



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

**Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales**

# **DISEÑO DEL TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE FANGOS ACTIVOS PARA LA ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y NUTRIENTES PARA UNA POBLACIÓN DE 60 000 HABITANTES EQUIVALENTES**

AUTOR: MIGUEL ÁNGEL PILATO SANZ

TUTORES: ALICIA IBORRA CLAR

JOSÉ ANTONIO MENDOZA ROCA

**Curso Académico: 2016-2017**



## AGRADECIMIENTOS

*A mis padres*

*A mis tutores*

*A mis compañeros*

*“Soy un gran creyente en la suerte. Cuanto más trabajo, más parezco tener.”*

*Coleman Cox*

## RESUMEN

El presente trabajo final de grado recoge los conocimientos, técnicas y cálculos necesarios para el diseño de un proceso biológico de fangos activos ideado para el tratamiento secundario de una estación depuradora de aguas urbanas para una población de 60 000 habitantes equivalentes.

Con el diseño de la instalación se eliminarán la materia orgánica y los nutrientes del efluente a tratar hasta alcanzar los niveles permitidos por la legislación actual.

Para tal fin se han empleado tablas de datos empíricos, parámetros normalizados y fórmulas específicas. Los cuales han sido determinantes para la elección, el cálculo y la disposición de los diferentes componentes que forman el proceso biológico.

El sistema en conjunto formado principalmente por un reactor biológico, un decantador secundario, elementos de impulsión y las pertinentes interconexiones de recirculación permitirán, mediante las reacciones biológicas y físico-químicas adecuadas, alcanzar el nivel de depuración deseado.

**Palabras clave:** *fangos activos, reactor biológico, decantador, materia orgánica, nutrientes*

## RESUM

El present treball final de grau arreplega els coneixements, tècniques i càlculs necessaris per al disseny d'un procés biològic de fangs actius ideat per al tractament secundari d'una estació depuradora d'aigües urbanes per a una població de 60 000 habitants equivalents.

Amb el disseny de la instal·lació s'eliminaran la matèria orgànica i els nutrients de l'efluent a tractar fins abastar els nivells permesos per la legislació actual.

Per a tal fi s'han emprat taules de dades empíriques, paràmetres normalitzats i fórmules específiques. Els quals han estat determinants per a l'elecció, el càlcul i la disposició dels diferents components que formen el procés biològic.

El sistema en conjunt format principalment per un reactor biològic, un decantador secundari, elements d'impulsió i les pertinents interconnexions de recirculació permetran, mitjançant les reaccions biològiques i físico-químiques adequades, abastar el nivell de depuració desitjat.

**Paraules clau:** *fangs actius, reactor biològic, decantador, matèria orgànica, nutrients*

## **ABSTRACT**

The following paper describes the set of knowledge, techniques and calculations necessary for the design of an active sludge biological process. The process has been envisioned for the secondary treatment provided by an urban waste water plant conceived for a population of 60,000 inhabitants.

The implementation of the described process will eliminate the organic matter and nutrients from the treated effluent to a level where it reaches permitted levels as per present legislation.

To that end, empirical data, normalised parameters and specific formulas have been used, which have been essential in the selection, calculation and distribution of the different components forming the referred biological process.

The system as a whole is mainly composed of a biological reactor, a secondary decanter, diverse impulsion elements and all relevant recirculation interconnections which will allow the achievement of the desired water treatment levels.

**Key Words:** *active sludge, biological reactor, decanter, organic matter, nutrients.*

# ÍNDICE

## Memoria

1. OBJETO .....	11
2. JUSTIFICACIÓN .....	12
3. ANTECEDENTES .....	13
3.1. Estación depuradora de aguas residuales.....	13
3.2. Tratamiento por fangos activos. Historia .....	14
3.3. Caracterización de aguas residuales .....	15
3.3.1. DBO5(Demanda Bioquímica de Oxígeno, mg/L) .....	15
3.3.2. DQO (Demanda Química de Oxígeno, mg/L) .....	15
3.3.3. Sólidos totales (ST) .....	15
3.3.4. Sólidos en suspensión totales (SST) .....	15
3.3.5. Sólidos en suspensión volátiles (SSV).....	15
3.3.6. pH .....	16
3.3.7. Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).....	16
3.3.8. Nitrógeno (NT, ppm).....	16
3.3.9. Nitrógeno Kjeldahl (NKT).....	16
3.3.10. Fósforo (PT, ppm) .....	16
3.3.11. Temperatura.....	16
3.4. Fases del tratamiento.....	17
3.4.1. Fase 0: Pretratamiento .....	17
3.4.2. Fase 1: Tratamiento primario .....	17
3.4.3. Fase 2: Tratamiento secundario .....	18
3.4.4. Fase 3: Tratamiento terciario .....	19
3.4.5. Línea de fangos .....	19
3.5. Eliminación de la materia orgánica .....	21
3.5.1. Crecimiento de los microorganismos.....	21
3.5.2. Hidrólisis.....	21
3.5.3. Respiración endógena.....	21
3.6. Eliminación biológica de nitrógeno.....	22
3.6.1. Nitrificación.....	23

3.6.2. Desnitrificación .....	24
3.7. Eliminación del Fósforo .....	26
4. TRATAMIENTO SECUNDARIO. FANGOS ACTIVOS .....	27
4.1. Clasificación del proceso de fangos activos .....	28
4.2. Aireación Prolongada .....	29
4.3. Otros parámetros de operación .....	29
5. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN .....	31
6. ESTUDIO ECONÓMICO .....	33
6.1. Energía .....	33
6.2. Personal.....	33
6.3. Material.....	33
6.4. Mantenimiento .....	34
7. BIBLIOGRAFÍA.....	35
Enlaces de interés .....	35
1. CÁLCULO DE LA INSTALACIÓN.....	37
1.1. Caracterización Agua residual.....	37
1.2. Cálculo volumen reactor .....	40
2. RECIRCULACIÓN .....	42
2.1. Recirculación externa.....	42
2.2. Recirculación interna.....	42
3. SISTEMAS DE AIREACIÓN Y AGITACIÓN .....	43
3.1. Necesidad de oxígeno .....	43
3.2. Capacidad de oxigenación.....	44
3.3. Difusores .....	45
4. GEOMETRÍA DE LOS REACTORES.....	47
4.1. Disposición Espacial .....	47
4.2. Disposición de los aireadores.....	47
5. GEOMETRÍA DEL DECANTADOR SECUNDARIO.....	50
5.1. Diámetro y superficie.....	50
5.2. Volumen y altura .....	51
5.3. Comprobación de la carga sobre vertedero.....	51
5.4. Dimensiones del deflector de entrada.....	51
6. INSTALACIÓN DE CLORURO FÉRRICO PARA LA ELIMINACIÓN DE FÓSFORO .....	54
7. BOMBAS Y TUBERÍAS DE RECIRCULACIÓN .....	56
7.1. Dimensionamiento de tuberías.....	56



7.2. Cálculo de la bomba.....	58
7.2.1-Pérdidas de carga.....	58
7.2.2. Potencia de la bomba.....	62
8. PRODUCCIÓN DE FANGOS.....	66
9. PRESUPUESTO .....	67
9.1. Costes obra civil .....	68
9.2. Costes equipos instalados .....	69
9.3. Costes conexión entre equipos .....	69
9.4. Presupuesto ejecución material.....	70
9.5. Presupuesto base de licitación.....	70
10. PLANOS .....	71

## ÍNDICE FIGURAS

<i>Figura 1: Esquema de un pretratamiento estándar.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2: Decantador primario.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3: Tratamiento secundario formado por reactor, anóxico y aerobio, y decantador.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 4: Esquema general de las diferentes etapas de una EDAR .....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 5: Fases del nitrógeno .....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 6: Difusor de disco de gama ABS Sucoflow DS, SULZER.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 7: Agitador sumergible horizontal de la marca SULZER, modelo Gama ABS XRW 900/50hz.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 8: Paletas rascadoras del decantador secundario.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 9: Tanque de almacenaje de productos químicos.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 10: Tabla rugosidad relativa.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 11: Diagrama de Moody.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 12: Codo de polietileno de 90° y válvula de compuerta.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 13: Métodos de instalación de la bomba seleccionada.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 14: Curva Altura-Caudal de la bomba FLYGT N 3153 en conexión NZ.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 15: Bomba de 15 kW FLYGT N 33153.....</i>	<i>64</i>

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Concentración de nutrientes en función del tamaño de la EDAR.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 2: Clasificación procesos fangos activos.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 3: Estudio económico energético.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 4: Estudio económico mano de obra.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 5: Estudio económico del material necesario.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabla 6: Carga en el agua residual en g/HE día que se considera en el diseño de las EDAR de &gt;5000 HE según el reglamento ATV A-131. ....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 7: Concentraciones en el agua residual.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 8: Carga en el agua residual.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 9: Directiva del Consejo de las comunidades europeas sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas (91/271/CEE) y su transposición a la normativa española en RD 11/1995 del 28 de diciembre, RD 509/1996 del 15 de Marzo, RD 2116/1998 del 2 de Octubre.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 10: Carga másica en función de la temperatura.....</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 11: Necesidad de aire en función de la demanda de oxígeno.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 12: Criterios de diseño del decantador secundario.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 13: Unidad de obra 1.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 14: Unidad de obra 2.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 15: Unidad de obra 3.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 16: Unidad de obra 4.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 17: Unidad de obra 5.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 18: Presupuesto ejecución material.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 19: Presupuesto base de licitación.....</i>	<i>70</i>

## **1. OBJETO**

El objeto principal del proyecto es el diseño de un proceso de fangos activos para tratar el agua residual urbana de 60 000 habitantes equivalentes. Se trata de un proceso biológico que permite el desarrollo de una depuración en la que los microorganismos son capaces de tratar el agua a través de un sistema aerobio. De esta forma se eliminan las sustancias biodegradables disueltas en el agua para así obtener unos parámetros acordes a la normativa europea vigente.

El diseño de la instalación permitirá además, con los parámetros adecuados y las técnicas seleccionadas, la eliminación de nutrientes hasta niveles adecuados para su futuro vertido y la separación del efluente normalizado de los fangos a purgar posteriormente.

## 2. JUSTIFICACIÓN

La contaminación de las aguas por materia orgánica produce entre otros efectos la disminución de la vida acuática, el incremento de las enfermedades de origen hídrico, el deterioro de la calidad del curso del agua y la ruptura del equilibrio ecológico.

El exceso de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo generan importantes impactos sobre el agua ya que pueden incidir en la estabilidad, contribuyendo al agotamiento del oxígeno, de los ecosistemas acuáticos, la eutrofización y la incorporación de niveles tóxicos que afecten a las comunidades biológicas y la salud humana.

Para minimizar el impacto medioambiental de las actividades humanas, es necesario tratar las aguas residuales tras su uso para disminuir su carga contaminante, restituyendo en parte su calidad inicial antes de devolverla a los ciclos naturales.

El motivo principal es defender la salud pública y el medio ambiente. Si las aguas residuales no son tratadas y se vierten directamente a ríos, lagos o mares, es bastante probable introducir elementos de contaminación que acaben produciendo importantes daños ecológicos en el entorno ambiental y enfermedades de salud pública (causadas por virus y bacterias) en las personas y comunidades que entren en contacto con esas aguas contaminadas.

### **3. ANTECEDENTES**

#### **3.1. Estación depuradora de aguas residuales**

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.

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.

Por tanto, la depuración de las aguas residuales tiene como objetivo:

- Proteger el Medio Ambiente reduciendo la contaminación de las aguas tratadas
- Al mismo tiempo, se ha de procurar que el consumo de energía sea el menor posible y aprovechar los subproductos del tratamiento.

## **3.2. Tratamiento por fangos activos. Historia**

La recogida de aguas residuales tiene su primer precedente en el siglo XIX, aunque la captación y drenaje de aguas pluviales datan de tiempos antiguos. Los griegos fueron los primeros en interesarse por la calidad del agua y los romanos se posicionaron como auténticos arquitectos en el transporte y retención del agua. Pero fue a partir del desarrollo de la teoría del germen por Kosch y Pasteur lo que marcó una época de tratamiento sistemático de las aguas residuales y de saneamiento.

En el año 1806, en París, empieza a funcionar la mayor planta de tratamiento de agua. El agua sedimenta durante 12 horas antes de su paso por los filtros de arena y carbón.

James Simphon, en el año 1827, ideó un filtro de arena para la purificación del agua potable. Actualmente todavía se considera el primer sistema efectivo utilizado con fines de salud pública.

En 1882, se produjeron los primeros ensayos de aireación de efluentes; nació el sistema de tratamiento de aguas residuales mediante fangos activos. Fueron los ingenieros Arden y Lockett quienes observaron que cualquier agua residual que se someta a un proceso de aireación durante un determinado período de tiempo reduce su contenido en materia orgánica, mientras se forma un lodo floculento.

Al ser examinado microscópicamente, estos fangos revelan una población heterogénea de microorganismos que cambian constantemente en función de las condiciones ambientales y la variación en la composición de las aguas residuales.

El tratamiento biológico de aguas residuales por fangos activos se presenta como el desarrollo de un cultivo bacteriano disperso en flóculos emplazado en un depósito con aireación sistemática. La materia orgánica sirve de alimento de estas bacterias aerobias. El licor de mezcla, después del adecuado contacto, se traslada a un clarificador (decantador) para separar el agua depurada de los fangos. Se realiza una recirculación de una parte de estos fangos para mantener una adecuada concentración de bacterias en el depósito, mientras que el resto se purga.

Hoy en día, el proceso de fangos activos es el más utilizado tanto para tratamiento de las aguas urbanas como de las aguas industriales.

### **3.3. Caracterización de 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.

Los principales parámetros se comentan a continuación.

#### **3.3.1. $DBO_5$ (Demanda Bioquímica de Oxígeno, mg/L)**

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.

#### **3.3.2. DQO (Demanda Química de Oxígeno, mg/L)**

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

#### **3.3.3. 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.

#### **3.3.4. 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 los sólidos totales son la suma de los sólidos disueltos totales (SDT) y sólidos en suspensión totales (SST).

#### **3.3.5. Sólidos en suspensión volátiles (SSV)**

Los sólidos en suspensión volátiles (SSV), se determinan mediante un proceso de calcinación a 500 - 550 °C. Se corresponden con los sólidos que volatilizan (desaparecen por combustión) a esa temperatura. Además, el término SSV se suele usar para determinar el contenido en biomasa de un determinado licor de mezcla.



### 3.3.6. pH

La velocidad o el ritmo de las reacciones químicas pueden ser alterados significativamente por el pH de la solución, la solubilidad y su disponibilidad biológica dependen de este. Las enzimas son activas en un estrecho corredor alrededor de un pH determinado, y que, normalmente se sitúa entre pH=6,5 y pH=8,5.

### 3.3.7. Conductividad ( $\mu S/cm$ )

La conductividad del agua es un valor muy utilizado para determinar el contenido de sales disueltas en ella. Es el inverso de la resistencia que opone el agua al paso de la corriente eléctrica.

### 3.3.8. Nitrógeno (NT, ppm)

El nitrógeno es un elemento importante en las aguas residuales ya que es necesario para el crecimiento de los microorganismos. Si el agua residual no contiene suficiente de este, durante el tratamiento secundario ocurrirán problemas de deficiencia. Por otra parte, de no ser eliminado hasta valores adecuados previamente al vertido de este sobre los cursos superficiales del agua reduce el oxígeno disuelto, es tóxico para el ecosistema acuático y entraña un riesgo para la salud pública.

### 3.3.9. Nitrógeno Kjeldahl (NKT)

El nitrógeno Kjeldahl es un indicador que refleja la cantidad total de nitrógeno en el agua analizada, suma del nitrógeno orgánico en sus diversas formas y el ion amonio  $NH_4^+$ . Mide el nitrógeno capaz de ser nitrificado a nitritos y nitratos, y posteriormente desnitrificado a nitrógeno gaseoso.

### 3.3.10. Fósforo (PT, ppm)

El fósforo, uno de los principales constituyentes de los detergentes sintéticos, se encuentra en las soluciones acuosas como ortofosfatos y polifosfatos. De la primera forma están disponibles para el metabolismo biológico sin disociaciones posteriores, mientras que de la segunda forma son moléculas de dos o más átomos que acaban convirtiéndose, tras un proceso lento de hidrólisis, en ortofosfatos. Este nutriente es de los cuales contribuyen en mayor grado a la eutrofización de las aguas provocando importantes problemas de calidad de agua, y aumentando los costes de purificación de esta.

### 3.3.11. Temperatura

El efecto de la temperatura sobre la actividad enzimática es doble. Como en muchas reacciones químicas, la velocidad de reacción se incrementa con la elevación de la temperatura, pero por otra parte esta misma elevación de temperatura provoca una mayor inestabilidad de las enzimas. La depuración biológica se desarrolla de forma adecuada entre los límites de 12°C y 38°C.

## **3.4. Fases del tratamiento**

### **3.4.1. Fase 0: Pretratamiento**

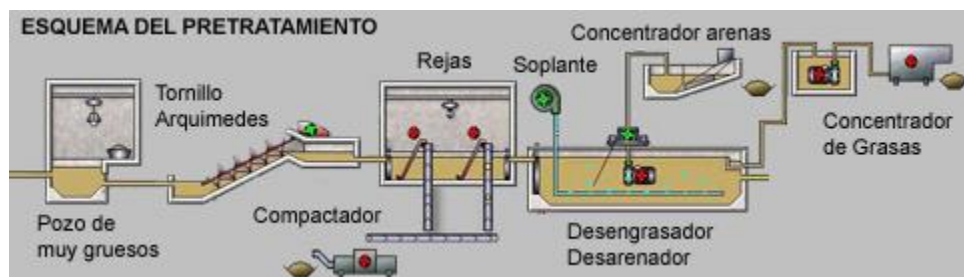
Las aguas brutas antes de su tratamiento se someten generalmente a una serie de operaciones físicas y mecánicas, que tienen por objeto separar del agua residual la mayor cantidad de elementos que por su naturaleza o tamaño, causarían problemas en los tratamientos posteriores.

En algunos casos, y debido a problemas relativos a la calidad del efluente, es necesario incluir operaciones de carácter mecánico o químico cuyo fin es mejorar la calidad del agua para asegurar una mayor efectividad de los procesos posteriores.

Mediante las operaciones del pretratamiento se elimina generalmente la parte de contaminación más visible y molesta desde el punto de explotación, como pueden ser sólidos de grandes dimensiones, arenas y grasas.

Es indispensable dar a esta fase la importancia que se merece, con un correcto diseño y explotación, porque cualquier defecto puede repercutir negativamente en el resto de la instalación.

A continuación, en la figura 1, se observa un posible pretratamiento aplicable.



*Figura 1: Esquema de un pretratamiento estándar (Fuente: [www.estrucplan.com](http://www.estrucplan.com))*

### **3.4.2. Fase 1: Tratamiento primario**

El principal objetivo del tratamiento primario es la reducción de los sólidos en suspensión del agua residual. Generalmente, parte de los sólidos en suspensión están constituidos por materia orgánica, de ahí que la principal consecuencia del tratamiento primario sea reducir la demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>).

Los principales tipos de procesos utilizados en la depuración de aguas residuales son:

Los procesos de separación sólido-líquido (Decantación primaria, Flotación, proceso mixto de ambos).

Los procesos complementarios de mejora (Floculación, Coagulación).

De los cuales el prácticamente omnipresente es el decantador primario que elimina los sólidos sedimentables y materias flotables bajo la exclusiva acción de la gravedad.

En la figura 2, se presenta la fotografía un decantador primario.



Figura 2: Decantador primario (Fuente: [www.massscience.com](http://www.massscience.com))

### 3.4.3. Fase 2: Tratamiento secundario

El tratamiento secundario de depuración constituye una serie de importantes procesos de naturaleza biológica de tratamiento de las aguas residuales que tienen en común la utilización de microorganismos (entre las que destacan las bacterias) para llevar a cabo la eliminación de materia orgánica biodegradable, tanto coloidal como disuelta, así como la eliminación de compuestos que contienen elementos nutrientes (N y P).

En la mayor parte de los casos, la materia orgánica constituye la fuente de energía y de carbono que necesitan los microorganismos para su crecimiento. Además, también es necesaria la presencia de nutrientes, que contengan los elementos esenciales para el crecimiento, especialmente los compuestos que contengan N y P, y por último, en el caso de sistema aerobio, la presencia de oxígeno disuelto en el agua. Este último aspecto será clave a la hora de elegir el proceso biológico más conveniente.

La figura 3 expone un esquema de un tratamiento secundario formado por un reactor biológico y un decantador.

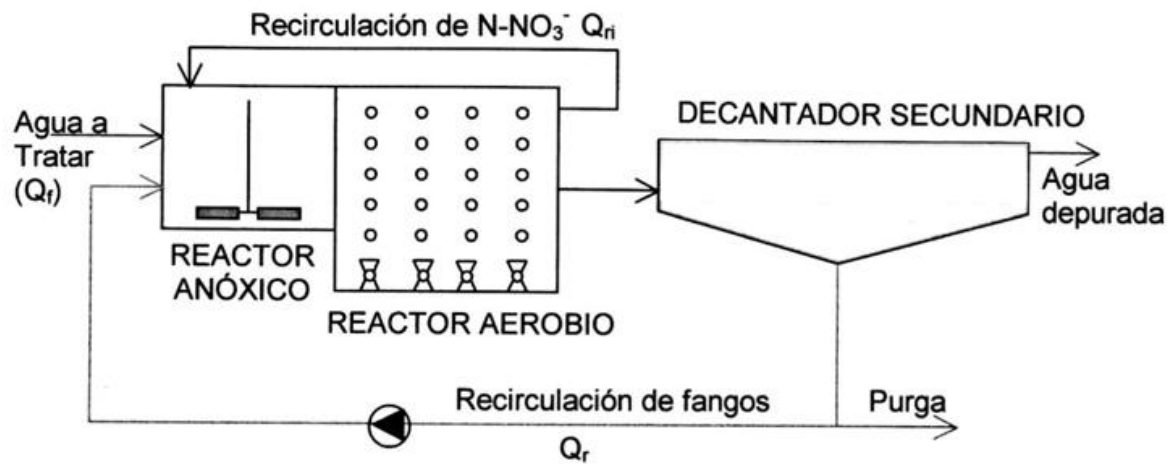


Figura 3: Tratamiento secundario formado por reactor, anóxico y aerobio, y decantador. (Fuente: apuntes asignatura Tratamiento de Aguas residuales 2016-2017)

#### 3.4.4. Fase 3: Tratamiento terciario

El objetivo de los tratamientos terciarios es eliminar los elementos no aprovechables como la materia en suspensión, la DQO y los compuestos específicos (pesticidas, metales, o detergentes). Su propósito es mejorar la calidad del agua depurada antes de verterla al medio natural o de reutilizarla. Los tratamientos terciarios complementan los tratamientos primarios y secundarios.

Existen varios tipos, todos ellos con el mismo fin, mineralizar el agua reduciendo su ionización:

- Adsorción, basado en la adición en la muestra de carbón activo, gel de sílice o alúmina. Sirven principalmente para eliminar detergentes, colorantes, disolventes clorados, olores y sabores.
- Intercambio iónico, se intercambian aniones y cationes para conseguir una mayor pureza en la muestra.
- Por membranas, se hace pasar un flujo de agua por una membrana que separa los sólidos en suspensión (SS) disueltos.

#### 3.4.5. Línea de fangos

Durante el tratamiento de las aguas residuales, se generan una serie de subproductos denominados fangos, donde se concentra la contaminación eliminada.

Las principales fuentes de producción de fangos son el tratamiento primario y secundario. Presentan las siguientes características problemáticas: ocupan un volumen importante, formados por gran cantidad de material orgánico potencialmente putrefacto y maloliente y contienen organismos patógenos peligrosos.

Para tratar con el debido cuidado los anteriores factores se deben seguir una serie de etapas:

- Espesamiento y deshidratación: reducir el agua presente en los fangos para evitar grandes volúmenes.
- Estabilización: digestión de la materia orgánica para evitar futuros problemas de putrefacción y fermentación.
- Secado: convertirlos en material transportable.

En la figura 4, se puede ver el organigrama de las diferentes fases por las que circularán las aguas residuales.

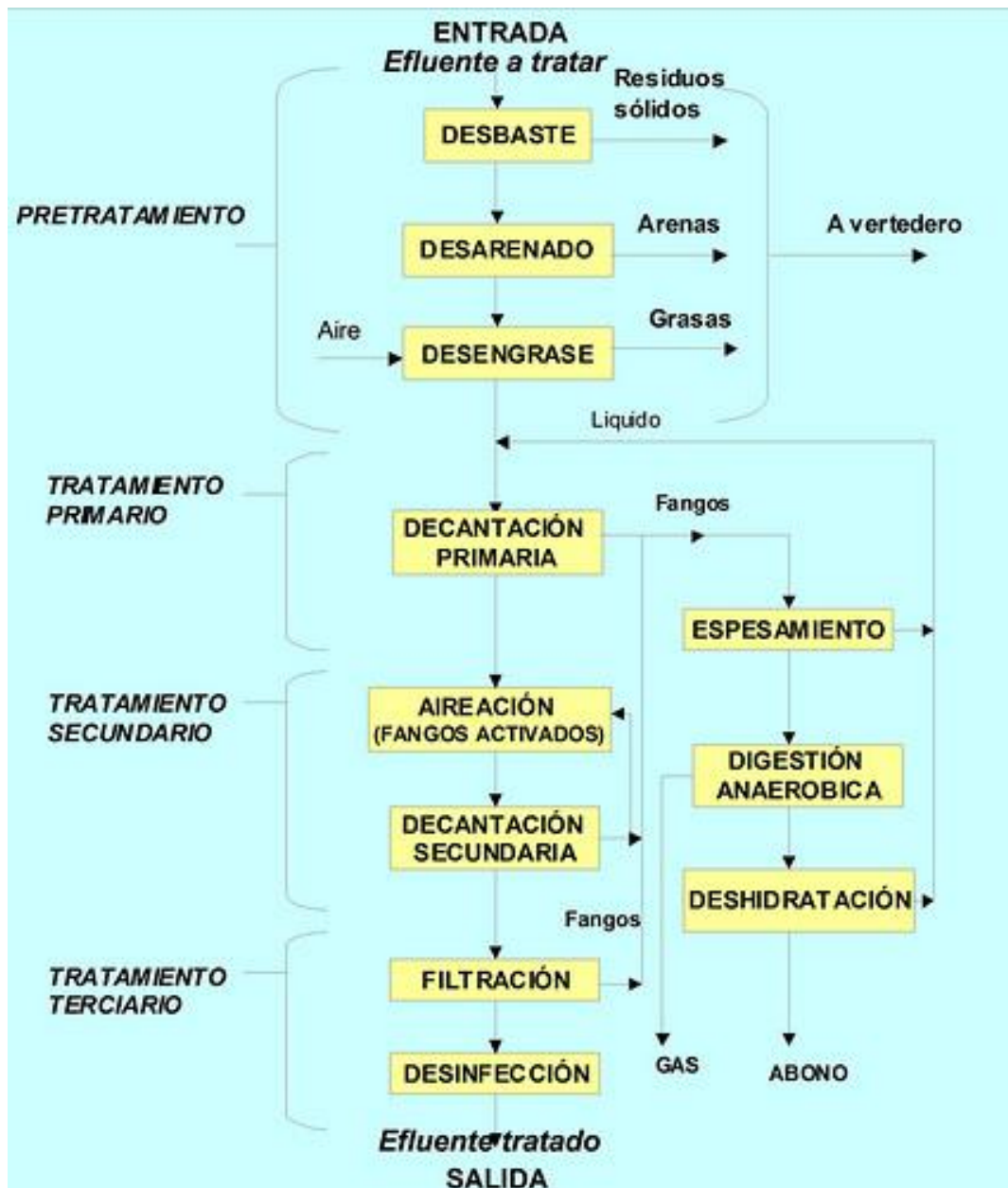


Figura 4: Esquema general de las diferentes etapas de una EDAR (Fuente: [www.flickrriver.com](http://www.flickrriver.com))

### **3.5. Eliminación de la materia orgánica**

La materia orgánica biodegradable es metabolizada en el reactor de fangos activos por los microorganismos heterótrofos. Por un lado, esta materia orgánica se emplea para la ganancia de energía mientras que la otra parte se incorpora al sustrato celular. En el clarificador, los flóculos bacterianos son separados del agua depurada mientras que el concentrado es recirculado al reactor; purgándose una cierta cantidad para evitar acumulación en el reactor.

Los diferentes procesos de conversión en el reactor son:

#### **3.5.1. Crecimiento de los microorganismos**

Descrito por la relación entre velocidad de crecimiento y producción de biomasa.

#### **3.5.2. Hidrólisis**

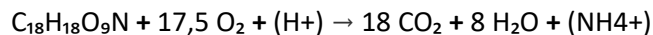
Es la transformación de materia lentamente biodegradable en sustancias rápidamente biodegradables; aunque en sentido estricto la hidrólisis es la descomposición de un polímero en pequeñas unidades.

#### **3.5.3. Respiración endógena**

Son todos aquellos procesos conducentes a la pérdida de masa de los microorganismos, como por ejemplo cualquier operación para su mantenimiento energético desde la lisis hasta la predación de unos microorganismos por otros.

Como se ha comentado anteriormente, la materia orgánica que penetra en el reactor de fangos activos puede ser o asimilada por la biomasa u oxidada.

Siendo representada la materia orgánica como  $C_{18}H_{18}O_9N$ , la reacción de oxidación sería la siguiente:



Estequiométricamente se consumen 1,42 kg  $O_2$  para la oxidación de 1 kg de materia orgánica.

### **3.6. Eliminación biológica de nitrógeno**

Debido a las altas concentraciones de nutrientes como nitrógeno y fósforo, el vertido del efluente de la depuradora puede provocar en determinadas zonas, denominadas sensibles, un crecimiento excesivo de vegetación acuática, el llamado fenómeno de eutrofización.

En la tabla 1 se puede observar la concentración de estos nutrientes en el efluente de salida de la EDAR en función del tamaño de la misma.

*Tabla 1: Concentración de nutrientes en función del tamaño de la EDAR.*

	N total (mg/L)	P total (mg/L)
EDAR > 10 <sup>5</sup> HE	15	2
EDAR < 10 <sup>5</sup> HE	10	1

El nitrógeno puede presentarse hasta de cuatro formas distintas en el agua residual:

- Nitrógeno orgánico
- Nitrógeno amoniacal
- Nitrito
- Nitrato

El origen del nitrógeno, que se estima en un 60% nitrógeno amoniacal y un 40% nitrógeno orgánico, que alcanza el medio acuático procede tanto de fuentes naturales como artificiales.

Precipitaciones, polvo, escorrentía proceden de la misma naturaleza mientras que las actividades humanas como aguas residuales, drenaje de tierras, y filtraciones forman la parte de origen artificial.

En las aguas residuales, la eliminación del nitrógeno se realiza generalmente mediante el proceso de fangos activos. Los procesos que se llevan a cabo son:

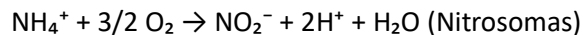
- Nitrificación, es decir transformación del nitrógeno amoniacal en nitratos.
- Desnitrificación, que consiste en la transformación de nitratos en N<sub>2</sub>

### 3.6.1. Nitrificación

A continuación, vemos las fases del proceso biológico aerobio por el cual el nitrógeno amoniacal es transformado en nitratos a través de dos fases mediatizadas por diferentes microorganismos.

El nitrógeno orgánico biodegradable del agua residual se hidroliza por microorganismos heterótrofos transformándose en nitrógeno amoniacal que a su vez sufre la nitrificación. En contraste con los organismos autótrofos, los heterótrofos son aquellos que deben alimentarse con las sustancias orgánicas sintetizadas por otros organismos, bien autótrofos o heterótrofos a su vez,

#### *Fase 1*



#### *Fase 2*



Las bacterias oxidantes de nitrógeno amoniacal, principalmente nitrosomas, y las oxidantes de nitritos, principalmente nitrobacter, se complementan de manera que las últimas consumen los productos de oxidación de las primeras.

#### *Reacción total.*



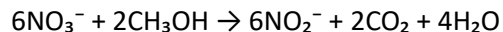
Las bacterias nitrificantes son bacterias autótrofas, organismos que producen su masa celular y materia orgánica a partir del dióxido de carbono, que es inorgánico, como única fuente de carbono, usando la luz o sustancias químicas como fuente de energía. En este caso, a partir de la oxidación del amonio obtienen la energía para la construcción celular y sintetizan el material celular a partir de CO<sub>2</sub>.



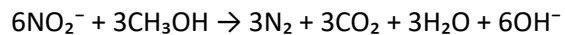
### 3.6.2. Desnitrificación

En ausencia de oxígeno determinadas bacterias utilizan los nitratos para su respiración. Se produce una reducción de  $\text{N-NO}_3$  a  $\text{N}_2$ .

#### *Fase 1*



#### *Fase 2*



#### *Reacción total*



Esta reacción reporta una ganancia energética menor que la que proporciona la oxidación de la materia orgánica, por lo tanto, sólo se producirán reacciones de desnitrificación en ausencia de  $\text{O}_2$ .

#### Proceso eliminación de nitrógeno

El agua residual entra en el reactor anóxico, al cual se le recircula el licor de mezcla nitrificado desde la salida del reactor aerobio. Para la eliminación de nitratos en el reactor anóxico se utiliza el carbono presente en el agua. Sin alterarse, el nitrógeno amoniacal atraviesa el reactor anóxico, oxidándose en el reactor aerobio a nitratos.

A continuación, en la figura 5, se observan las fases y destinos del nitrógeno.

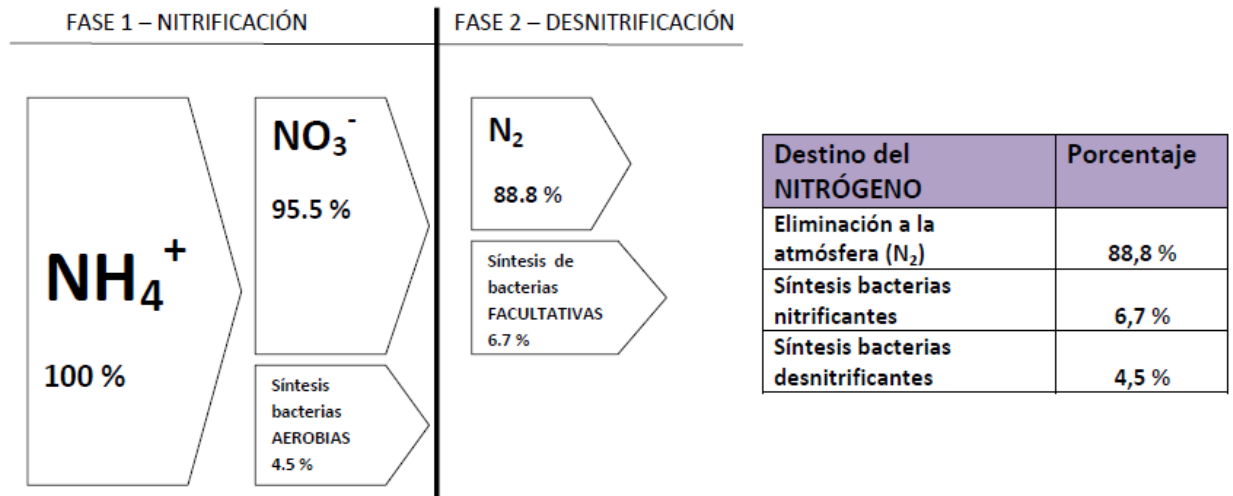


Figura 5: Fases del nitrógeno (Fuente: [www.aguaymascosas.com](http://www.aguaymascosas.com))

### **3.7. Eliminación del Fósforo**

La base de muchas estructuras celulares es el fósforo al siendo pues un nutriente imprescindible para todos los organismos.

Este nutriente procede generalmente de los vertidos tanto de residuos alimenticios como residuos biológicos humanos, además de compuestos inorgánicos usados en detergentes domésticos y comerciales.

El fósforo puede presentarse de tres formas diferentes:

- Ortofosfato
- Polifosfato
- Fósforo orgánico

En los tratamientos de aguas residuales una parte del fósforo disuelto puede ser absorbido sobre los flóculos o principalmente asimilado por los microorganismos para la realización de la síntesis de la biomasa. Además de ser eliminado mediante precipitación de componentes químicos. La relación de  $\text{DBO}_5/\text{P}$  tiene que ser de 100/1 aproximadamente.

## 4. TRATAMIENTO SECUNDARIO. FANGOS ACTIVOS

Las aguas residuales, tras una etapa de pretratamiento, se introducen en un reactor biológico, en el que se mantiene un cultivo bacteriano en suspensión, formado por un gran número de microorganismos agrupados en flóculos, denominado "licor mezcla". Las condiciones aerobias en el reactor se logran mediante aireadores mecánicos (turbinas o eyectores) o difusores. El sistema de aireación, además de oxigenar, permite la homogenización del licor mezcla, evitando la sedimentación de los lodos.

Tras un tiempo de retención en el reactor, el licor mezcla pasa a un sedimentador secundario, que puede ser independiente del reactor o formar parte del mismo, cuya función es separar el efluente depurado de los lodos. Parte de los lodos se recirculan de nuevo al reactor, con objeto de mantener una concentración determinada de microorganismos y el resto, denominados lodos en exceso, se purgan periódicamente.

Se distinguen por lo tanto cinco operaciones diferenciadas:

- La oxidación, que se realiza en el reactor biológico por medio de los microorganismos.
- La aireación, que suministra el oxígeno necesario para que se produzcan las reacciones de oxidación realizadas por los citados microorganismos.
- La decantación, donde tiene lugar la separación sólido-líquido.
- La recirculación de lodos, para mantener la concentración de microorganismos en el reactor.
- La extracción de los lodos en exceso.

La edad del fango ( $\theta$ ) y la carga másica (CM) son los dos parámetros fundamentales de diseño y operación de este tipo de procesos.

### Edad del fango

La edad del fango (SRT: Sludge Retention Time) corresponde al tiempo de retención de los microorganismos en el reactor y se mide en días.

La Edad del fango condiciona la aparición de una nitrificación total o estable y está directamente relacionada con la carga másica por lo que representa la relación existente entre la masa de fangos en el reactor y la masa de fangos en exceso extraídos por unidad de tiempo.

### *Ventajas de la edad del fango*

La edad del fango permite limitar la influencia de las materias inertes. La extracción directa de los fangos en exceso de las cubas de aeración permite un control muy simple de la edad del fango. Es suficiente purgar diariamente un volumen de fangos, igual al volumen de los tanques de aeración, dividido por el número de días de la edad del fango, con una pequeña corrección debida a las materias en suspensión del agua tratada. Este parámetro se utiliza en numerosos procesos de tratamiento biológico: nitrificación, desnitrificación, estabilización aerobia de los fangos y digestión anaerobia.

### *Inconvenientes de la edad del fango*

No se puede hablar de nitrificación sin hacer referencia a la edad del fango. Existe menos literatura en comparación con la CM, por lo que su comprensión puede presentar alguna dificultad.

### Carga másica

La carga másica se define como la relación entre la materia orgánica que entra al reactor por unidad de tiempo y la cantidad de microorganismos existentes en el reactor y se mide en  $\text{kg DBO}_5/\text{kg MLSSdía}$

#### *Inconvenientes de trabajar sobre la base de la CM*

La carga másica queda demasiado afectada por el contenido en materias inertes, minerales o volátiles, ya que la carga másica es una relación en la que interviene la materia en suspensión total del reactor y no la materia activa, sólo representa una aproximación de la carga biológica real. Para la determinación de la carga másica es necesario conocer: la concentración ponderada diaria de  $\text{DBO}_5$ , el volumen diario de agua, y la concentración media en las cubas de aeración. Para medir la  $\text{DBO}_5$  se necesitan cinco días, por lo tanto, las modificaciones de las condiciones de operación de una planta no pueden hacerse de forma rápida.

#### *Ventajas de la CM*

La CM es un parámetro muy utilizado, existe mucha documentación y datos de referencia sobre la misma, tanto tablas de datos empíricos como gráficos de evolución.

## **4.1. Clasificación del proceso de fangos activos**

Se puede llevar a cabo una clasificación del proceso de Fangos Activos según el valor de la carga másica. En la tabla 2 se muestra dicha clasificación y las características más importantes en cada proceso.

*Tabla 2: Clasificación procesos fangos activos*

PROCESO	$C_M$	Reducción $\text{DBO}_5$	SSLM ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )	CARACTERÍSTICAS
<b>Aireación prolongada (Oxidación prolongada)</b>	$< 0,1$ ( $< 0,05$ )	$\geq 95 \%$	3,5 - 4,5	Metabolismo endógeno de los $\mu\text{org.}$ EDAR $< 20000$ HE Reactor gran dimensión $t_R$ 24 horas No hay decantador 1 <sup>ario</sup> Fango purga estabilizado $r > 1$
<b>Convencional</b>	$0,2 < C_M < 0,5$	85 - 95 %	2,5 - 3,5	- EDAR $> 20000$ HE - $r$ entre 0,5 y 1 - $t_R$ entre 4 y 8 horas
<b>Alta carga</b>	$> 0,5$	50 - 75 %	0,5 - 1,0	- EDARU con importantes aportes de ARI - $(dS/dt)$ es $> (dS/dt)$ proceso convencional - 1 <sup>era</sup> etapa en un sistema de 2 etapas

				- Proporciona una entrada homogénea al R biológico y elimina por <b>adsorción</b> Metales pesados.
--	--	--	--	--

## **4.2. Aireación Prolongada**

La Aireación Prolongada es una variante dentro de los procesos de fangos activos para el tratamiento biológico de las aguas residuales en condiciones aerobias.

El proceso funciona en la fase de respiración endógena, lo cual precisa una carga másica reducida y una edad del fango alta. Los periodos de retención también son importantes, superiores a 24 horas.

Al seleccionar la Aireación prolongada como proceso a utilizar, se debe tener en cuenta que se realiza con tiempos de retención hidráulica y de retención celular muy elevados para la estabilización aeróbica del fango. La edad del fango se sitúa en los manuales de parámetros generalmente entre 15 y 20 días. Para nuestro reactor elegiremos **18 días** como edad del fango, mientras que la carga másica deberá situarse en **CM <0,1** para cumplir con las condiciones de la aireación prolongada.

## **4.3. Otros parámetros de operación**

Existen otros parámetros a tener en cuenta a la hora de optar como tratamiento secundario Aireación Prolongada. Estos son:

### *Coste de explotación y mantenimiento*

El consumo energético de toda la instalación varía entre 2 y 2,5 kWh por kg de DBO5 eliminado, siempre que exista un sistema automático de regulación del oxígeno disuelto en el reactor.

### *Impactos medioambientales*

La aireación prolongada produce impactos sonoros asociados, básicamente, al funcionamiento de los equipos de aireación (compresores, soplantes, turbinas, etc.), que pueden ser parcialmente amortiguados mediante el aislamiento o insonorización de estos equipos.

El nivel de olor generado es bajo, debido a la ausencia de fangos primarios y a que los fangos en exceso extraídos se encuentran estabilizados.

Los impactos visuales vienen condicionados por la forma, más o menos elevada, en que se lleve a cabo la implantación de los distintos elementos constitutivos del tratamiento.

### *Complejidad de explotación y mantenimiento*

Debido al número de parámetros a controlar, se trata de un tratamiento que presenta cierta complejidad de explotación y, por tanto, si se quiere mantener una calidad del efluente estable, se recomienda la presencia continua de personal cualificado, al menos en las plantas de mayor tamaño. Además, los equipos electromecánicos necesitan un mantenimiento tanto preventivo, como correctivo.

El tema más importante desde el punto de vista de operación de la instalación es el control del oxígeno disuelto en el reactor biológico, que precisa al menos de un medidor de  $O_2$ , que hay que mantener de forma continua. En plantas medianas y grandes se suelen incluir sistemas automáticos que controlan la producción de aire en función del oxígeno disuelto en el reactor. La eficiencia energética de este tratamiento depende del funcionamiento de estos controles.

#### *Flexibilidad ante variaciones de caudal y carga*

En general, se trata de un tratamiento fiable y flexible, siempre que se lleve a cabo un diseño adecuado. Al operar con tiempos de retención muy altos, el reactor biológico presenta una elevada capacidad para absorber las variaciones diarias de caudal y de contaminación, soportando puntas superiores a tres veces la contaminación media, sin que el proceso se vea afectado, siempre que se disponga de la suficiente capacidad de aireación.

#### *Influencia de las características del terreno*

Al requerirse poca superficie para la construcción de este tipo de tratamiento, las características del terreno disponible para su implantación ejercen una escasa influencia sobre su posible elección. No obstante, al construirse normalmente el reactor y la etapa de decantación por excavación, aquellos terrenos fáciles de excavar y con el nivel freático bajo, serán los que reúnan las mejores condiciones para la implantación de este tipo de tratamiento.

#### *Influencia de la temperatura*

La temperatura es el factor que más influye en el comportamiento de este tipo de tratamiento, al igual que ocurre en todos los que se basan en procesos biológicos, dado que la velocidad de estos procesos se incrementa con la temperatura.

La temperatura influye en el cálculo del volumen del reactor biológico al determinar la edad del lodo y la carga másica necesarias para conseguir la estabilización de los lodos activos. También, influye en las necesidades de oxígeno, en el nivel de solubilidad de éste en el agua (disminuye al incrementarse la temperatura), en la transferencia de gases y en las características de sedimentación del licor mezcla.

## 5. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

El efluente de aguas urbanas de una población de 60 000 habitantes equivalentes, tras pasar por las etapas de pretratamiento consistente en desbaste y desarenado-desengrasado, y por el tratamiento primario formado generalmente por un decantador y el añadido de productos químicos, alcanzará el tratamiento secundario.

Este tratamiento secundario está ideado para la eliminación de materia orgánica y nutrientes. En este preciso caso se contará con *dos líneas paralelas* de recorrido, es decir, un par de reactores y un par de decantadores con sus respectivos equipos de bombeo e interconexiones. Esta decisión afecta positivamente a la eficiencia operativa de los trabajadores y al rendimiento de la instalación, siendo consecuentes con un aumento en el coste de instalación. Todo el tratamiento secundario está localizado en un área rectangular de  $5092 m^2$ , teniendo en cuentas dimensiones de los reactores, decantadores (separación entre estos de 8,375 m), tuberías, depósitos, y un margen de 6 m con los bordes.

En primer lugar, el caudal entrará en la cuba de aireación o reactor biológico, diseñado para un proceso de aireación prolongada. Este, en una disposición geométrica rectangular, tendrá una capacidad volumétrica de  $7922 m^3$  con unas dimensiones de *48,75 x 16,25 x 5 metros*.

El reactor estará dividido físicamente en dos, zona anóxica en cabecera (30% del volumen del reactor) y zona aerobia a continuación, por una pared que ocupe el 80% del ancho para permitir el flujo de un lado a otro.

En la zona anóxica estará instalado, para evitar la sedimentación del fango activo, un agitador sumergible horizontal de la *marca SULZER, modelo Gama ABS XRW 900/50hz; con un motor de 22 kW* de potencia y un rendimiento del 92%.

Por otra parte, en la zona aerobia, para una correcta oxigenación, se dispondrá de un sistema de aireación formado por *245 difusores* de disco de gama *ABS Sucoflow DS SULZER* colocados gradualmente y por *3 turbo compresores (1 de reserva)* de la *marca SULZER tipo HST 20-4500-1-125 de 170 CV*.

El reactor contará con una recirculación interna de caudal  $7500 m^3/d$  (pero se calcula para las necesidades de caudal máximo:  $520,3 m^3/h$ ) desde la parte aerobia hasta la zona anóxica por una *tubería de polietileno de diámetro interior 440,6 mm y de diámetro exterior 500 mm*, con 3 codos de  $90^\circ$  y una válvula, y una altura a superar de *5,27 metros* que se solventará con una bomba para aguas residuales *FLYGT N 3153 en conexión horizontal* con una potencia de hasta 15 kW.

Además, para obtener una concentración adecuada de fósforo, a la salida de la planta, se instalará un depósito de capacidad  $240 m^3$ , fabricado en poliéster reforzado con fibra de vidrio conteniendo cloruro férrico con una concentración de *40 000 ppm* y un caudal de dosificación de  $8 m^3$  diarios introducidos al final de la etapa aerobia del reactor, pudiéndose regular siempre el caudal de dosificación para mantener la concentración óptima de cloruro férrico de 12,7 ppm.

El siguiente paso del efluente es penetrar en el decantador secundario de volumen  $1041 m^3$  y de disposición espacial tronco cónica de dimensiones Diámetro=21m, Altura=3,1m. La inclinación de la solera



será del 3% y para impedir la deposición de los lodos tendrá un mecanismo de paletas rascadoras. Con un mecanismo de rebosamiento, las aguas clarificadas irán a parar conducidas por una tubería a la zona de vertido.

El decantador estará interconectado con el reactor para ejecutar una recirculación externa de caudal  $7125 \text{ m}^3/\text{d}$  (pero se calcula para las necesidades de caudal máximo:  $494,3 \text{ m}^3/\text{h}$ ), desde la toma de aguas hasta la parte de arriba de la zona anóxica por una *tubería de polietileno de diámetro interior 440,6 mm y de diámetro exterior 500 mm*, con 3 codos de  $90^\circ$  y una válvula, y una altura a superar de *5,32 metros*. El caudal recirculado estará impulsado por otra bomba para aguas residuales *FLYGT N 3153 en conexión horizontal* con una potencia de hasta 15 kW.

Así, se tendrá tres efluentes salientes distintos: agua depurada cumpliendo los requisitos de la normativa europea para su vertido, que podrá ser posteriormente sometido a un tratamiento terciario centrándose en una eliminación más específica debido a las zonas sensibles de futuro destino, recirculación externa para mantener el nivel de microorganismo en el reactor biológico y finalmente un efluente de  $218 \text{ m}^3$  recogido en la poceta de fangos de  $13,625 \text{ m}^3$  de volumen durante 3 horas. Este último continuará hasta la línea de fangos donde será sometido al correspondiente procesamiento de lodos.

## 6. ESTUDIO ECONÓMICO

En este apartado se analiza el coste total mensual de la instalación diseñada para el tratamiento secundario.

### 6.1. Energía

Tabla 3: Estudio económico energético

Equipo	Unidades	Medida	Consumo	Precio	Coste	Coste Mensual
Bombas	4	kW	18,63	0,1230 €/kWh	9,17 €/h	6599,49 €
Turbo Compresores	4	kW	125	0,1230 €/kWh	61,5 €/h	44280 €
Agitador	2	kW	23,91	0,1230 €/kWh	5,88 €/h	4233,60 €
Rasquetas	2	kW	1,8	0,1230 €/kWh	0,44 €/h	318,82 €
Potencia contratada	1	kW	775	35,65 €/kW.Año	27628,75	2302,40 €
					Total	57734,31€

(Los precios de consumo energético, se han estimado sin discriminación horaria y que la potencia contratada solamente corresponde a esta etapa de la EDAR)

### 6.2. Personal

Tabla 4: Estudio económico mano de obra

Equipo	Unidades	Medida	Coste	Coste Mensual
Operarios	3	Uds	8,48 €/h	4071,15 €
Jefe de Planta	1	Uds	12,36€/h	1483,2€
			Total	5554,35 €

### 6.3. Material

Tabla 5: Estudio económico del material necesario

Equipo	Unidades	Medida	Consumo mensual	Precio	Coste Mensual
Cloruro Férrico	1	Litros	240	0,35 €/litro	84 €

## **6.4. Mantenimiento**

El coste de mantenimiento de la etapa de tratamiento secundario en las estaciones depuradoras de aguas urbanas corresponde aproximadamente a un 5% del resto de gastos mensuales, en los que se incluyen gastos administrativos, mantenimiento y conservación obra civil y mantenimiento y conservación de los equipos instalados.

Coste mensual de mantenimiento  $\rightarrow 0,05 \times 63\,372,66 = 3168,63\text{€}$

Por lo tanto, tras el estudio económico, se deduce un coste mensual de 66541,29 €, equivalente a un coste anual de 798 495,52€.

Sabiendo que se eliminan unos 2025 kg de  $DBO_5$  al día, lo que supone 729000 kg de  $DBO_5$  al año; su eliminación tiene un coste de 1,095€/kg de  $DBO_5$ .

Sabiendo que el caudal medio es  $15\,000\text{ m}^3$  al día, se obtiene un efluente anual de  $5\,475\,000\text{ m}^3$ ; el tratamiento del caudal de agua residual tiene un coste de  $0,146\text{ €/m}^3$ .

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- AURELIO HERNANDEZ MUÑOZ. Depuración de aguas residuales, 2ª edición revisada y ampliada (1992)
- R.S. RAMALHO. Tratamiento de aguas residuales, edición revisada, título original “Introduction to wastewater Treatment processes” second edition (2003)
- JUAN ANTONIO CORTACANS TORRE. Fangos Activos. Eliminación biológica de nutrientes, 2ª edición (2004)
- CEDEX. XXIV Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras. Tomo I (2006)
- CEDEX. XXIV Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras. Tomo II (2006)
- UNION EUROPEA. Directiva sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas (1991)
- ATV-STANDARD A131. Principios para el tratamiento de aguas residuales mediante fangos activados, para poblaciones de más de 5000 h-e (1991)
- METCALF-EDDY. Ingeniería de aguas residuales (1995)
- Base de datos del Instituto Valenciano de Edificación

### *Enlaces de interés*

- [www.xylemwatersolutions.com](http://www.xylemwatersolutions.com)
- [www.abs-bv.nl](http://www.abs-bv.nl)
- [www.sulzer.com](http://www.sulzer.com)
- [www.europolec.com](http://www.europolec.com)
- [www.biotanks.com](http://www.biotanks.com)
- [www.masa.es](http://www.masa.es)
- [www.directindustry.es](http://www.directindustry.es)
- [www.estrucplan.com](http://www.estrucplan.com)
- [www.masscience.com](http://www.masscience.com)

- [www.flickriver.com](http://www.flickriver.com)
- [www.aguaymascosas.com](http://www.aguaymascosas.com)
- [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

## 1. CÁLCULO DE LA INSTALACIÓN

### 1.1. Caracterización Agua residual

- Población: 60 000 Habitantes Equivalentes
- Dotación(l/HE): según tablas si la población está entre 50 000 y 500 000, la dotación se sitúa en el intervalo 250-300 litros diarios, siendo el primero el más utilizado) 250 (l/HE)
- Caudales de diseño:

*Caudal medio:*

$$Q_{med} \left( \frac{m^3}{d} \right) = \frac{\text{población(HE)} \times \text{Dotación(l)}}{1000 \left( \frac{1}{m^3} \right)} = \frac{60000 \times 250}{1000} = 15000 \text{ m}^3/d = 625 \text{ m}^3/h$$

*Caudal máximo* (incremento puntual, fórmula empírica)

$$Q_{max} = Q_{med} \times 1,15 + \frac{2,575}{\sqrt[4]{Q_{med}}} = 1040,625 \text{ m}^3/h$$

(Valores típicos de Qmax entre 1,5 Qmed y 2 Qmed)

*Caudal mínimo:*

Poblaciones grandes – 30% Qmed

Poblaciones pequeñas – 50% Qmed

Se utiliza el 40% de Qmed, Qmin = 0,4 x 625 = 250 m<sup>3</sup>/h

- Datos contaminación (se supone un tiempo de retención en el decantador 1º de >1h)

En la Tabla 6 se presenta la carga en el agua residual del reglamento ATV A-131.

*Tabla 6: Carga en el agua residual en g/HE día que se considera en el diseño de las EDAR de >5000 HE según el reglamento ATV A-131.*

	Valores habituales (g/HE día)
DBO <sub>5</sub>	40
SS	30
pH	7,5
Ntotal	10
Ptotal	2,3
DQO	80

- Concentraciones, tabla 7.

$$\text{Concentración(ppm)} = \frac{\text{Contaminación(g/HE día)} \times 1000}{\text{Dotación(l/HE día)}}$$

*Tabla 7: Concentraciones en el agua residual*

DBO <sub>5</sub>	160 ppm
SS	120 ppm
Ntotal	40 ppm
Ptotal	9,2 ppm
DQO	320 ppm

- Carga, tabla 8.

$$\text{Carga} = \frac{\text{Contaminación} \left( \frac{\text{g}}{\text{HE}} \text{ día} \right) \times \text{Población(HE)}}{1000}$$

*Tabla 8: Carga en el agua residual*

DBO <sub>5</sub>	2400 kg/d
SS	1800 kg/d
Ntotal	600 kg/d
Ptotal	138 kg/d
DQO	4800 kg/d

- Resultados a obtener (legislación), tabla 9.

*Tabla 9: Directiva del Consejo de las comunidades europeas sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas (91/271/CEE) y su transposición a la normativa española en RD 11/1995 del 28 de diciembre, RD 509/1996 del 15 de Marzo, RD 2116/1998 del 2 de Octubre.*

DBO <sub>5</sub> → 25 mg/l
SS → 35 mg/l
Ntotal → < 10 ppm
Ptotal → < 2 ppm
DQO → 125mg/l
PH → entre 6 y 8



## 1.2.Cálculo volumen reactor

### *Características del proceso de Aireación prolongada*

- Sencillez funcionamiento y explotación
- Con suficiente oxígeno hay nitrificación, y con pequeñas modificaciones se puede eliminar el nitrógeno añadiendo una etapa de desnitrificación
- Ahorrar proceso posterior estabilización del fango, ya que este sale completamente estabilizado del reactor
- Menor producción de fango que los reactores convencionales.
- Inconveniente: mayor volumen reactor y altos costes de explotación debido a los costes energéticos debidos a la agitación y aireación requerida.
- Rendimiento:  $\eta > 95\%$ .
- Tiempo retención aproximadamente 24 horas.
- Carga: [SSLM] se sitúa entre 3500 y 4500mg/l siendo el valor más utilizado para casos similares 4000mg/l
- Edad del fango estimada:  $\theta = 18$  días

### *Producción específica de fangos*

$$Pe = 0.75 + \frac{0,6 \times SSf}{DBO_5} - \frac{0,8 \times 0,17 \times 0,75 \times \theta \times Ft}{1 + 0,17 \times \theta \times Ft}$$

siendo  $Ft = 1.072^{T-15}$

Temperaturas promedio en Valencia (mes más frío 11°C, mes más caliente 25°C, media anual 18°C)

### *Carga másica*

$$CM = \frac{1}{Pe \times \theta}$$

En la tabla 10, se observan los diferentes resultados de CM a varias temperaturas.

*Tabla 10: Carga másica en función de la temperatura*

11°C	18°C	25°C
Ft=0,757	Ft=1,232	Ft=2,004
Pe=0,781	Pe=0,726	Pe=0,691
CM=0,071	CM=0,076	CM=0,08

La carga másica con la temperatura media total= 0,076 kgDBO<sub>5</sub>/kgSSLM

*Método 1*

$$V = \frac{\theta \times \Delta x}{SS} \rightarrow V=7841 \text{ m}^3$$

$$\Delta x = Pe \times DB0^5 f = 0,726 \times 2400 = 1742,4 \text{ KgSS/d}$$

*Método 2*

$$CM = \frac{DB0^5 f \times Qf}{SSLM \times V} \rightarrow V=7895 \text{ m}^3$$

Volumen reactor V= 7895 m<sup>3</sup>

*Rendimiento necesario eliminación DBO<sub>5</sub>*

$$r = \frac{(S_0 - S_e)}{S_0} = (160 - 25) / 160 = 85\%$$

## 2. RECIRCULACIÓN

### 2.1. Recirculación externa

Se establece una proporción del reactor anóxico en un 30% del total.

$$V_{\text{anox}}=2368 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{aero}}=5527 \text{ m}^3$$

$$r = \frac{\text{SSLM}}{\text{SSw} - \text{SSLM}}$$

Se estima una concentración de SS en la purga de 8000mg/l y siendo SSLM= 4000mg/l

$$r=4 / (8-4) = 1 \rightarrow r = \frac{Q_r}{Q_f} \rightarrow Q_r=Q_f = 15000 \text{ m}^3/\text{d}$$

La recirculación externa de cada línea será de 7500 m<sup>3</sup>/d.

### 2.2. Recirculación interna

La recirculación interna se efectúa para ayudar a que haya una correcta desnitrificación. El agua de entrada al ser escasa en nitratos tiene que esperar a que, a lo largo del proceso, y con ayuda de oxígeno, el amonio nitrifique, y una vez con la aparición de nitratos y propulsado por condiciones anóxicas, esos nitratos vayan desnitrificando hasta eliminar el nitrógeno del sistema en forma de N<sub>2</sub>. Por lo que esta recirculación transporta los nitratos desde el final del reactor hasta el comienzo, donde se sitúan las zonas anóxicas.

Balance Nitrógeno:

- Entrada= Salida + Asimilación+ Eliminación por desnitrificación
- Entrada: 600 kgN/d
- Salida: 0,01 kgN/d x 15000 m<sup>3</sup>/d=150 KgN/d
- Asimilación: se supone un 12% de N en peso seco de la biomasa y un 75% volátiles en el reactor:  
0,12 x 0,75 x Δx=157 kgN/d

Eliminación por desnitrificación:

$$r_i \times Q_f \times \text{N-NO}_3(\text{diseño}) + r \times Q_f \times \text{N-NO}_3(\text{diseño})$$

$$\rightarrow (r_i+1) \times 15000 \times 0,01=600-150-157$$

$$r_i=0,95 \rightarrow \text{Caudal recirculación interna } Q_{ri}=0,95 \times 15000=14250 \text{ m}^3/\text{d}$$

La recirculación interna de cada línea será de  $7125 \text{ m}^3/\text{d}$ .

### 3. SISTEMAS DE AIREACIÓN Y AGITACIÓN

#### **3.1. Necesidad de oxígeno**

##### *Necesidad de oxígeno Media*

1. Eliminación sustrato:  $\text{CO} = 0,62 \text{ (KgO}_2/\text{KgDBO}_5) \text{ (tablas)} \times 2400 = 1488 \text{ KgO}_2/\text{día}$
2. Respiración endógena:  $\text{CO} = 0,6 \text{ (KgO}_2/\text{KgDBO}_5) \text{ (tablas)} \times 2400 = 1440 \text{ KgO}_2/\text{día}$
3. Reacción Nitrógeno:  $4,6 \text{ (KgO}_2/\text{KgN)} \times 15000 \text{ m}^3/\text{día} \times 0,01\text{KgN}/\text{m}^3 = 690 \text{ KgO}_2/\text{día}$
4.  $(4,6-2,9) \times 15000 \times 0,01 \times (r+ri) = 498 \text{ KgO}_2/\text{día}$

Consumo medio de oxígeno total =  $1/+2/+3/+4/ = 4116 \text{ KgO}_2/\text{día}$

##### *Necesidad de oxígeno Punta*

1. Eliminación sustrato:  $\text{CO} = 0,62 \text{ (KgO}_2/\text{KgDBO}_5) \times 2400 = 1488 \text{ KgO}_2/\text{día}$
2. Respiración endógena:  $\text{CO} = 0,6 \text{ (KgO}_2/\text{KgDBO}_5) \times 2400 = 1440 \text{ KgO}_2/\text{día}$
3. Reacción Nitrógeno (4,6 gramos de  $\text{O}_2$  por cada gramo de nitrógeno amoniacal):  
 $4,6 \text{ (KgO}_2/\text{KgN)} \times 24975 \text{ (m}^3/\text{día)} \times 0,01\text{(KgN}/\text{m}^3) = 1149 \text{ KgO}_2/\text{día}$
4. Equivalencia (2,9 gramos  $\text{O}_2$  con 1 g de  $\text{N-NO}_3$ ):  $(4,6-2,9) \times 24975 \times 0,01 \times (r+ri) = 828 \text{ KgO}_2/\text{día}$

Consumo de oxígeno total punta:  $4905 \text{ KgO}_2/\text{día}$

### 3.2. Capacidad de oxigenación

$$OC = CO \times \frac{Cs_{10}}{(Cs - Cl) \times \sqrt{\frac{D_{10}}{D_{18}}} \times \frac{Po}{Ph} \times \frac{1}{\alpha}}$$

CO = 4116 o 4905 (punta) KgO<sub>2</sub>/día

Cs<sub>10</sub> = 11,33mg/l Concentración saturación de oxígeno en agua pura a 10°C

Cs = β x Cs<sub>20</sub> = 0,95 x 9,54 = 9,063mg/l (tablas) Concentración saturación de oxígeno en la cuba de airea la temperatura de licor de mezcla. En nuestro caso T=18°C

Cl = 2mg/l Concentración saturación de oxígeno a mantener en el licor de mezcla

D<sub>10</sub>/D<sub>18</sub> = 0,8614 Coeficiente de difusión a 10°C y T°C (m<sup>2</sup>/s) (tablas)

Po/Ph = 1 Relación presiones

a = 0,65 Coeficiente intercambio entre licor y agua pura (aireador de burbuja fina)

OCmedia = 8750 kgO<sub>2</sub>/d

OCpunta = 10428 kg O<sub>2</sub>/d

En la tabla 11 se ven las cantidades necesarias de aire al día en función de la demanda de oxígeno.

*Tabla 11: Necesidad de aire en función de la demanda de oxígeno*

100 kg Aire/día	23 kgO <sub>2</sub>
38044 kg Aire/día	8750 kgO <sub>2</sub>
45336 kg Aire/día	10428 kgO <sub>2</sub>

38044 (kg Aire/día) x 1 m <sup>3</sup> /1,29 kg x 1día/24h = 1229 m <sup>3</sup> /h → Eficiencia 20% = 6145 m <sup>3</sup> /h
45336 (kg Aire/día) x 1 m <sup>3</sup> /1,29 kg x 1día/24h = 1465 m <sup>3</sup> /h → Eficiencia 20% = 7324 m <sup>3</sup> /h

### **3.3. Difusores**

Aireación mediante difusores de burbuja fina, los cuales permiten un ahorro energético de hasta el 20%, Además de evitar ruidos exteriores y menos problemas mecánicos. Sin embargo, requiere una mayor atención de la explotación y un dimensionamiento preciso.

Se elige para el sistema de aireación, en el catálogo de la empresa SULZER, el difusor de disco de gama ABS Sucoflow DS:

Características

- Membrana EPDM auto-limpiante con ranuras
- La perforación de la membrana se realiza de manera que optimiza la separación.
- La gran superficie activa garantiza una transferencia de oxígeno eficaz
- Ideal para sistemas de aireación de alta densidad
- Placa de soporte robusta de fibra de vidrio
- Una válvula antirretorno incorporada proporciona seguridad adicional al operador cuando el flujo de aire es interrumpido, evita la infiltración de lodo en el sistema de tuberías
- PVC, PP y SS son las soluciones más comunes para la tubería sistema
- Temperatura de funcionamiento hasta 100 °

*Datos del difusor*

Rango de flujo de aire de diseño 1,5-15,0 m<sup>3</sup>/ H / difusor  
(+20 ° C, 1,013 mbar)

Temperatura del aire, máx. + 100 ° C

Profundidad de montaje máx. / Min 3 - 8 m (óptima)

Diámetro del difusor 520 mm

Superficie de membrana 0,183 m<sup>2</sup>

Tamaño de las burbujas 1 - 3 mm

Peso del difusor 2,3 kg

(Un valor máximo de 20 m<sup>3</sup>/ H se puede utilizar para máx. De 15 minutos para limpiar la membrana.)

1 difusor: Q<sub>dif</sub>= 15 m<sup>3</sup> aire/h → n° difusores media= 6145/15=410 difusores

nº difusores punta=  $7324/15=490$  difusores

Es decir, se necesitarán  $490/2= 245$  difusores por línea.

En la figura 6, se presente el modelo de difusor a utilizar.



*Figura 6: Difusor de disco de gama ABS Sucoflow DS, SULZER (Fuente: [www.abs-bv.nl](http://www.abs-bv.nl))*

## 4. GEOMETRÍA DE LOS REACTORES

### 4.1. Disposición Espacial

Se selecciona una disposición rectangular para el diseño del reactor de fangos activos. Teniendo en cuenta diversos factores.

El reactor biológico puede tener distintas configuraciones en función del régimen de mezcla (mezcla completa o flujo pistón) o del régimen de alimentación (continuo o discontinuo). Lo habitual es que sea de alimentación continua y trabaje en régimen próximo a la mezcla completa, lo que permite absorber mejor las variaciones de carga diarias.

Los reactores que más se aproximan a la mezcla completa son los rectangulares (con relación longitud/anchura  $< 3$ ).

La geometría rectangular además de ser la más económica y la más estandarizada, permite realizar una sencilla distribución tanto de las zonas anóxicas y aerobias como de los difusores gradualmente posicionados.

Por otra parte, el rendimiento de los difusores puede estimarse en una primera aproximación de un 4% por metro sumergido, obteniendo así 5 metros de profundidad para un 20% de rendimiento total de difusión.

Así se tiene:

$$h=5\text{m}$$

$$L=3a$$

$$5 \times L \times a = 5 \times L \times L/3 = 7895/2 \text{ (2 líneas)} \rightarrow L = 48,67 = 48,75 \text{ m}$$

$$a = 16,22 = 16,25 \text{ m}$$

$$h = 5 \text{ m}$$

$$V = 48,75 \times 16,25 \times 5 \times 2 = 3961 \times 2 = 7922 \text{ m}^3$$

### 4.2. Disposición de los aireadores

Sabiendo que se necesitan 245 difusores por línea se reparten de forma gradual para abastecer las necesidades de aire con nitrificación.



Zona 1: 42% – 103 – 176 m<sup>2</sup> → 0,6 dif/m<sup>2</sup>

Zona 2: 35% – 86 – 176 m<sup>2</sup> → 0,5 dif/m<sup>2</sup>

Zona 3: 23% – 56 – 176 m<sup>2</sup> → 0,3 dif/m<sup>2</sup>

Caudal de aire por difusor: 15,0 m<sup>3</sup>/ H / difusor

Valor del caudal de aire para un nivel de agitación correcto: 1,461(CEDEX) < 15,0 → Por lo tanto cumple con el nivel de agitación exigido.

Potencia moto-compresores:

Pe = 10,33 mca

Ps = 10,33 + 5 mca (profundidad) + 0,66mca (pérdidas)

Ps = 16 mca

$$\text{Pot(Kw)} = 0.164 \times Q_{\text{aire}} \times \frac{P_s^{0.283-1}}{P_e} = 159 \text{ kW} = 216 \text{ CV}$$

Se utilizarán 3 turbo compresores (1 de reserva) de la marca SULZER tipo HST 20-4500-1-125 de 170 CV cada uno con relación P2/P1=1,6.

La potencia estará levemente sobredimensionada, pero necesariamente, ya que los caudales de aire de cada compresor son limitados a 5000 Nm<sup>3</sup>/h siendo la demanda superior a 7000 Nm<sup>3</sup>/h.

Para la zona anóxica, sin embargo, se necesita un agitador para mantener el licor de mezcla sin permitir la sedimentación del fango en el fondo del reactor.

$$\text{Vanox} = 16,25 \times 5 \times 16,25 = 1321 \text{ m}^3 \rightarrow \times 2 \text{ (2 líneas)} = 2642 \text{ m}^3$$

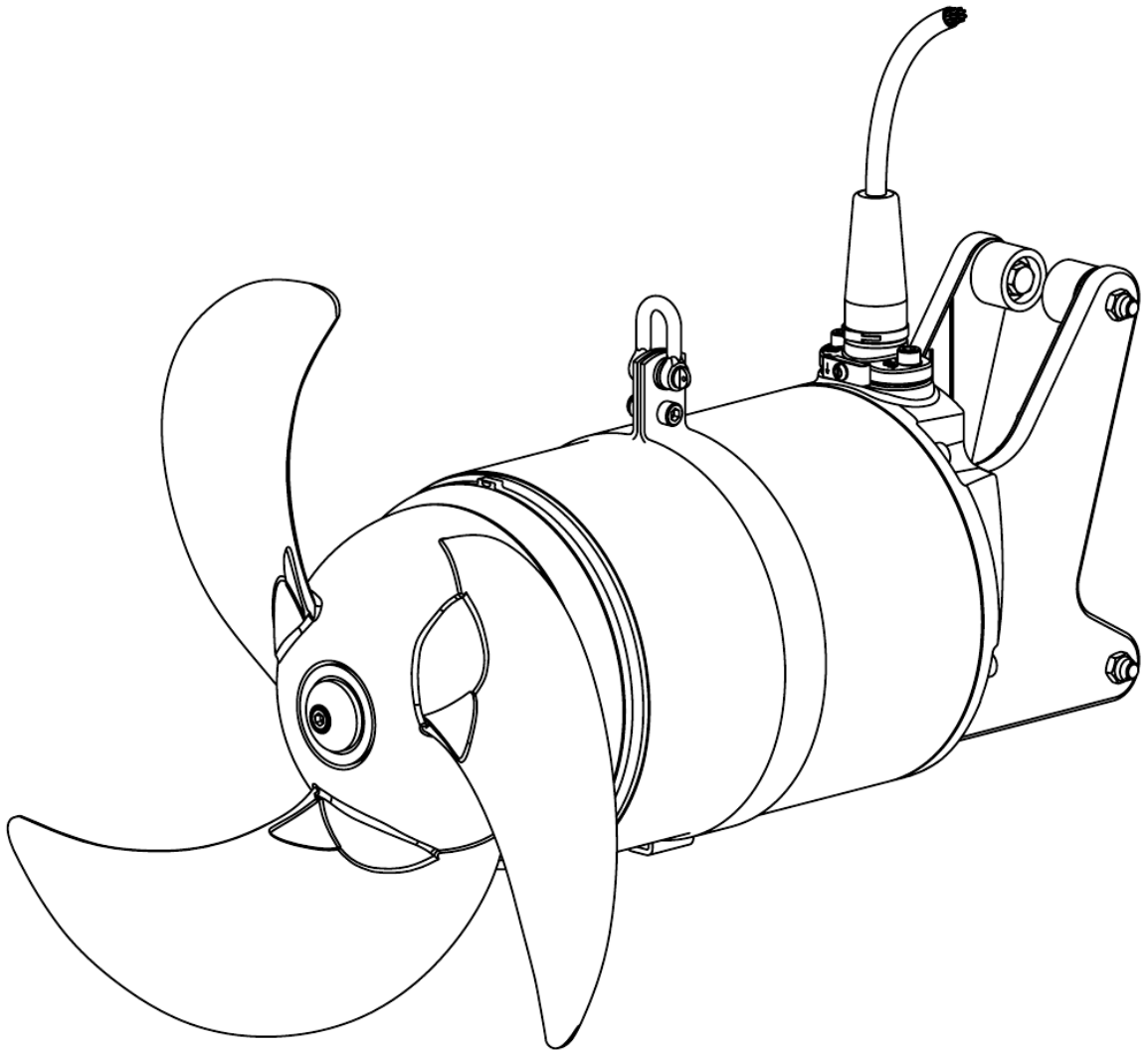
A partir de una potencia de agitación de 0,013 kW/m<sup>3</sup> se obtienen unas condiciones óptimas de mezcla del licor.

$$\text{Pagitación} = 0,013 \times 1321 = 17,2 \text{ kW}$$

Se selecciona el agitador sumergible horizontal de la marca SULZER, modelo Gama ABS XRW 900/50hz

Con un motor de 22 kW de potencia y un rendimiento del 92% (potencia de agitación 20,2 KW) se instalará uno en cada línea.

En la figura 7, se muestra el modelo de agitador que se instalará.



*Figura 7: Agitador sumergible horizontal de la marca SULZER, modelo Gama ABS XRW 900/50hz  
(Fuente: [www.sulzer.com](http://www.sulzer.com))*

## 5. GEOMETRÍA DEL DECANTADOR SECUNDARIO

En el decantador secundario se separa el agua tratada de los fangos activados, consiguiendo un efluente clarificado con un bajo contenido de DBO<sub>5</sub> y sólidos en suspensión. El diseño de un clarificador o decantador secundario debe realizarse de modo que exista una superficie adecuada para asegurar la decantación.

En la tabla 12 de a continuación, se establecen los criterios de diseño para el cálculo del decantador. Los valores escogidos son los que corresponden a un tratamiento de fangos activados por aireación prolongada (oxidación total).

Tabla 12: Criterios de diseño del decantador secundario

	Para Q <sub>max</sub> = 7500 m <sup>3</sup> /h
Carga sobre vertedero	≤ 9 m <sup>3</sup> /h.m
Carga de sólidos	≤ 7 kg /h. m <sup>2</sup>
Tiempo de retención	≥ 1,7 h
Velocidad ascensional	≤ 1,5 m/h

### 5.1. Diámetro y superficie

Siendo el caudal máximo de cada línea 520,3 m<sup>3</sup>/h.

Si se parte del caudal máximo, se tiene:  $A (Q \text{ máx}) = \frac{Q_{\text{máx}}}{V_{\text{asc}} (Q_{\text{máx}})} = 520,3 / 1,5 = 347 \text{ m}^2$ .

Se adoptará una unidad circular de diámetro:

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{1388}{\pi}} = 21 \text{ m}$$

$$\rightarrow S_{\text{real}} = 347 \text{ m}^2$$

Comprobación de la carga de sólidos

Carga sólidos Q máx = XV<sub>a</sub> x Q<sub>máx</sub> / S real

A Caudal máximo: Carga sólidos para Q<sub>máx</sub> = (4000 / 1000) x 520,3 / 347 = 6 kg / h. m<sup>2</sup> Al ser ≤ 7 kg / h m<sup>2</sup>, se considera un valor válido, según los valores de la tabla anterior.

## **5.2. Volumen y altura**

A caudal máximo, la expresión que se utiliza para calcular el volumen es la ecuación:

$$V_{Q \text{ máx}} = \text{THR } Q_{\text{máx}} \times Q_{\text{máx}}$$

$$V_{Q \text{ máx}} = 1,7 \times 520,3 = 884,5 \text{ m}^3$$

Por tanto, el volumen total de decantación debe ser mayor o igual de  $884,5 \text{ m}^3$ .

Si se conocen el volumen y el área, se podrá calcular la altura. Para el cálculo de la altura, se hará uso de la ecuación:  $h \geq \text{Volumen} / \text{Superficie}$

$h \geq 884,5 / 347 = 2,55 \text{ m}$ . Este valor es menor al mínimo recomendado (entre 3 y 5 m). Por ello, se adoptará una  $h = 3 \text{ m}$ .

Por lo tanto, el volumen real será el que resulte de la aplicación de la ecuación:  $V_{\text{real}} = h_{\text{útil}} \times S_{\text{real}}$

$$V_{\text{real}} = 3 \times 347 = 1041 \text{ m}^3$$

## **5.3. Comprobación de la carga sobre vertedero**

A caudal máximo, se aplicará la ecuación:

$$\text{Carga vertedero } Q_{\text{máx}} = \frac{Q_{\text{máx}}}{2 \times \pi \times D}$$

$$\text{Carga vertedero de } Q_{\text{máx}} = 520,3 / (2 \times \pi \times 21) = 3,94 \text{ m}^2 / \text{h}.$$

Se cumple  $\leq 9 \text{ m}^2 / \text{h}$ , por lo que se considera un valor válido.

## **5.4. Dimensiones del deflector de entrada**

Según la bibliografía consultada los parámetros de diseño característicos para decantadores son:

- Relación  $d1/D$ : 0.15
- Relación  $h1/h$ : 0.5
- Pendiente del decantador: 3 %

$$h = H + h'$$

$$h = 3 + (3 \times 3 / 100) = 3,1 \text{ m}$$

$$h1/h = 0,5 \rightarrow h1 = 0,5 \times 3,1 = 1,55 \text{ m}$$

Siguiendo la relación anterior, como el diámetro del decantador es 21 m, el diámetro del deflector de entrada será 3,15 m.

De la misma manera y teniendo en cuenta la pendiente del decantador se obtiene una altura del decantador de 3,1 m y del deflector de entrada de 1,55 m.

Dispondrá de un decantador secundario tronco-cónico de 21 m de diámetro y una altura de 3,1 m.

La inclinación de la solera será del 3% y para impedir la deposición de los lodos tendrá un mecanismo de paletas rascadoras de una potencia estimada de 1,8 kW.

Con un mecanismo de rebosamiento las aguas clarificadas irán a parar conducidas por una tubería a la zona de vertido.

La figura 8 expone el tipo de paletas rascadoras que llevará implementado el decantador secundario.

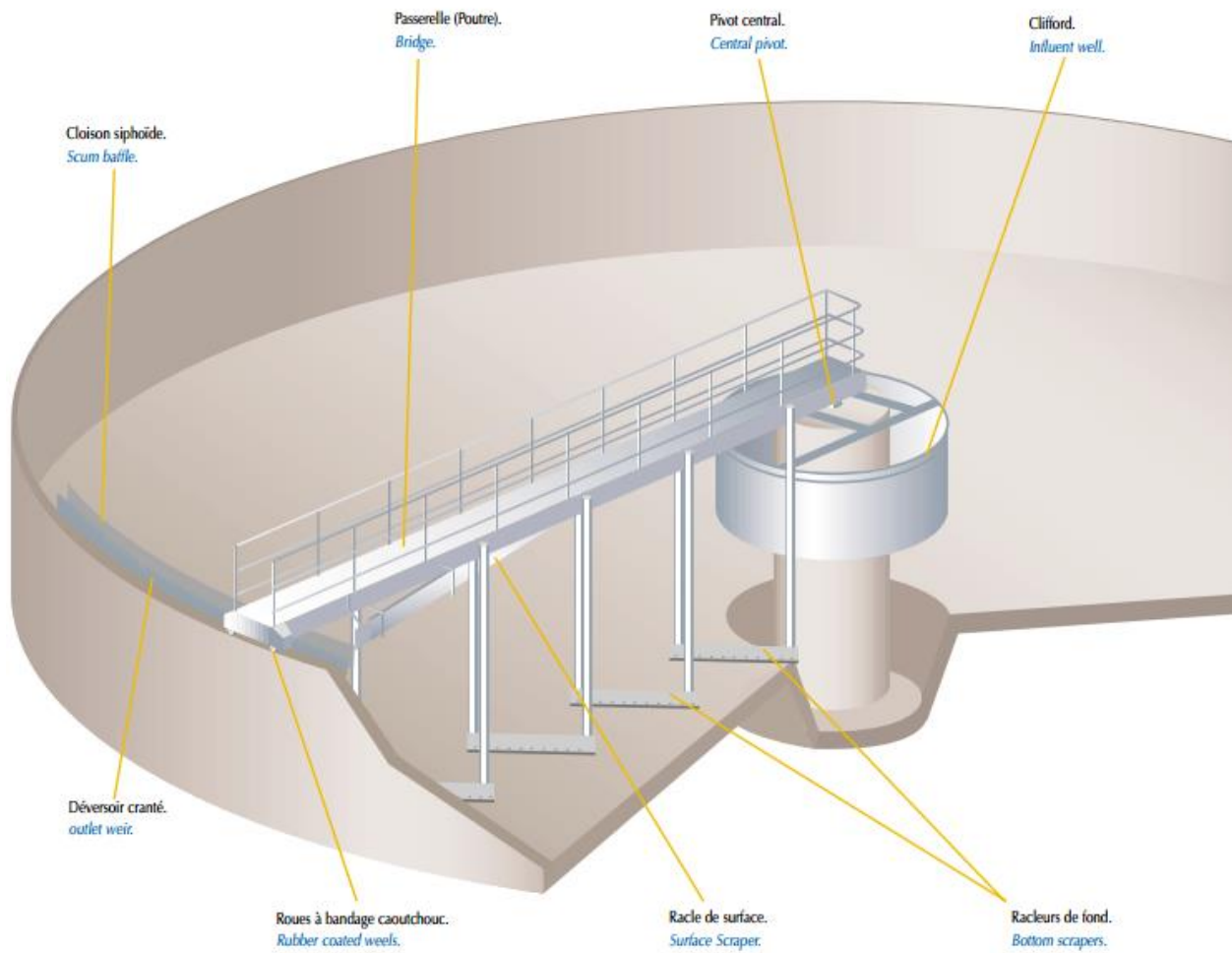


Figura 8: Paletas rascadoras del decantador secundario (Fuente: [www.europelec.com](http://www.europelec.com))

## 6. INSTALACIÓN DE CLORURO FÉRRICO PARA LA ELIMINACIÓN DE FÓSFORO

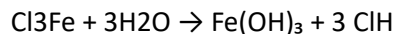
*Cloruro férrico (FeCl<sub>3</sub>)*

Comercialmente se suministra en forma sólida (cristalina o anhidra) o líquida con concentraciones del orden del 33 al 40%.

Debido a su carácter corrosivo e higroscópico es preciso mantenerlo en envases herméticos y de un material adecuado para su almacenamiento.

En este caso se selecciona un depósito de poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV).

La reacción que tienen lugar entre el cloruro férrico y el agua es la siguiente:



Esto supone que el pH del agua disminuya, pudiendo provocar problemas en las reacciones o incluso evitar que se produzcan al trabajar a un pH inadecuado.

En este proceso con el fin de ajustar el valor idóneo del pH se puede llevar cabo la dosificación de un producto alcalino, como puede ser sosa o cal, en función de los pHmetros y las concentraciones óptimas del proceso.

El cloruro férrico tiene tendencia a dejar en el agua una tenue coloración de color amarillo-pajizo, por lo que no es recomendable su utilización en aguas potables.

A continuación, se calcula la concentración óptima de cloruro férrico en el reactor:

Con un depósito de cloruro férrico a una concentración de 40 000 ppm (o mg/L) se tiene el siguiente balance (considerando el caudal de entrada igual al de salida en la línea de aguas):

Entrada – Salida = Eliminación P

$$9,2 \text{ ppm} - 2 \text{ ppm} = 7,2 \text{ ppm}$$

La eliminación del fósforo corresponde a un 2% que se incorpora en el fango en peso seco eliminado más la precipitación en forma de fosfato de Fe.

Eliminación P = 0,02 x  $\Delta x_v$  + Eliminación Precipitación (A)

$$\Delta X_v = 1742,4 \text{ en kg SS/d}$$

$$\text{Eliminación por precipitación} = \text{Eliminación P} - 0,02 \times \Delta X_v = (0,0072) 15000 - 0,02 1742,4 = 73,15 \text{ kgP/d}$$

Siendo 1000 moles por cada 31 kg de P → Eliminación por precipitación= 2359,68 moles P/día

Para calcular la cantidad de Cloruro férrico que se debe añadir a la salida del reactor para eliminar 2359,68 moles P/d, se sabe que:

Se necesitan 1,5 moles de  $\text{Cl}_3\text{Fe}$  por mol de P a eliminar  $\rightarrow$  Cantidad de  $\text{Cl}_3\text{Fe}$  a dosificar = 3539,5 moles  $\text{Cl}_3\text{Fe}$  /día

Siendo 56 gramos por mol de  $\text{Cl}_3\text{Fe}$   $\rightarrow$  Cantidad de  $\text{Cl}_3\text{Fe}$  a dosificar = 198,2 kg  $\text{Cl}_3\text{Fe}$  /día

Siendo nuestro depósito de una concentración de 40 000 mg/L

Q dosificación =  $198,2/40 = 4,95 \text{ m}^3/\text{día} \rightarrow 0,206 \text{ m}^3$  de  $\text{Cl}_3\text{Fe}$  /h

Concentración óptima de  $\text{Cl}_3\text{Fe}$  en el reactor:

$Q_e \times [\text{Cl}_3\text{Fe}]_e + Q_d \times [\text{Cl}_3\text{Fe}]_d = (Q_e + Q_d) \times [\text{Cl}_3\text{Fe}]_{\text{óptima}}$

$198,2 \text{ kgFe}/\text{d} = (15000 + 4,95) [\text{Cl}_3\text{Fe}]_{\text{óptima}}$

$[\text{Cl}_3\text{Fe}]_{\text{óptima}}$  en el reactor = 13,2 ppm

Por lo tanto, el depósito de cloruro férrico será de un volumen superior a  $240 \text{ m}^3$  para tener una frecuencia mensual de recarga y deberá estar regulado para que el caudal de dosificación permita una concentración permanente de 13,2 ppm de  $\text{Cl}_3\text{Fe}$  en el reactor.

La figura 9 presenta una modelización de un depósito estándar para el almacenaje de productos químicos como el cloruro férrico.



Figura 9: Tanque de almacenaje de productos químicos (Fuente: [www.biotanks.com](http://www.biotanks.com))



## 7. BOMBAS Y TUBERÍAS DE RECIRCULACIÓN

### 7.1. Dimensionamiento de tuberías

A partir de la ecuación de continuidad, se calcula la sección cilíndrica para las diferentes líneas:

Q: Caudal volumétrico,  $m^3/s$ .

A: Área de sección transversal de la tubería,  $m^2$ .

V: es la velocidad del fluido,  $m/s$ .

D: es el diámetro de la tubería,  $m$ .

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}}$$

Despejando el diámetro, se obtiene las dimensiones de la tubería en función de la velocidad y el caudal que circula a través de ella.

Por las siguientes razones seleccionar la velocidad adecuada es un aspecto fundamental:

- Una velocidad demasiado reducida induce a elementos y tuberías mayores, aumentando los costes de instalación.
- Una velocidad excesiva originará origina mayores pérdidas por rozamiento, provocando un aumento en los costes de bombeo.

Según la bibliografía, se considera que las velocidades deben mantenerse entre 0,5 y 1,5  $m/s$ . En este caso, se ha optado por un valor medio de 1  $m/s$ .

Para el diseño se elige las tuberías de polietileno por diferentes motivos:

#### *Durabilidad*

Entre éstas, cabe citar como una de las más significativas su gran durabilidad: se considera vida útil del tubo de PE un periodo de 50 años como mínimo.

#### *Resistencia*

El polietileno es resistente a la corrosión y a la mayor parte de los agentes químicos.

#### *Baja pérdida de carga*

Debido a la superficie lisa de los tubos de PE, la pérdida de carga por rozamiento es casi nula con respecto a otros materiales.

### *Ligeros*

El fácil manejo de los tubos PE, debido a su poco peso, supone una gran ventaja para la instalación.

Sección de las tuberías para cada etapa:

#### *Entrada al tanque biológico*

$$Q = 520,3 \text{ m}^3/\text{h}$$

D interno: 440,6 mm

Se utilizará una cañería de polietileno PN10 con unas dimensiones de diámetro interior 440,6 mm y de diámetro exterior 500 mm.

#### *Salida al decantador*

$$Q = 520,3 \text{ m}^3/\text{h}$$

D interno: 440,6 mm

Se utilizará una cañería de polietileno PN10 con unas dimensiones de diámetro interior 440,6 mm y de diámetro exterior 500 mm.

#### *Recirculación externa*

$$Q = 520,3 \text{ m}^3/\text{h}$$

D interno: 440,6 mm

Se utilizará una cañería de polietileno PN10 con unas dimensiones de diámetro interior 440,6 mm y de diámetro exterior 500 mm.

#### *Recirculación interna*

$$Q = 494,3 \text{ m}^3/\text{h}$$

D interno: 440,6 mm

Se utilizará una cañería de polietileno PN10 con unas dimensiones de diámetro interior 440,6 mm y de diámetro exterior 500 mm.

## **7.2. Cálculo de la bomba**

### *7.2.1-Pérdidas de carga*

La pérdida de carga se calculará con la siguiente ecuación:

$$hf = \frac{f \times (L \times u^2)}{2gD}$$

f: coeficiente de fricción.

L: longitud equivalente de la tubería.

U: velocidad del fluido.

D: diámetro de la tubería.

g: gravedad.

A continuación, se calculan los parámetros necesarios para resolver esta ecuación.

### *Cálculo del número de Reynolds*

$$Re = \frac{4 \times Q \times \rho}{\mu \times \pi \times D}$$

Q: caudal del fluido.

$\rho$ : densidad del fluido 998,20 kg/m<sup>3</sup>. (a 20 °C)

$\mu$ : viscosidad del fluido 1,007·10<sup>-3</sup> Kg/m·s (a 20 °C)

D: diámetro de la tubería.

## Cálculo de la rugosidad relativa

En la figura 10, se expone la tabla de rugosidades relativas

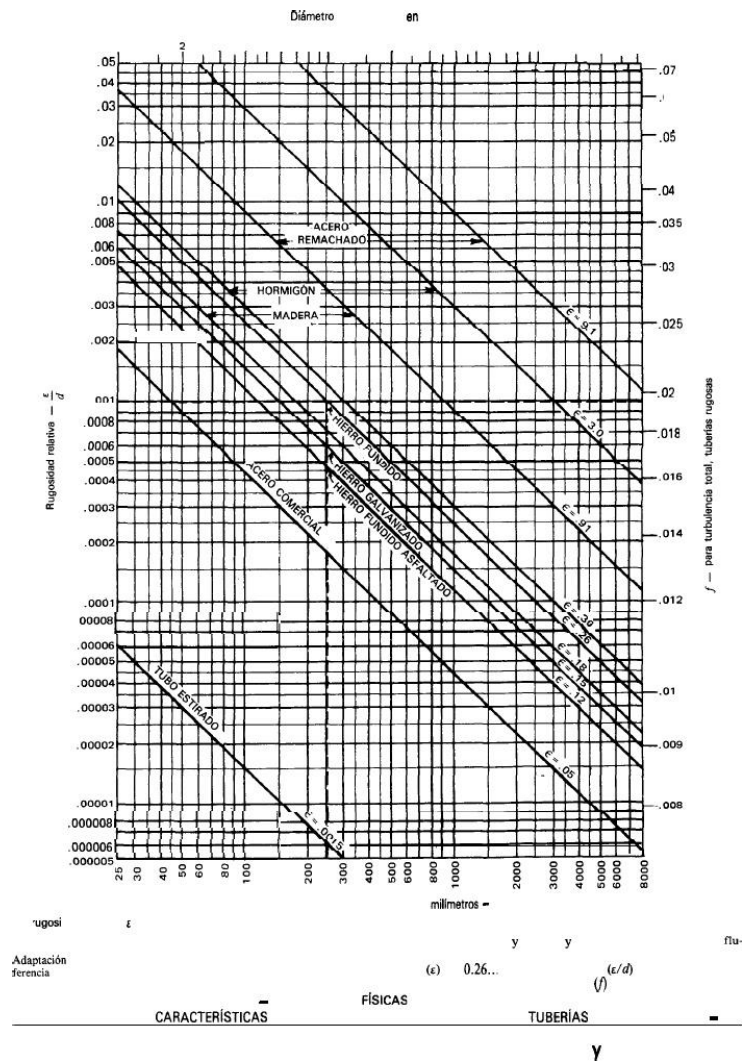


Figura 10: Tabla rugosidad relativa (Fuente: apuntes Mecánica de fluidos 2014-2015)

Para este material:

$$\epsilon = 1\text{mm}$$

$$\epsilon/D = 1/440,6 = 0,00227$$

$$Re = 414005$$

A partir de los cálculos anteriores y utilizando el diagrama de Moody se obtiene  $f = 0,022$

En la figura 11, se observa el diagrama utilizado.

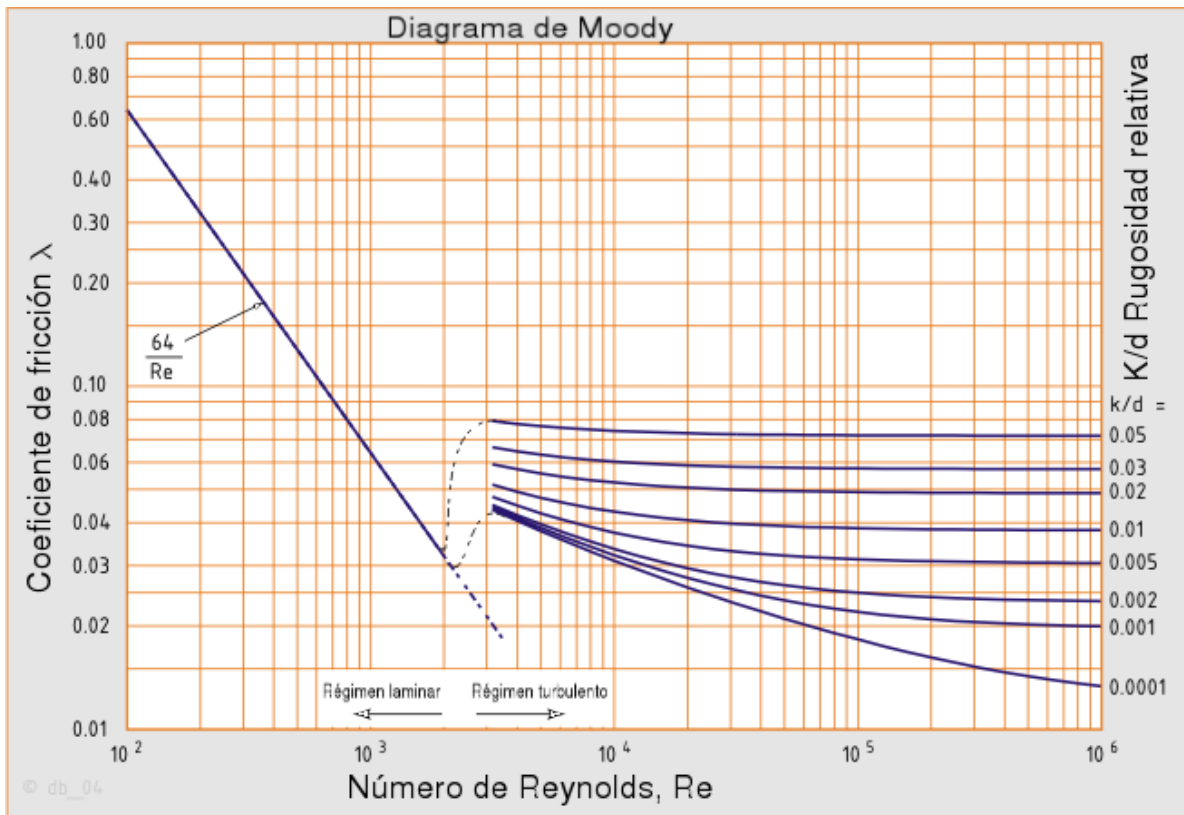


Figura 11: Diagrama de Moody (Fuente: wikipedia.org)

Cálculo de la longitud equivalente accesorios:

*Recirculación externa*

$$L = 67,625 \text{ m}$$

$$hf = \frac{f \times (L \times u^2)}{2gD} = 0,172 \text{ m}$$

3 codos y una válvula de compuerta

$$hf = \frac{k \times u^2}{2g}$$

Se calcula la longitud equivalente de un codo medio de  $90^\circ$  de diámetro 0,4406 m.

K: coeficiente de pérdidas singulares, para un codo de  $90^\circ = 0,75$

$$hf = 0,04 \text{ m}$$

Se calcula la longitud equivalente de una válvula de compuerta.  $K = 0,2$

$$hf = 0,01 \text{ m}$$

hf total= Pérdidas longitud + pérdidas accesorios= 0,172+0,04+0,04+0,04+0,01= 0,312 m

### Recirculación Interna

L= 47,91 m

$$hf = \frac{f \times (L \times u^2)}{2gD} = 0,13 \text{ m}$$

3 codos y una válvula de compuerta

$$hf = \frac{k \times u^2}{2g}$$

Se calcula la longitud equivalente de un codo medio de 90° de diámetro 0,4406 m.

K: coeficiente de pérdidas singulares, para un codo de 90° = 0,75

Hf =0,04 m

Se calcula la longitud equivalente de una válvula de compuerta. K=0,2

Hf =0,01 m

hf total= Pérdidas longitud + pérdidas accesorios=0,13+0,04+0,04+0,04+0,01=0,26 m

En la siguiente figura 12, se muestran los elementos de carga: codo y válvula.



Figura 12: Codo de polietileno de 90° y válvula de compuerta. (Fuente: [www.masa.es/tubos](http://www.masa.es/tubos) y [www.directindustry.es](http://www.directindustry.es))

Cálculo de la altura total:

*Recirculación externa*

La bomba está situada en  $h = 0$  al salir del decantador, teniendo que superar una altura de 5 metros para alcanzar el reactor.

La altura total es:

$$H(\text{total}) = H(\text{geométrica}) + \text{Pérdida de carga} = 5 \text{ m} + 0,312 \text{ m} = 5,312 \text{ m}$$

*Recirculación interna*

La bomba está situada en  $h=0$  a lado del tramo final de la zona aerobia, teniendo que superar una altura de 5 metros para alcanzar la zona anóxica de nuevo.

La altura total es:

$$H(\text{total}) = H(\text{geométrica}) + \text{Pérdida de carga} = 5 \text{ m} + 0,26 \text{ m} = 5,26 \text{ m}$$

7.2.2. Potencia de la bomba

Curva Q-H:

$$Q = 145 \text{ l/s}$$

$$H = 5,312 \text{ m}$$

Para el diseño se ha escogido el modelo de bomba para aguas residuales FLYGT N 3153 en conexión NZ.

En la figura 13, se muestran las diferentes opciones de instalación.

### Métodos de instalación

NP



Instalación semipermanente en pozo húmedo. La bomba se instala con barra guía doble en una conexión de descarga.

NS



Instalación semipermanente, independiente. Versión transportable, con conexión a tubería o manguera.

NT



Instalación vertical permanente en pozo seco, o en línea, con conexión embridada a tuberías de aspiración y descarga.

NZ



Instalación horizontal permanente en pozo seco, o en línea, con conexión embridada a tuberías de aspiración y descarga.

Figura 13: Métodos de instalación de la bomba seleccionada (Fuente: [www.xylemwatersolutions.com](http://www.xylemwatersolutions.com))

Se calcula la potencia de la bomba se utiliza la ecuación de Degremont:

$$P = Q \times H_{\text{total}} / \mu \times 366$$

P: potencia a suministrar por la bomba en kW.

Q: causal que suministra la bomba  $m^3/h$ .

H<sub>total</sub>: altura total.

$\mu$ : rendimiento de la bomba. 80,5%

### Recirculación externa e interna

$$P = 520,3 \times 5,312 / 0,805 \times 366 = 9,4 \text{ kW}$$

El modelo de bomba seleccionado puede ofrecer hasta 15 kW de potencia.



En la figura14, se expone la curva Altura-Caudal de la bomba seleccionada.

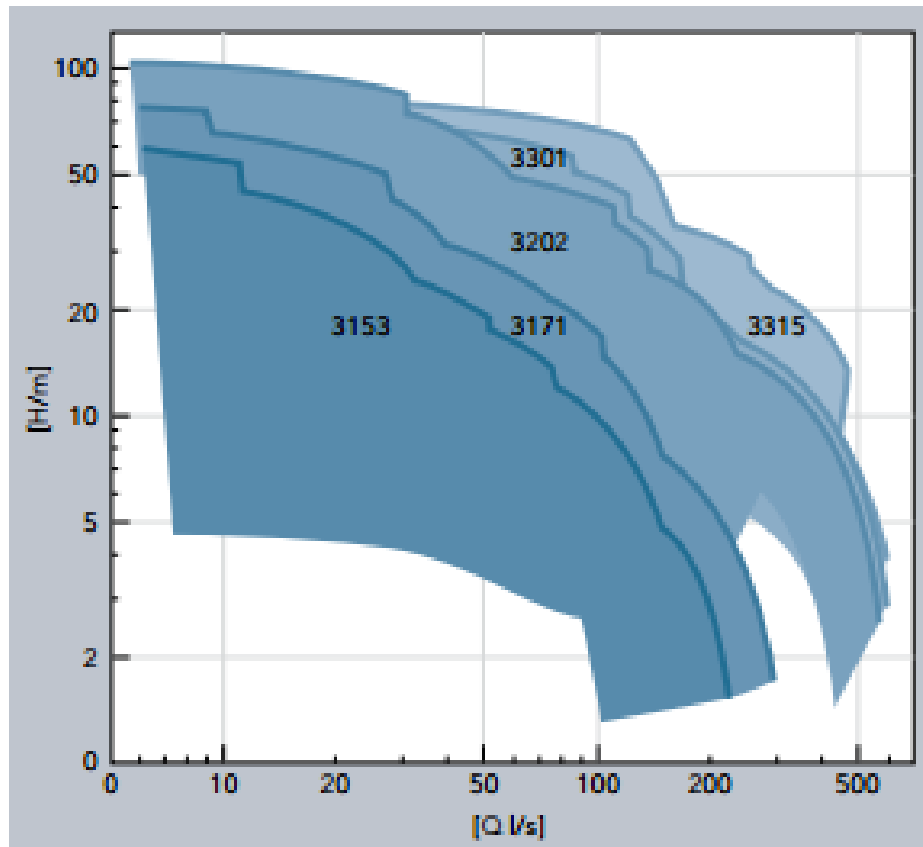


Figura 14: Curva Altura-Caudal de la bomba FLYGT N 3153 en conexión NZ (Fuente: [www.xylemwatersolutions.com](http://www.xylemwatersolutions.com))

Se dispondrá de una bomba de 15 kW FLYGT N 33153, para CADA recirculación debido a que está comprendido en el rango de alturas, y otra de reserva.

La figura 15 de a continuación es una fotografía de la bomba a instalar.



*Figura 15: Bomba de 15 kW FLYGT N 33153 (Fuente: [www.xylemwatersolutions.com](http://www.xylemwatersolutions.com))*

## 8. PRODUCCIÓN DE FANGOS

*Cálculo del volumen de la poceta de fangos*

Caudal de purga:

$$Q_w = \Delta x / SS_w = 1742,4 / 8 = 218 \text{ m}^3/\text{d}$$

Adoptando un tiempo de residencia del lodo en la poceta de 3 horas, se obtiene un volumen de poceta de:

$$V_{\text{poceta}} = Q_w \times \text{THR} / 2 = (3 \times 218 / 24) / 2 = 13,625 \text{ m}^3$$

Los lodos en exceso que se generan en el tratamiento biológico están estabilizados, presentando una concentración de materia volátil entre un 50 y 60%. Su producción alcanza los 0,8-1,0 kg de materia seca /kg DBO<sub>5</sub> eliminado, en función de la edad del fango y de la relación SS/DBO<sub>5</sub> del agua bruta.

Los lodos purgados pueden someterse o no a procesos de espesamiento previamente a su deshidratación, que normalmente se realiza en eras de secado, si se dispone de terreno suficiente, o en sistemas de filtración sencillos, como los sacos filtrantes. En plantas grandes se suelen utilizar sistemas mecanizados de deshidratación, como los filtros banda o las centrifugas.

## 9. PRESUPUESTO

*PRESUPUESTO GENERAL*

### **9.1. Costes obra civil**

### **9.2. Costes equipos instalados**

### **9.3. Costes conexión entre equipos**

### **9.4. Presupuesto ejecución material**

### **9.5. Presupuesto base de licitación**

## 9.1. Costes obra civil

### Preparación del terreno a utilizar U1

Tabla 13: Unidad de obra 1

Código	Rendimiento	Magnitud	Descripción	Precio unitario	Importe
U1.1	5092	m <sup>2</sup>	Despeje, desbroce de terreno.	0,56 €	2851,52 €
U1.2	5092	m <sup>2</sup>	Limpieza de basuras	0,29 €	1476,68 €
				total	4328,2 €
U1.3	0,03	%	Costes Directos Complementarios		129,85 €
				Total Unidad	4458,05 €

### Excavación U2

Tabla 14: Unidad de obra 2

Código	Rendimiento	Magnitud	Descripción	Precio unitario	Importe
U2.1	3227,25	m <sup>3</sup>	Reactor	2,28 €	7358,13€
U2.2	88	m <sup>3</sup>	Decantador	2,28 €	200,64€
U2.3	13,625	m <sup>3</sup>	Poceta fangos	2,28 €	31,07€
U2.4	231,08	m <sup>3</sup>	Tuberías	2,28€	526,87€
				total	8116,71€
U2.5	0,03	%	Costes Directos Complementarios		243,5€
				Total Unidad	8360,22€

### Hormigonado U3

Tabla 15: Unidad de obra 3

Código	Rendimiento	Magnitud	Descripción	Precio unitario	Importe
U3.1	1584,38	m <sup>2</sup>	Reactor	57 €	90309,38€
U3.2	694	m <sup>2</sup>	Decantador	57 €	39558€
				total	129867,38€
U3.3	0,03	%	Costes Directos Complementarios		3896,02€
				Total Unidad	133763,4€

## **9.2. Costes equipos instalados**

### *Equipos comerciales U4*

Código	Rendimiento	Magnitud	Descripción	Precio unitario	Importe
U4.1	2	Ud.	Reactor biológico	82315,75	164631,5€
U4.2	2	Ud.	Decantador secundario	28435,97	56871,94€
U4.3	2	Ud.	Agitador	4500	9000€
U4.4	490	Ud.	Difusor	67,50	33075€
U4.5	6	Ud.	Turbo Compresor	55000	330000€
U4.6	1	Ud.	Depósito Cloruro Férrico	2865	2865€
U4.7	4	Ud.	Bomba	5737,36	22949,44€
				total	619392,88€
U4.8	0,03	%	Costes Directos Complementarios		18581,78€
				Total Unidad	637974,67€

*Tabla 16: Unidad de obra 4*

## **9.3. Costes conexión entre equipos**

### *Tuberías y accesorios U5*

Código	Rendimiento	Magnitud	Descripción	Precio unitario	Importe
U5.1	270	m	Tubería recirculación	109,971	29692,17€
U5.2	12	Ud.	Válvulas	446,62	5359,44€
U5.3	4	Ud.	Codos	367,04	1468,16€
				total	36519,77€
U5.4	0,03	%	Costes Directos Complementarios		1095,59€
				Total Unidad	37615,36€

*Tabla 17: Unidad de obra 5*

#### **9.4. Presupuesto ejecución material**

Obra civil	146581,67€
Equipos instalados	637974,67€
Conexión entre equipos	37615,36€
Presupuesto ejecución material	822171,70€

*Tabla 18: Presupuesto ejecución material*

#### **9.5. Presupuesto base de licitación**

Presupuesto ejecución material	822 171,70€
Gastos Generales (13%)	106 882,33€
Beneficio industrial (6%)	49330,31€
Presupuesto de ejecución por contrata	978 384,34€
IVA (21%)	205 460,71€
Presupuesto base de licitación	1 183 845,05€

*Tabla 19: Presupuesto base de licitación*

El presupuesto por base de licitación asciende a UN MILLÓN CIENTO OCHENTA Y TRES MIL OCHOCIENTOSCUARENTA Y CINCO EUROS CON CINCO CÉNTIMOS.

## **10. PLANOS**

PLANO 1: DISTRIBUCION EN PLANTA DE LA INSTALACIÓN

PLANO 2: REACTOR BIOLÓGICO

PLANO 3: DECANTADOR SECUNDARIO



