculado en la tabla 7, coincida con el real en la EDAR El Bobar. De esta forma, asumiendo que los parámetros cinéticos biológicos utilizados en los cálculos (ver tabla 5), son los mismos que rigen en la depuradora, es posible comparar el volumen del reactor calculado, con el volumen real del reactor de la EDAR El Bobar:

	Datos calculados	Datos reales
$V$	6751 m <sup>3</sup>	8840m <sup>3</sup> →(75%)→6360 m <sup>3</sup>
$\tau_h$	5 horas	6 horas
$\tau_x$	29,2 días	10 días
$F/M$	0,56	0,40

*Tabla 8: Comparación de datos calculados y datos reales de la EDAR El Bobar, (Almería)*

En la tabla 8 se observa que el volumen calculado es menor que el volumen real, ( $V_{cal}<V_{real}$ ), pero hay que tener en cuenta que no todo el volumen del reactor es volumen útil, si no que aproximadamente sólo entre el 70-80% lo es, es decir, suponiendo un 75% de volumen útil, el volumen del reactor real es de 6360 m<sup>3</sup>, un valor bastante más próximo a nuestro volumen calculado.

En cuanto a los tiempos de retención hidráulicos,  $\tau_h$ , salen muy parecidos, en consonancia con que el volumen del reactor calculado y real no son muy distintos.

Respecto a los tiempos de retención celular,  $\tau_x$ , es donde se observan mayores diferencias y es donde se pone de manifiesto que algunas de las simplificaciones asumidas en nuestros cálculos no se cumplen en el sistema real.

En este sentido, para el diseño del reactor se ha asumido un modelo de Mezcla Perfecta, por ser el más sencillo, pero esto es un tipo de mezcla ideal y en el reactor real habrá desviaciones respecto de este modelo. Tampoco es conocida la razón de recirculación de fangos, R, con la que opera el sistema de fangos activos de la EDAR El Bobar.

Por último, la relación F/M calculada no es muy distinta de la real, y cumple con el criterio de ser inferior a 0'6, lo que a priori permite una buena sedimentación de la biomasa y que se cumpla una de las hipótesis planteadas, que era que el agua depurada saliera exenta de biomasa.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

### Libros impresos:

-MARTINEZ DELGADILLO, Sergio A., RODRIGUEZ ROSALES, Miriam G. "Tratamiento de aguas residuales con MATLAB". Reverte, 2005. 239 p. ISBN: 968670857X, 9789686708578

-METCALF, Leonard., HARRISON P, Eddy. "Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización". 3ª ed. Madrid, McGraw-Hill, 2000. 1485 p. ISBN: 8448116070

-REYNOLDS, Tom D., RICHARDS, Paul A. "Unit operations and processes in environmental engineering". 2<sup>nd</sup> ed. PWS Publishing Company, 1996. 798 p. ISBN: 0534948847, 9780534948849

### Recursos electrónicos:

-Wiki. "Ingeniería de aguas residuales" [en línea].España, Wiki 2007. Disponible en internet:<http://0site.ebrary.com.almirez.ual.es/lib/bual/docDetail.action?docID=10179597> eISBN: 9781449211493

-Zornoza,P. (2012, 10 de enero). Funcionamiento de una Estación Depuradora de Aguas Residuales. EDAR. [Faunaiberica.net]  
de: <http://www.faunaiberica.net/2012/01/funcionamiento-de-una-estacion.html>

-Aqualia. "Almería, modelo de optimización de los recursos naturales",[en línea].[http://test.aqualia.es/almeria/abastecimiento/docs/4t\\_EDAR\\_Almeriav2.pdf](http://test.aqualia.es/almeria/abastecimiento/docs/4t_EDAR_Almeriav2.pdf)

### Legislación:

-Unión Europea. Directiva 91/271/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1991, relativa al tratamiento de las aguas residuales urbanas.