



**Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar**

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño preliminar de una planta de depuración de
las aguas residuales generadas en la ENM y
evaluación de su eco-eficiencia*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Yago de Pazos Azpeitia

DIRECTORES: Lorena González Gil

CURSO ACADÉMICO: 2019-2020

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño preliminar de una planta de depuración de
las aguas residuales generadas en la ENM y
evaluación de su eco-eficiencia*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Infantería de Marina

Universida_deVigo

RESUMEN

Este TFG consiste principalmente en el diseño preliminar de una EDAR, estación depuradora de aguas residuales, para la ENM, así como la evaluación de su ecoeficiencia. Se inicia con el estudio de la legislación vigente relativa al tratamiento de aguas residuales y el estado de las EDAR en España. Además, se ha analizado el tratamiento actual que reciben las aguas residuales provenientes de la ENM, y el que recibían hace dos décadas. Posteriormente, se han examinado los principales procesos de tratamiento y se han elegido aquellos que más se adaptan a las necesidades de la Escuela, principalmente: ausencia de olores, espacio reducido y automatización. Por ello, se ha optado por una planta compacta, evitando el uso de decantadores y reactores convencionales de lodos activos. Estos han sido sustituidos por un tamizado fino y un reactor biológico de membrana. En relación a los fangos generados, se ha optado por que los trate una empresa externa, aunque serían deshidratados previamente. Después se han dimensionado las instalaciones, estimando además sus consumos energéticos y sus costes de construcción. En base a los resultados obtenidos se ha realizado el estudio de la ecoeficiencia de la planta, el cual nos muestra la relación entre el impacto medioambiental de la EDAR, con los costes de operación y mantenimiento. Así como, se ha comparado la ecoeficiencia de la antigua EDAR de la ENM con la depuradora propuesta. Por último, se han comparado los costes de operación de la depuradora diseñada con los cánones pagados al Ayuntamiento de Marín por verter las aguas residuales producidas en la ENM, resultando mayores los pagos actuales al Ayuntamiento.

PALABRAS CLAVE

Contaminación, Eco-eficiencia, Escuela Naval Militar, Estación depuradora de aguas residuales, Prediseño.

AGRADECIMIENTOS

Aprovecho estas líneas para reconocer el apoyo de mi familia, y sus consejos. A mi tutora del proyecto, por guiarme durante todo el trabajo, ayudarme en la comprensión de los conceptos más complejos y en la corrección de la memoria.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	4
1 Introducción y objetivos	5
1.1 Necesidad de tratamientos de aguas residuales.....	5
1.2 Justificación	5
1.3 Objetivos	6
2 Estado del arte	7
2.1 Qué es una EDAR: Estación depuradora de aguas residuales	7
2.2 Parámetros a controlar en las aguas residuales urbanas.....	8
2.2.1 Parámetros físicos	9
2.2.2 Parámetros químicos.....	9
2.2.3 Parámetros biológicos.....	10
2.2 Legislación actual sobre el tratamiento de aguas residuales.....	11
2.3 Estado del tratamiento de aguas residuales en España	12
2.4 Tratamiento actual de las aguas residuales en la ENM.....	13
3 Estudio de alternativas tecnológicas y selección.....	17
3.1 Alternativas tecnológicas para la línea de aguas.....	17
3.1.1 Tratamientos físicos.....	17
3.1.2 Tratamientos químicos.....	20
3.1.3 Tratamientos biológicos.....	22
3.2 Alternativas tecnológicas para la línea de fangos	26
3.3 Factores generales para la selección	28
3.4 Criterios técnicos de selección	28
3.4.1 Procesos sobre la línea de agua	28
3.4.2 Procesos sobre la línea de fangos	29
3.4.3 Control de olores.....	29
3.4.4 Control del proceso.....	29
3.5 Selección de procesos	29
3.5.1 Pretratamiento.....	29
3.5.2 Tratamiento primario	31
3.5.3 Tratamiento secundario.....	32
3.5.4 Tratamiento de fangos	34

4	Diseño Preliminar y evaluación de la Eco-Eficiencia	37
4.1	Carga de contaminantes en los afluentes de entrada	37
4.1.1	Introducción	37
4.1.2	Determinación teórica	37
4.1.3	Resultados	39
4.2	Dimensiones de los equipos	39
4.3	Presupuesto preliminar de construcción	40
4.3.1	Pretratamiento	40
4.3.2	Tratamiento primario	41
4.3.3	Tratamiento secundario	41
4.3.4	Tratamiento de fangos	41
4.3.5	Obra civil	41
4.3.6	Coste total	41
4.4	Aquaenvec, método para evaluar la ecoeficiencia	41
4.4.1	El proyecto: Aquaenvec	41
4.4.2	La herramienta Aquaenvec	42
4.5	Evaluación de la ecoeficiencia de la EDAR	44
4.6	Comparación de la ecoeficiencia con la antigua EDAR de la ENM	45
5	Conclusiones y líneas futuras	49
5.1	Conclusiones	49
5.2	Líneas futuras	50
6	Bibliografía	51
	Anexo I: Cálculo de caudales	55
	Anexo II: Cálculos de dimensionamiento	61
	Anexo III: Planos	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Esquema de una EDAR convencional [5]	8
Figura 2-2 Capacidad de depuración en España [10]	12
Figura 2-3 Porcentaje de agua residual reutilizada [10]	13
Figura 2-4 Consumo histórico de agua en la ENM [16]	14
Figura 2-5 Planos de la antigua EDAR de la ENM [16]	15
Figura 2-6 EDAR de Placeres [19]	16
Figura 3-1 Esquema de desbaste por rejillas [20]	18
Figura 3-2 Decantador cónico-cilíndrico [21]	19
Figura 3-3 Esquema del proceso de flotación [22]	20
Figura 3-4 Esquema de la desinfección con ozono [23]	22
Figura 3-5 Estación de fangos activos [24]	23
Figura 3-6 Secuencia de funcionamiento de un RBS [2]	24
Figura 3-7 Esquema de un MBR [25]	25
Figura 3-8 Esquema del proceso de eliminación de Nitrógeno [26]	26
Figura 3-9 Prensa rotatoria [6]	27
Figura 3-10 Rejas con correa continua [6]	30
Figura 3-11 Desarenado y desengrasado [27]	31
Figura 3-12 Diagrama de homogeneizador en línea [2]	31
Figura 3-13 Esquema de un tamiz de tambor rotatorio [28]	32
Figura 3-14 Diseño de un MBR con membranas sumergidas [29]	33
Figura 3-15 Diagrama de la línea de agua	34
Figura 3-16 Deshidratador de prensa tornillo [30]	34
Figura 3-17 Diagrama de la línea de fangos	35
Figura 4-1 Ciclo del agua urbana [3]	42
Figura 4-2 Uso de la herramienta Aquaenvec [34]	43
Figura 4-3 Cómo funciona la herramienta Aquaenvec [34]	43
Figura 4-4 Esquema de la EDAR diseñada [34]	44
Figura 4-5 Resultados numéricos de la ecoeficiencia de la EDAR diseñada [34]	44
Figura 4-6 Resultados gráficos de la ecoeficiencia de la EDAR diseñada [34]	45
Figura 4-7 Esquema de la antigua EDAR de la ENM [34]	46
Figura 4-8 Comparación de ecoeficiencia de la EDAR diseñada y la antigua de la ENM [34]	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Requisitos de los vertidos procedentes de aguas urbanas en zonas sensibles [7].....	11
Tabla 2-2 Requisitos bacteriológicos [9].....	12
Tabla 4-1 Dotación adoptada de contaminantes por habitante equivalente [8].....	38
Tabla 4-2 Valores mínimos de concentración en aguas residuales brutas [8].....	38
Tabla 4-3 Cantidad de contaminantes eliminados y eficacia de la EDAR.....	39
Tabla 4-4 Dimensiones y eficiencia de los equipos	40

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Necesidad de tratamientos de aguas residuales

Las aguas residuales son esencialmente aquellas que han sido utilizadas por la población, tanto para la industria como para uso doméstico, y que consecuentemente contienen sustancias indeseables (contaminantes). Por lo tanto, dichas aguas no pueden ser reutilizadas ni vertidas al medioambiente (ríos, océanos, etc.) sin un tratamiento previo que elimine los contaminantes que poseen. Más de 1.000 millones de toneladas de agua son vertidas anualmente a ríos, lagos, océanos y aguas subterráneas en el mundo. Estas aguas sin tratar contaminan con metales pesados, grasas, detergentes, ácidos, etcétera. Esta contaminación se manifiesta con mayor intensidad en países industrializados. En China, por ejemplo, más del 80% de sus ríos están contaminados hasta tal punto que sus aguas no son aptas para uso doméstico en EEUU, donde dos de cada cinco ríos están contaminado, por ello las autoridades sanitarias no recomiendan que se pesque en ellos [1].

El tratamiento de estas aguas residuales no tuvo demasiada importancia en la sociedad hasta mitad del s. XIX, cuando se desarrolló la teoría a cargo de Koch y Pasteur que relacionaba las aguas contaminadas con el desarrollo de enfermedades en las personas. En la actualidad han ganado gran importancia estas tecnologías, ya que reducen el impacto medioambiental del ser humano, especialmente en las ciudades, donde es indispensable el tratamiento de las aguas debido al alto consumo de la misma. Además, las aguas pluviales también deben ser tratadas, debido a los agentes nocivos que obtiene al atravesar la atmósfera y cuando entran en contacto con la superficie. A pesar de ello, este agua tiene menor concentración de contaminantes, por ello no se debe juntar con las aguas residuales pues se contaminaría y provocaría un sobredimensionamiento de la depuradora. Por todo lo cual, en la actualidad, la tendencia es diseñar sistemas separativos de aguas residuales, y aguas pluviales [2].

1.2 Justificación

La razón por las que se ha decidido realizar este proyecto es tanto económica como medioambiental y social. Por un lado, se realizará un estudio económico comparando los cánones que la ENM paga por el agua que es tratada en la EDAR de Placeres y el coste de la construcción de la nueva EDAR y su mantenimiento. Y por el otro, se estudiará la posibilidad de diseñar una depuradora que genere aguas tratadas con unas características mejores que la planta de Placeres. Ya que esta última ha sido sancionada por la UE, por no tratar las aguas cumpliendo los requisitos mínimos estipulados por la ley. Gracias a la mejora del tratamiento con respecto al actual, la imagen pública de la ENM se fortalecerá, ya que el cuidado del medioambiente no es solo una prioridad del Gobierno, sino un tema importante y preocupante entre el ciudadano de a pie. De hecho, la Ría de Pontevedra tiene un ecosistema propio, y

es necesario su cuidado al ser esta una zona sensible a los residuos generados por el ser humano. Con esta instalación se demostrará una vez más que la Armada Española trata el medioambiente como un asunto primordial y realiza acciones para preservarlo.

Cabe destacar que se ha decidido realizar el proyecto sobre una EDAR y no una ERAR, estación regeneradora de aguas residuales, ya que no se considera necesario obtener agua reutilizable para el riego de las zonas verdes de la ENM u otros fines. Esto es debido a que en esta zona hay abundantes precipitaciones durante gran parte del año y aumentaría considerablemente el coste de la planta el obtener agua reutilizable.

1.3 Objetivos

El principal objeto del TFG es el diseño preliminar de las instalaciones necesarias para poder tratar todas las aguas residuales generadas en la ENM y así verterlas directamente a la Ría de Pontevedra. Para ello es necesario cumplir todas las especificaciones contempladas en la legislación vigente, en concreto, la Directiva Europea. Del mismo modo, se han de tener en cuenta otros aspectos en la elección de los distintos procesos de depuración, como el olor o el espacio a ocupar por la planta. Estos cobran mayor importancia debido a la limitación de espacio en la ENM y a la posible proximidad a instalaciones habitadas por alumnos o dotación. Además, es esencial que la planta esté automatizada para disminuir los trabajos de mantenimiento de la misma y así la necesidad de personal especializado.

Para cumplir con dicho objetivo se estimará en primer lugar el caudal y las características de las aguas a depurar en la ENM. En base a estos resultados, se escogerá de forma justificada el proceso óptimo, entre diferentes alternativas tecnológicas, para tratar dichas aguas residuales. Una vez seleccionado el proceso, se realizarán los cálculos oportunos para dimensionar los diferentes equipos.

Además, en este TFG se pretende realizar una evaluación de la eco-eficiencia del proceso de depuración propuesto. Para ello, se empleará la herramienta web “Aquaenvec”, que permite evaluar y comparar la eco-eficiencia de diferentes procesos de depuración de aguas de acuerdo con la metodología ISO-14045:2012 (norma de Gestión Ambiental de la Eco-eficiencia de Sistemas Productivos) [3]. En base a estos resultados, se evaluará la tecnología propuesta de depuración en términos ambientales y económicos y se comparará con la antigua EDAR de la ENM, así como los costes de operación y mantenimiento de la EDAR propuesta con el tratamiento de las aguas en la EDAR de Placeres, en la que se trata actualmente las aguas residuales generadas.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Qué es una EDAR: Estación depuradora de aguas residuales

Una EDAR, estación depuradora de aguas residuales, es la encargada de tratar las aguas contaminadas, sean de origen urbano o industrial [4]. Las EDAR urbanas están conectada a la red de alcantarillado, la cual suministra las aguas residuales a depurar. Normalmente hay una estación de bombeo, ya que se intenta que el agua circule por toda la EDAR gracias a la fuerza de la gravedad. Para lo que es necesario elevar el agua entrante al inicio del proceso, aunque dicha estación se encuentre normalmente tras el pretratamiento, así se daña lo menor posible. Como se puede ver en la Figura 2-1, una EDAR se compone de dos zonas principales: la línea de aguas, es la parte por la que circula el agua a tratar; y la línea de fangos, que es la zona por la que circulan los residuos orgánicos e inorgánicos que han sido retirados del agua.

La línea de agua se compone de las siguientes fases o tratamientos:

- **Pretratamiento**, es la fase inicial, comienza por un desbaste por rejillas, éstas impiden el paso de sólidos de cierto tamaño. Normalmente hay varias rejillas, cuyos diámetros disminuyen en el sentido de movimiento del agua. Tras el primer desbaste, tiene lugar el desarenado, que elimina toda partícula con una granulometría superior a 0,5 mm. La última operación del pretratamiento es el desengrasado, cuyo objetivo es eliminar aceites, grasas, espumas y otros materiales de menor densidad del agua que puedan dañar los tratamientos posteriores.
- **Tratamiento primario**, compuesto por tratamientos físico-químicos, cuyo objetivo es eliminar los sólidos suspendidos de las aguas residuales, por efecto de la gravedad. Consiguiendo de manera libre o con ayuda de químicos que provocan la aglomeración de dichos sólidos suspendidos. En este proceso se obtiene una importante reducción del DBO, demanda biológica de oxígeno, del efluente. Los lodos obtenidos tienen una alta carga orgánica y normalmente se tratan de manera conjunta con los lodos secundarios.
- **Tratamiento secundario**, cuya finalidad es eliminar los contaminantes orgánicos, reduciendo los valores de DBO y SS, sólidos en suspensión, significativamente. Este tratamiento no es efectivo para eliminar metales pesados ni patógenos, y en muchos casos tampoco se elimina el N y el P. Cuando este tratamiento se lleva a cabo en reactores biológicos de lodos activos, es necesario incorporar un decantador secundario, que es donde se separa el agua tratada de la biomasa, y es recirculada al reactor.
- **Tratamiento terciario**, algunas EDAR no cuentan con este tratamiento, pero cada vez es más necesario debido al aumento de exigencias en los parámetros del agua vertida. El objetivo de esta última fase es eliminar los patógenos, a través de ozonización, rayos UV o cloración.

La línea de fangos, la cual incluye lodos primarios y secundarios, está compuesta de las siguientes fases:

- **Espesado de lodos**, este proceso cuyo fin es reducir la inversión económica del tratamiento, consiste en secar los lodos, así estos disminuyen en volumen y masa, ya que estos tienen un porcentaje muy alto de agua al inicio del espesado.
- **Digestión**, este proceso se puede llevar a cabo después del espesado y consiste en estabilizar bioquímicamente los lodos en condiciones anaerobias con el fin de que estos no continúen descomponiéndose. Así, se elimina parte de su materia orgánica que se transforma en metano, los patógenos presentes y se reducen los olores desagradables.

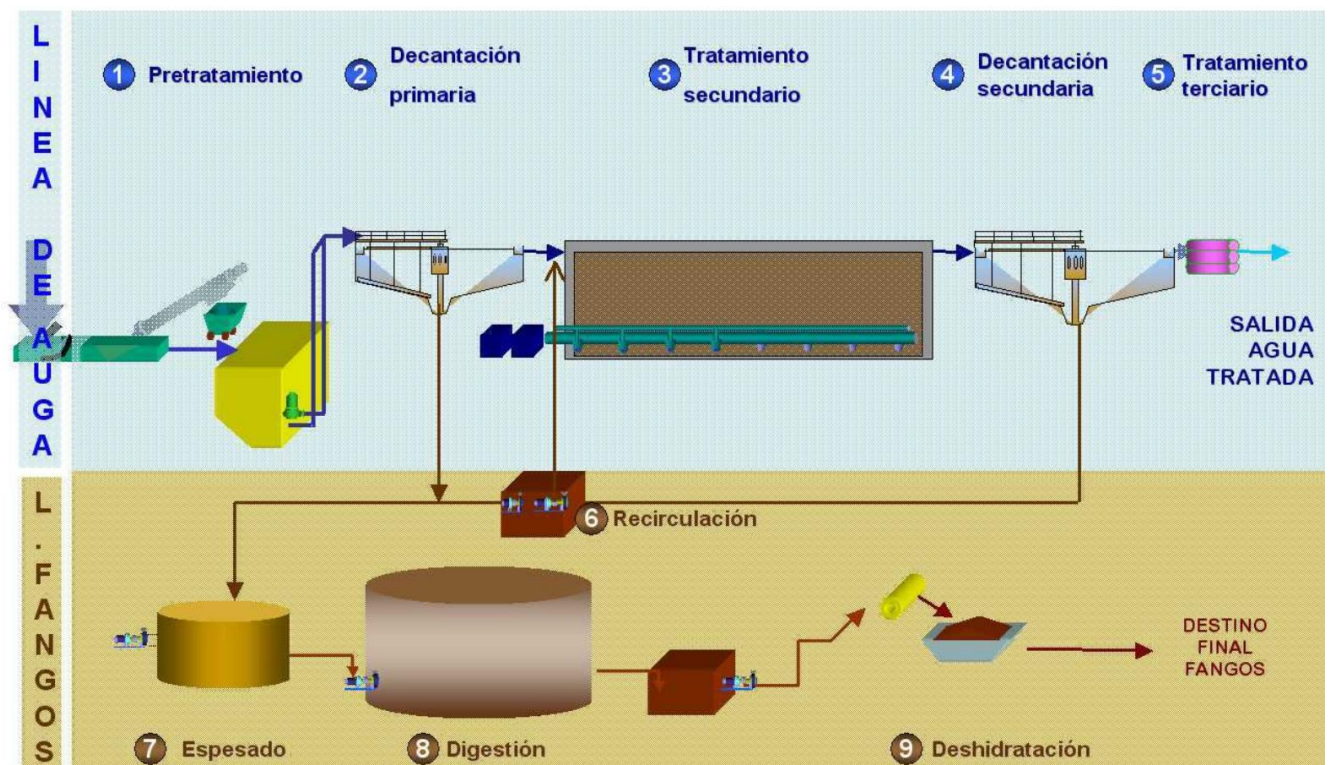


Figura 2-1 Esquema de una EDAR convencional [5]

Para realizar estos tratamientos y obtener los resultados previstos, se han desarrollado y se continúan desarrollando, distintos métodos de tratamiento de aguas residuales, tanto a través de fenómenos físicos, como químicos o biológicos. Los tratamientos físicos fueron los primeros en ser implementados en las EDAR. Por ejemplo: la filtración, la sedimentación o la flotación. Por otro lado, los procesos químicos que se basan en eliminar contaminantes mediante reacciones, como la desinfección con cloro u otro compuesto químico o la precipitación química. Por último, los procesos biológicos cuya finalidad principal es eliminar la materia orgánica disuelta. Además, se utilizan para separar el nitrógeno y el fósforo de las aguas. Estos procesos según su finalidad son utilizados en alguna de las etapas anteriormente nombradas [2].

2.2 Parámetros a controlar en las aguas residuales urbanas

El tratamiento de las aguas residuales dependerá de los componentes y de los contaminantes, que estas posean. De acuerdo con [6], dichos contaminantes se pueden dividir en varias categorías: físicos, químicos y biológicos.

2.1.1 Parámetros físicos

Estos miden características físicas, los principales son:

Sólidos totales (ST): el contenido total de materia sólida contenida en el agua después de someterse a un proceso de evaporación, entre 103 y 105 °C.

Sólidos totales disueltos (SDT): están compuestos por moléculas orgánicas, inorgánicas e iones. Esta es la fracción filtrable de los ST, son partículas entre 0,001 y 0,1 micrómetros.

Sólidos totales en suspensión (SST): son aquellas partículas insolubles y sólidas. Tienen tal tamaño que un filtro cuyo diámetro de rejilla es de 0,45 micrómetros no los deja pasar. Los sólidos en suspensión se clasifican en, sedimentables, los cuales se eliminan principalmente en el proceso de decantación. Y no sedimentables, que no sedimentan tan fácilmente por su densidad similar a la del líquido.

Sólidos volátiles (SV): es materia que es quemada a una temperatura de 500 °C. Esta es principalmente materia orgánica. Este parámetro se utiliza habitualmente para estudiar la estabilidad biológica de los fangos.

Sólidos fijos (SF): son aquellos sólidos inorgánicos que no se queman durante la incineración. La diferencia entre SV y SF normalmente se utiliza para caracterizar la cantidad de materia orgánica presente en el agua.

Conductividad eléctrica (CE): es la capacidad de una solución acuosa de transportar una corriente eléctrica. Esta depende de la concentración de iones disueltos, así como de su movilidad, valencia y temperatura de la medición. Por lo tanto, es un indicador de la mineralización del agua, o del contenido de sales disueltas.

Olores: normalmente estos son debidos a los gases que se liberan en la descomposición de la materia orgánica. Este parámetro ha cobrado importancia ya que es uno de los principales factores por los que la población rechaza las EDAR.

Temperatura: el agua residual normalmente tiene una temperatura más elevada que el agua de suministro, debido al uso que se da en los hogares. Este parámetro es muy importante, tanto para la biodiversidad del medio en el que se vierte el agua, como para los distintos tratamientos que se realizan al agua.

Además, hay otros parámetros fácilmente medibles y que tenían mayor importancia hace décadas. Estos son la densidad, el color y la turbidez. Pero debido a los requerimientos actuales para el vertido de aguas éstos son insuficientes para medir la contaminación en el agua.

2.1.2 Parámetros químicos

Son aquellos que miden la materia orgánica, la inorgánica y los gases. Los principales son los siguientes:

El pH: está íntimamente relacionado con la calidad del agua. Determinados procesos químicos solamente pueden tener lugar a un determinado pH, así como no se puede verter el agua con un pH muy elevado o bajo. El pH es un indicador del número de iones de hidrógeno. Cuando el número de protones (H^+) iguala al número de iones hidroxilo (OH^-), el agua es neutra. Tendrá entonces un pH alrededor de 7. El pH del agua puede variar entre 0 y 14. Cuando el pH de una sustancia es mayor de 7, es una sustancia básica. Cuando el pH de una sustancia está por debajo de 7, es una sustancia ácida. Mide materia inorgánica.

Nitrógeno (N): este elemento es esencial para el crecimiento de protistas y plantas, también es básico para la síntesis de proteínas. Las formas de nitrógeno más frecuentes en las aguas son nitrato, nitrito, amoníaco y nitrógeno orgánico. Todas esas formas del nitrógeno, lo mismo que el nitrógeno gaseoso (N_2), son interconvertibles bioquímicamente y forman parte del ciclo del nitrógeno. Es

fundamental conocer la concentración de N, porque si esta es muy baja será necesario aumentarla en algunos casos. Puesto que con una cantidad insuficiente de N impediría que tuviesen lugar tratamientos biológicos. O si esta es muy alta, la concentración de N, no se podría verter el agua, ya que sería dañino al medioambiente.

Fósforo (P): este al igual que el N es un elemento esencial para el desarrollo de algas y otros organismos biológicos. Las aguas residuales municipales suelen contener entre 4 y 15 mg/l de P. Las formas más frecuentes de este elemento en soluciones acuosas son ortofosfatos, polifosfatos y fosfatos orgánicos.

Cloruros: estos provienen de la disolución de suelos y rocas que están en contacto con el agua. Además, también provienen del uso de las aguas en el ámbito doméstico.

Alcalinidad: este parámetro de materia inorgánica resulta de la presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos como el calcio o el sodio, afecta principalmente al pH. La alcalinidad se mide por la titulación con un ácido normalizado, así se expresan los resultados a través de concentraciones de carbonato de calcio.

Demanda química de oxígeno (DQO): es un parámetro que mide la cantidad de materia orgánica susceptible de ser oxidada por medios químicos que hay en una muestra líquida. En el ensayo se emplea, en medio ácido, un agente químico con altas propiedades oxidantes, determinando la materia orgánica que se oxida, se expresa en mg O₂/litro.

Demanda biológica de oxígeno (DBO): es el parámetro más empleado que mide la contaminación orgánica. Este mide la cantidad de materia orgánica susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos en una muestra líquida. Esta oxidación bioquímica es un proceso lento, en teoría los 20 días el 90% de la oxidación se ha completado. Normalmente se mide transcurridos 5 días (DBO₅) y se expresa en mg O₂/litro.

Demanda teórica de oxígeno (DTeO): los principales compuestos de este tipo son los hidratos de carbono, proteínas y grasas o aceites. Para calcular esto es necesario disponer de la fórmula química de la materia orgánica que se va a estudiar. Este parámetro mide concentraciones de materia orgánica.

Oxígeno disuelto; este es esencial para la respiración de microorganismos aerobios, así como otras formas de vida acuáticas.

2.1.3 Parámetros biológicos

Engloban los principales grupos de microorganismos y organismos patógenos, los principales son los siguientes:

Bacterias: estas desempeñan un papel fundamental en los procesos de la descomposición y estabilización de la materia orgánica. Por ello es fundamental conocer sus características, funciones, metabolismo y proceso de síntesis. Los coliformes se emplean como indicadores de la contaminación por desechos humanos.

Hongos: muchos de ellos basan su alimentación en materia orgánica muerta. Estos al igual que las bacterias son los principales responsables de la descomposición de la materia orgánica. Pueden desarrollarse con pH bajos y temperaturas más bajas.

Algas: estas pueden provocar serios inconvenientes, tanto en la EDAR, como en la zona donde se vierte el agua. Esto es debido al fenómeno conocido como crecimiento explosivo, donde bajo ciertas condiciones estas crecen y se reproducen rápidamente. Una solución para impedir esto es la eliminación de carbono, fósforo y nitrógeno.

Protozoos: aquellos que afectan al tratamiento de aguas residuales son las amebas, los flagelados y los ciliados libres. Ciertos protozoos son también patógenos.

Organismos patógenos: son todos aquellos virus, bacterias, protozoos y demás organismos celulares que son dañinos para el ser humano. Estos pueden proceder de desechos humanos que estén infectados o que sean portadores de una determinada enfermedad. Son un grave peligro para la salud pública, ya que pueden provocar, entre otras, enfermedades en el aparato intestinal.

2.2 Legislación actual sobre el tratamiento de aguas residuales

La legislación actual sobre el tratamiento de aguas residuales viene determinada principalmente por la UE. Esta establece tanto las sustancias prioritarias, como las normas de calidad ambiental de las aguas. Dicha información viene reflejada en la Directiva 2013/39/UE del Parlamento Europeo de 12 de agosto de 2013, basada principalmente en la 91/271/CEE.

Tras la trasposición por parte de España de estas Directivas Europeas, entró en vigor el Real Decreto-Ley 11/1995, de 21 de mayo. En este se establece la normativa sobre el tratamiento de aguas residuales, detallando las normas de recogida, depuración y vertido de dichas aguas. La última modificación de este Real Decreto fue el día 20 de septiembre del 2012.

A su vez, en la Ley 9/2010, de 4 de noviembre, de aguas de Galicia se estipulan las competencias de esta Comunidad Autónoma, la organización y el funcionamiento de la Administración Hidráulica de Galicia. Ordena también el ciclo integral del agua de uso urbano, las infracciones y sanciones etcétera. Esta Ley se modifica con el Decreto 1/2015, de 15 de enero, publicada en el DOG (Diario Oficial de Galicia) Núm. 10. Además, en las IOTHG (Instrucciones técnicas para obras hidráulicas en Galicia) de Abastecimiento, Saneamiento y la Serie EDAR, se determinan los cálculos técnicos para el diseño de una depuradora, así como los requerimientos.

El vertido de aguas residuales urbanas viene regulado por la Directiva 91/271/CEE, anteriormente nombrada. Estos requisitos de calidad se muestran en la Tabla 2-1. En esta se determina que poblaciones costeras menores de 10.000 habitantes, aunque viertan en zonas sensibles como es la Ría de Pontevedra, tienen que tener un tratamiento adecuado, es decir, que cumpla los requisitos de calidad y las disposiciones de la Directiva anteriormente nombrada y de la Ley 9/2010. Estos requisitos de calidad vienen dados en la siguiente tabla

Parámetros	Concentración	Porcentaje de reducción
DBO ₅	25 mg/L	70-90
DQO	125 mg/L	75
SST	35 mg/L	90
P	2 mg/L	80
N	15 mg/L	70-80

Tabla 2-1 Requisitos de los vertidos procedentes de aguas urbanas en zonas sensibles [7]

Para comprender la tabla de exigencias es necesario explicar el concepto de habitante equivalente. Este viene definido en la Directiva 91/271/CEE, determinando que un habitante equivalente (1 h-e) es aquel que aporta una carga orgánica biodegradable con una “demanda bioquímica de oxígeno de 5 días” (DBO₅) de 60 g de oxígeno por día [8].

Por otra parte, en la Ley 09/2010, se contemplan también los objetivos de calidad de las aguas de Galicia, por lo que la EDAR no podrá verter aguas que no cumplan dichos parámetros. En esta contempla de concentración de metales, que no serían generados por aguas residuales urbanas, por lo que pueden ser obviados. Pero también trata concentraciones bacteriológicas, como se muestra en la Tabla 2-2. Ufc significa unidad formadora de colonia.

Parámetros	Unidad	Valor	Observaciones
Coliformes fecales	Ufc/100mL	100	90% muestras
Estreptococos fecales	Ufc/100mL	100	90% muestras
Coliformes totales	Ufc/100mL	500	90% muestras

Tabla 2-2 Requisitos bacteriológicos [9]

Por otro lado, en el Anexo 3 de [9], se muestran los límites de emisión de las aguas residuales en Galicia. En estos límites se tratan parámetros de micro contaminantes orgánicos e inorgánicos (como el cromo, plomo o el arsénico) que no se consideran habitualmente en aguas de origen residencial porque se encuentran en muy bajas concentraciones.

2.3 Estado del tratamiento de aguas residuales en España

España tiene una capacidad máxima de depuración de agua de 8.130 hm³/año y en el año 2016 se trató 4.097 hm³/año, es decir, menos del 50% de la capacidad máxima, como se muestra en la Figura 2-2. A pesar de que España tiene más capacidad de tratamiento de aguas que la que genera, hay poblaciones con más de 10.000 habitantes que no tratan sus aguas, esto incumple la Directiva Europea. A su vez solamente el 8,8% de agua residual recibe un tratamiento terciario para poder ser reutilizada. La zona de España donde más se reutiliza el agua es el Levante, Cartagena y Valencia principalmente, en esta zona se reutiliza más del 50% del agua residual. Este gran porcentaje se debe a la escasez e irregularidad de lluvias. El caso contrario es el norte de España, como por ejemplo en Galicia, donde no llega al 1% el agua residual que es reutilizada. Por otro lado, los fangos obtenidos de estos procesos también se reutilizan. El 79% se reutiliza como fertilizante en agricultura, jardinería y silvicultura. Mientras que el resto se incinera, 11%, o se deposita en vertederos, 10% [10]. Por otro lado, se observa el aumento del agua tratada con respecto a la consumida. En 1990 solamente el 22,4% del agua residual era tratada, mientras que en el año 2017 aumentó hasta el 93,3%. Habiendo un total de aproximadamente 2000 depuradoras en funcionamiento en el país [11].

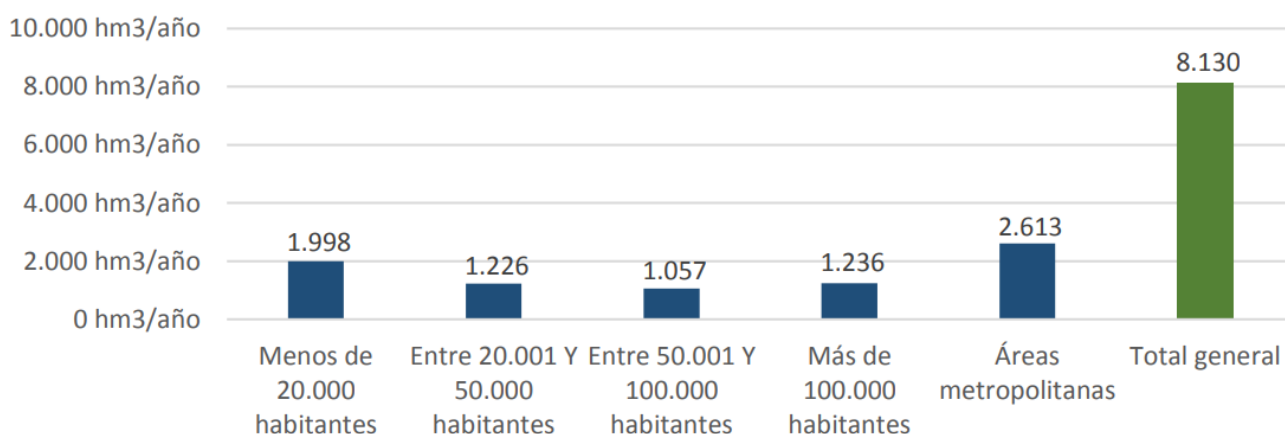


Figura 2-2 Capacidad de depuración en España [10]

En cuanto a los tratamientos realizados en estas EDAR, el 98,6% tiene tratamiento primario, el 95,67% tiene tratamiento secundario y el 46,3% tiene otros tratamientos. A su vez el 35,5% tiene tratamientos de eliminación de nitrógeno, disminuyendo al 24,1% aquellas que cuentan con eliminación de fósforo. Y por último solamente el 15,1% tiene desinfección a través de rayos UV [12].

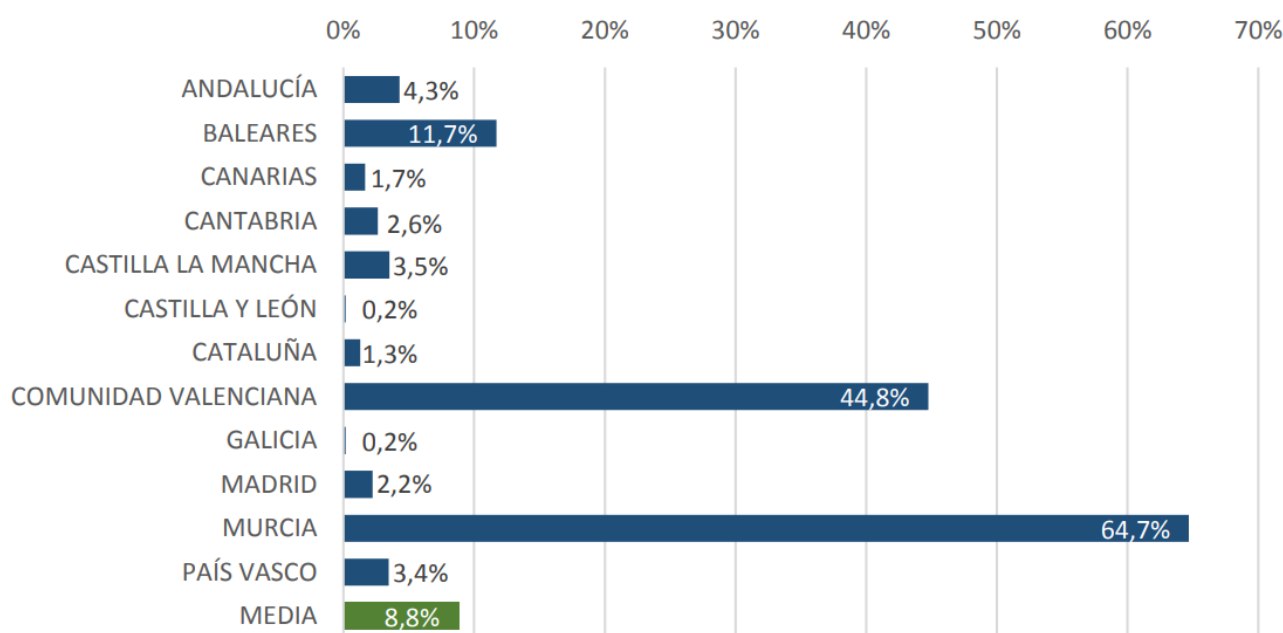


Figura 2-3 Porcentaje de agua residual reutilizada [10]

A pesar de estos datos, España ha sido multada reiteradas veces por la UE, por incumplimiento de la Directiva Europea. La última vez el 25 de julio de 2018, esta fue debido a 17 poblaciones con más de 15.000 habitantes, seguían vertiendo directamente a ríos y al mar aguas residuales sin tratar. Actualmente, 8 de esas 17 poblaciones sigue sin tratar sus aguas residuales. Este incumplimiento ha provocado una multa de 22 millones de euros al Estado Español [13].

Por todo ello, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico publicó en el 2018 un nuevo Plan Nacional de Depuración, Saneamiento, Eficiencia, Ahorro y Reutilización. En éste se establecen 3.500 medidas priorizadas para los próximos 18 años, con una inversión estimada de 10.000 millones de euros. Antes del 2023, la Dirección General del Agua prevé realizar 86 actuaciones, de las cuales más de 15 ya están en ejecución y cuentan con una financiación europea de 477 millones de euros [14].

2.4 Tratamiento actual de las aguas residuales en la ENM

Según lo establecido en la “Resolución de determinación do canon da agua” [15] y la “Declaración de las fuentes de abastecimiento de agua” [15] firmada el 21 de abril de 2014 por la Dirección de la ENM, el abastecimiento de agua a la ENM no lo realiza el Ayuntamiento de Marín, si no que estas provienen de los manantiales de Neivoo y Loira. El resultado es un canon del agua más bajo de lo normal. En el año 2012 se determinó como caudal máximo 147.168 m³/cuatrimestre, es decir, 441.504 m³/año lo cual casi cuadruplica el consumo real en la ENM, que como se puede ver en la Figura 2-4 es de media 117.830 m³/año.

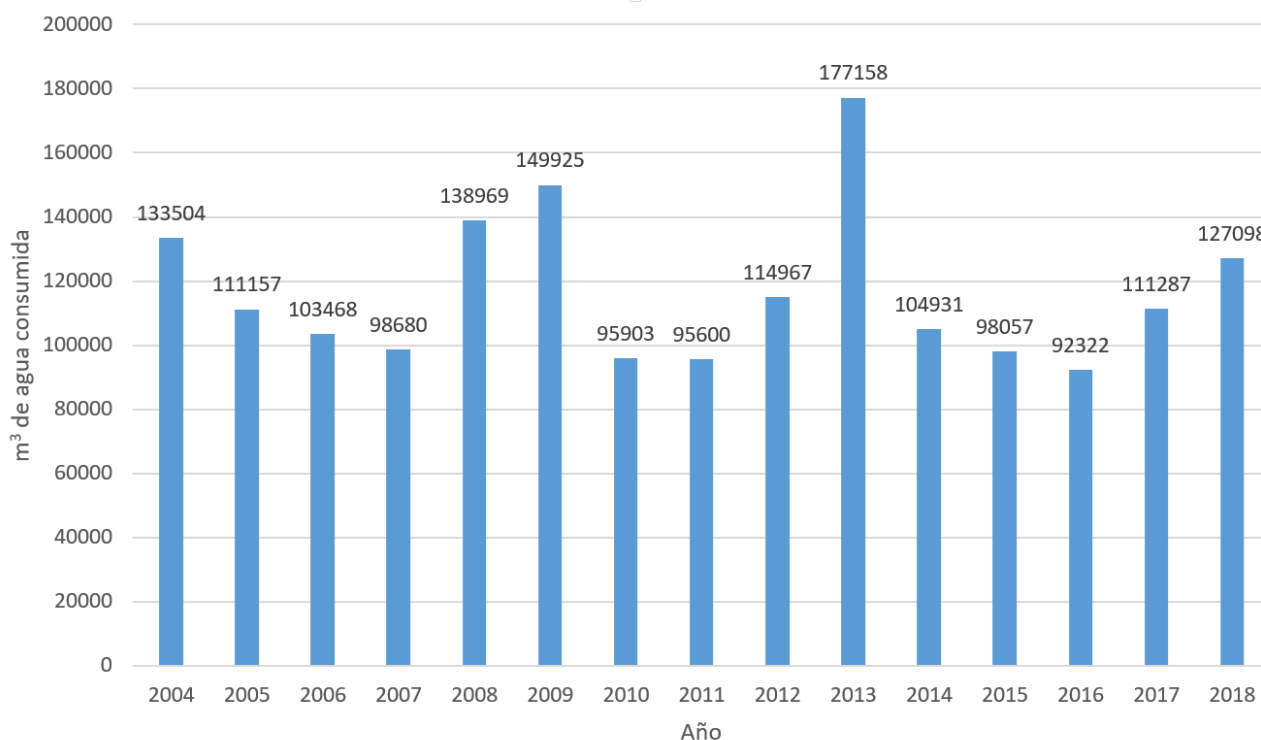


Figura 2-4 Consumo histórico de agua en la ENM [16]

Cumpliendo con las Directivas Europeas y las correspondientes leyes nacionales, el agua residual procedente de la ENM es tratada. Si se vertiera directamente en la Ría de Pontevedra provocaría daños medioambientales irreparables en el ecosistema de la Ría, así como el de las Islas de Ons y Tambo. Actualmente y desde el 2003, la red interior de la ENM se encuentra conectada con la red de alcantarillado municipal de Marín, a la cual se vierten las aguas residuales producidas en los acuartelamientos. A su vez las aguas residuales de Marín se tratan en la EDAR de Placeres, que también trata las aguas provenientes de los municipios de Poio y Pontevedra [16].

Antes del 2003, como muestran en distintos documentos de la ENM [16], existía una planta de tratamiento de aguas residuales en la ENM, se encontraba en la zona del CASI, al W del Cuartel AFM. Esta fue construida por AGROMAN, Empresa Constructora, y vertía las aguas tratadas a la Ría de Pontevedra. La depuradora era capaz de tratar el agua residual de 4000 habitantes equivalentes (h-e), con una dotación de 200 L/h-e/día. Con una carga de 70 y 90 g/h-e/día de DBO₅ y SST correspondientemente. Tal y como se puede ver en la Figura 2-5, la línea de tratamiento de las aguas residuales generadas en la ENM era la siguiente:

- Obra de llegada, aliviadero y bypass general. El agua se recibía por una arqueta, esta tenía un aliviadero lateral de crecidas y seguridad. Además, de una compuerta tajadera para el bypass. Las compuertas eran de accionamiento manual.
- Desbaste mecánico. Existían dos rejillas: una de 40 mm entre cada barrote y otra de 8 mm. La limpieza de las mismas se hacía manualmente.
- Desarenado, desengrasado y preaeración. Comenzaba con una cámara de hormigón donde se retenían las grasas y los sólidos sedimentables. En la cámara se realizaba un preaeración para separar las grasas por flotación.
- Bombeo del agua. La capacidad de bombeo total era de 210 m³/h. Estas funcionaban automáticamente y también bombeaban los líquidos filtrados de las eras de secado y los fangos recirculados del decantador secundario.

- Fangos biológicos. Se añadía oxígeno para que tuviese lugar el metabolismo de la materia orgánica. Esto se realizaba a través de la aireación del agua. Así los fangos eliminaban las sustancias orgánicas.
- Clarificación. Los fangos sedimentaban en el decantador secundario y se recirculaban a la fase anterior. El agua clarificada pasaba a la siguiente etapa de tratamiento.
- Cloración. Se aplicaba hipoclorito sódico, esta tenía lugar en una cámara de 17 m³, y duraba 30 minutos el proceso.
- Eras de secado. Los fangos resultantes se deshidrataban en cuatro eras de 25 m², donde se conseguía una reducción de la humedad de aproximadamente 75%.

Como resultado de este tratamiento se lograba reducir a 30 mg/l la DBO₅ y 30 mg/l los SST, y no se trataba ni el N, ni el P. Estos valores no cumplen con los requerimientos actuales determinados por la legislación vigente [7]. Además, la planta, cuyos planos se muestran en la Figura 2-5, tenía otros problemas que provocaron su inhabilitación y posterior desinstalación. En primer lugar, esta no tenía una recogida de grasas separada con respecto a los sólidos sedimentables, lo que provocaba que terminasen en los mismos lodos y empeorasen su calidad. Para cumplir con los requerimientos de calidad del agua se debía redimensionar el tratamiento biológico. Los fangos no tenían un tratamiento adecuado y por últimos varios procesos no estaban los suficientemente automatizados, lo que provocaba un coste en el mantenimiento elevado. Solventar estos gastos tenía el mismo costo que la conexión del alcantarillado al de Marín, por lo que se optó por lo segundo para minimizar futuros gastos en el mantenimiento de la depuradora propia de la ENM.

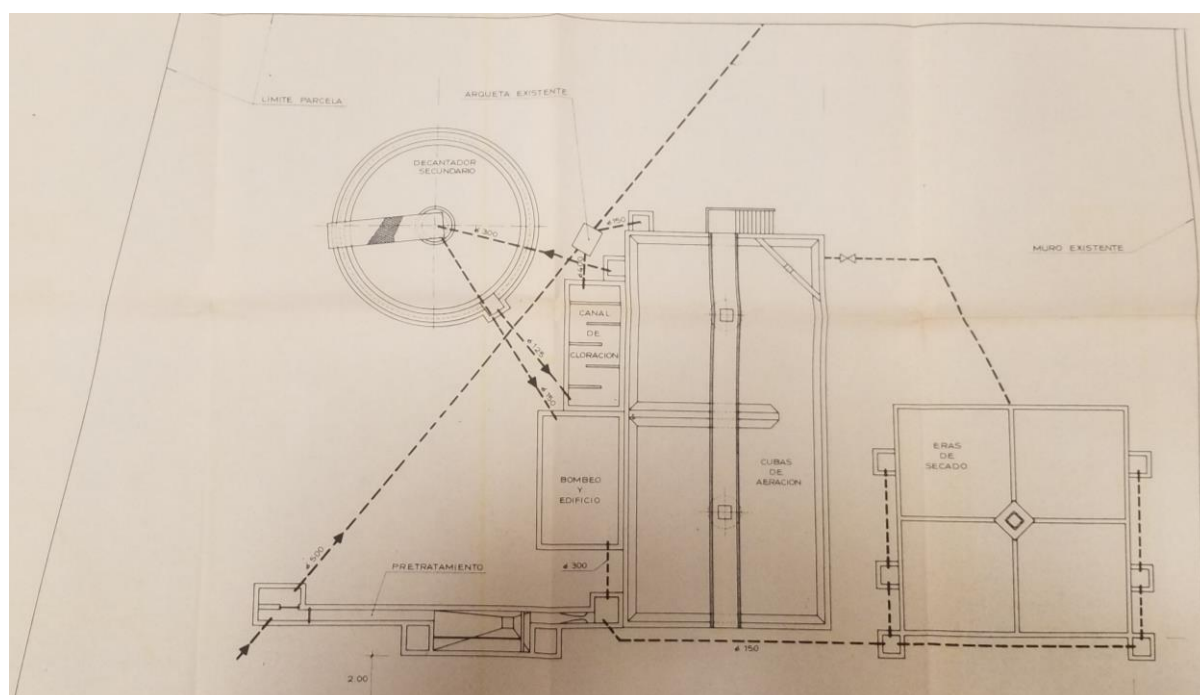


Figura 2-5 Planos de la antigua EDAR de la ENM [16]

La EDAR de Placeres Figura 2-6, donde se tratan actualmente las aguas residuales de la ENM, tiene tratamientos primarios y secundarios, así como un tratamiento terciario el cual consiste en un proceso de desinfección mediante rayos UV. Este tratamiento a través de la radiación UV, destruye el ADN de los gérmenes, impidiendo su reproducción y terminando en la muerte de los mismos.

Aunque es necesario reseñar que esta EDAR está en proceso de reforma, ya que en marzo del 2016 el Tribunal de Justicia de la UE ratificaba el incumplimiento reiterado de los cánones del agua vertida

a la Ría de Pontevedra. Señalando que esto es un indudable riesgo para la salud pública. Además, los requisitos del agua vertida a la Ría de Pontevedra son más exigentes al ser esta una zona sensible y con población mayor de 10.000 habitantes [17]. Estas circunstancias motivan que a principios del 2019 la Xunta de Galicia destinara 16,5 millones de euros para comenzar la mejora de las instalaciones, incrementado la capacidad de tratamiento de aguas residuales a 900 L/s [18].



Figura 2-6 EDAR de Placeres [19]

3 ESTUDIO DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS Y SELECCIÓN

3.1 Alternativas tecnológicas para la línea de aguas

3.1.1 Tratamientos físicos

Los tratamientos u operaciones físicas son aquellos que producen cambios en las características y propiedades del agua mediante la aplicación de fuerzas físicas. Según [6], las principales operaciones de este tipo empleadas en las EDAR son:

- **Medición de caudales.** Es un aspecto fundamental en el tratamiento de las aguas, gracias a esto se puede realizar una correcta selección, uso y mantenimiento de la depuradora. El dispositivo medidor consta de dos partes; un sensor o detector que entra en contacto con el efluente y un dispositivo convertidor que traduce la señal en datos legibles para el operador. Existe una gran diversidad de aparatos disponibles en el mercado, según en la etapa del proceso que vaya a ser utilizado se elegirá uno y otro. Estos pueden utilizar el movimiento de una hélice para determinar el caudal, la pérdida de carga, la presión u otros factores del agua.
- **Desbaste.** Es una operación en la que se eliminan los sólidos de mayor tamaño del agua residual. El agua se hace pasar por elementos separadores y tiene como objetivo separar todos aquellos materiales de tamaño excesivamente grueso que además de representar por sí una forma de contaminación (sólidos en suspensión), pueden dañar u obstaculizar las fases sucesivas de tratamiento. Estos pueden ser utilizados en el pretratamiento como las rejillas que tienen un intervalo de paso de 1,5 a 3,75 cm y los tamices de 0,25 a 0,5 cm. También en el tratamiento secundario como los tamices inclinados fijos, Figura 3-1, con un intervalo de 0,0025 a 0,25 cm, los discos giratorios o un dispositivo centrífugo que tienen intervalos de pasos similares al anterior.

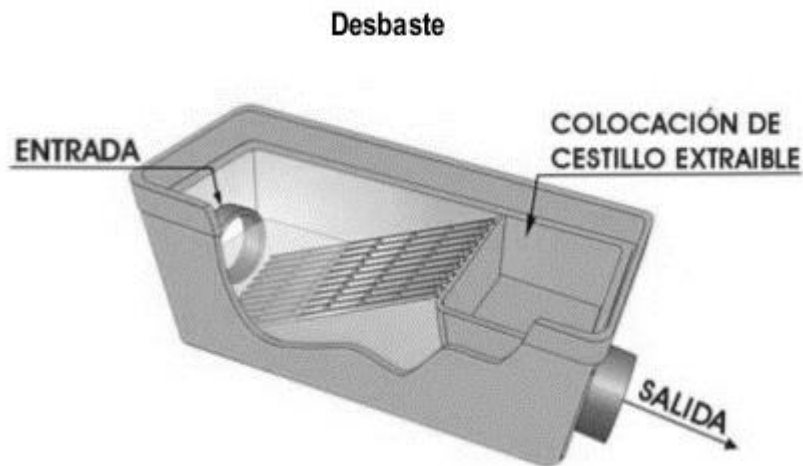


Figura 3-1 Esquema de desbaste por rejillas [20]

- **Aliviadero general.** Este proceso tiene como misión permitir la evacuación de los caudales superiores a los de diseño de la instalación. En el caso de una red de saneamiento unitaria las tormentas van a aportar excesivos caudales de agua de lluvia que van a poder superar la capacidad máxima con la que fue construida la instalación. Así mismo, sirve para evacuar el agua del alcantarillado en el caso de que se tenga que interrumpir la entrada de agua residual a la EDAR por reparación urgente e inexcusable en la zona del pretratamiento. Es una obra estática que consiste en uno o más vertederos de suficiente longitud, que permite la evacuación del exceso de agua por su nivel superior. El agua vertida es recogida por un colector que vierte en el cauce. Es necesario un sistema de medición de caudales para que el aliviadero funcione correctamente.
- **Pozo de gruesos.** Consiste en un pozo donde pueden sedimentar residuos de gran tamaño y peso. La extracción se realiza mediante cuchara anfibia que puede coger, en sus valvas, los residuos depositados en su fondo. La manipulación de esta cuchara anfibia se realiza por control manual del operador. En algunas plantas se introduce aire mediante difusores para pre airear el agua residual.
- **Homogeneización de caudales.** Esta técnica trata de solventar las variaciones de caudal y concentración en el flujo del agua entrante. Estas variaciones dificultan la correcta explotación del agua y disminuyen la efectividad de los tratamientos. Para solventar tales problemas se amortiguan por laminación las variaciones de caudales, consiguiendo un caudal casi constante. Existen dos tipos de homogeneización: “en línea”, la totalidad del caudal pasa por el tanque y permite reducir las concentraciones de varios constituyentes e igualar los caudales considerablemente. Y “en derivación”, solo pasa por el tanque aquel caudal que es excedente, lo que provoca menores pérdidas, es decir, se necesita menos energía para el bombeo del agua, aunque la reducción de algunos constituyentes no es tan alta como en el método anterior.
- **Mezclado.** Puede tener lugar en varias fases del tratamiento, complementando otras operaciones. Los distintos tipos son: mezcla completa de una sustancia con otra, mezcla de suspensiones líquidas. Un ejemplo importante es la mezcla del cloro con el efluente saliente de los tanques de sedimentación secundarios.

La mayoría de estas operaciones se pueden clasificar en mezclas rápidas, con una duración de aproximadamente 30 segundos y cuyo objetivo principal es mezclar completamente una sustancia con otra. La otra categoría son las mezclas continuas en reactores con el fin de mantener un estado de mezcla en el tanque donde tiene lugar dicho proceso.

- **Sedimentación o decantación.** Proceso físico, mostrado gráficamente en la Figura 3-2, de separación que tiene lugar por la acción de la gravedad que hace que una partícula más densa que el agua tenga una trayectoria descendente, depositándose en el fondo del sedimentador. Esta

operación será más eficaz cuanto mayor sea el tamaño y la densidad de las partículas a separar del agua, lo cual provocará que sea mayor su velocidad de sedimentación, siendo este el principal parámetro de diseño de estos equipos. El fin de esta operación es la eliminación de arenas en decantadores primarios, y sólidos en suspensión biológicos en decantadores secundarios, para lo que es necesario la floculación previa.

Existen cuatro tipos distintos de sedimentación: discreta, las partículas que sedimentan no interactúan entre ellas, se eliminan las arenas. Sedimentación floculante, las partículas floculan, es decir, se unen para formar agregados de mayor tamaño, lo que facilita la sedimentación en decantadores primarios o secundarios. De tipo retardada, estas se refieren a las partículas que generan fuerzas entre ellas lo que impide su decantación, se utiliza en unidades de tratamiento biológico. Por último, por compresión, las partículas se sitúan de tal forma que generan una estructura y esta solamente puede sedimentar si se comprime, esta compresión tiene lugar gracias a las partículas que se añaden sobre la estructura por sedimentación. Esta se utiliza en el fondo de decantadores secundarios y en el espesamiento de fangos.

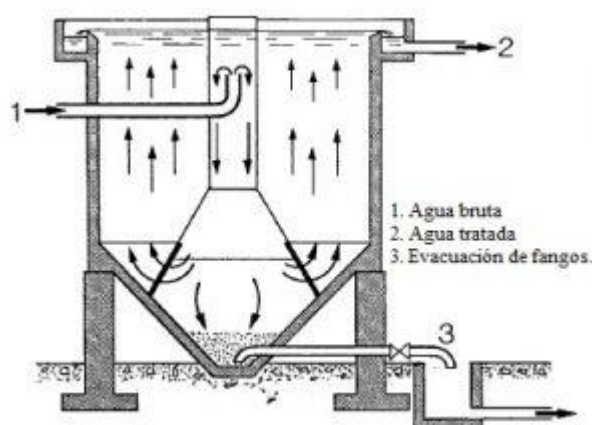


Figura 3-2 Decantador cónico-cilíndrico [21]

- **Aireación.** En este proceso se introduce aire u oxígeno para que tenga lugar el tratamiento de fangos activos, o para que tenga lugar la flotación, ya que el aire contribuye a que los sólidos en suspensión floten. Tiene lugar el fenómeno de transferencia de gases, el fenómeno en el que un gas se transforma en otra fase, normalmente de gas a líquido. La aplicación más común de este proceso es la transferencia de oxígeno durante la aireación en el tratamiento biológico. Esto se debe a la poca solubilidad del oxígeno en el agua, por lo que no suele ser suficiente la cantidad de oxígeno que penetra en el agua por la superficie del líquido. Para la creación de inter-fases de agua y oxígeno se suministran burbujas del mismo aire u oxígeno puro. Estas pueden ser a través de aireadores en profundidad, normalmente unos 10 metros. O mediante aireadores de superficie, que consisten en grandes turbinas, que necesitan mayor potencia.
- **Filtración en medio granular.** Esta operación se emplea para la eliminación de sólidos en suspensión de los procesos de tratamiento biológico y químico. Este proceso tiene dos fases: la propia filtración y el lavado o regeneración. Según si son filtros continuos o semicontinuos estas fases serán consecutivas o simultáneas.
- **Flotación.** Es un proceso físico, como se puede observar en la Figura 3-3, fundamentado en la diferencia de densidades. La flotación permite separar la materia sólida o líquida de menor densidad que la del fluido, por ascenso de ésta hasta la superficie del fluido, ya que en este caso, las fuerzas que tienden hacia arriba (rozamiento y empuje del líquido) superan a la fuerza de la gravedad. Se generan pequeñas burbujas de gas (aire), que se asociarán a las partículas presentes en el agua y serán elevadas hasta la superficie, donde son arrastradas y sacadas del sistema. Esta

operación se utiliza tanto para eliminar materia suspendida como grasas, como para para la concentración de fangos biológicos. Está se basa en el proceso de aireación, nombrado anteriormente.

En el tratamiento de aguas se añaden sustancias químicas y se utiliza aire como agente de flotación para formar burbujas. En función de cómo el aire se introduzca en el líquido, se tienen tres sistemas de flotación: flotación por aire disuelto, en este sistema el aire se introduce en el agua residual bajo una presión de varias atmósferas. Flotación por aire inducido, la operación es similar al caso anterior, pero la generación de burbujas se realiza a través de difusores de aire, normalmente situados en la parte inferior del equipo de flotación, o bien inducidas por rotores o agitadores. En este caso el tamaño de las burbujas inducidas es mayor que en el caso anterior. Por último, flotación por aireación, las burbujas se introducen directamente al líquido por difusores o turbinas. Este sistema es más eficiente con materias que generen espumas.

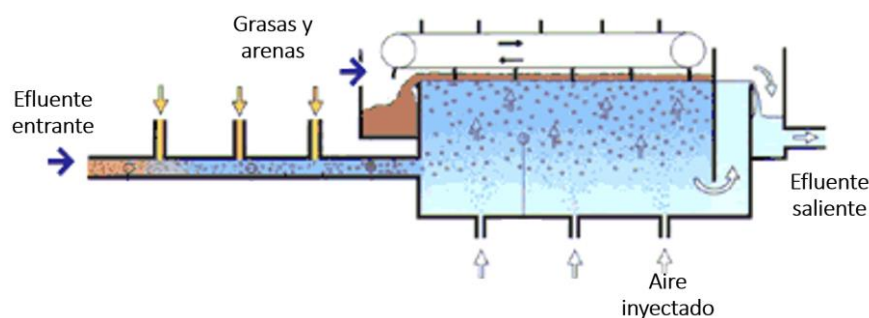


Figura 3-3 Esquema del proceso de flotación [22]

3.1.2 Tratamientos químicos

Los tratamientos químicos, de acuerdo con [6], son aquellos que se basan en reacciones químicas entre distintas sustancias. Estos se combinan junto a los procesos físicos y a los biológicos para obtener el efluente de salida con las características deseadas. Estos procesos son aditivos, exceptuando la adsorción con carbón activo. Provocando que aumente el número de sustancias en el agua. Una desventaja de estas operaciones es que su coste depende del coste de la sustancia que se utilice y este precio puede variar debido a diversos factores.

Los principales procesos químicos son los siguientes:

- **Precipitación química.** En esta operación se alteran las propiedades de los sólidos en suspensión y los disueltos a través de la adición de productos químicos. Los sólidos en suspensión son partículas de muy pequeño tamaño, que conforman una suspensión coloidal. Estas suspensiones coloidales suelen ser muy estables, en muchas ocasiones debido a interacciones eléctricas entre las partículas. Por tanto, tienen una velocidad de sedimentación extremadamente lenta, por lo que haría inviable un tratamiento mecánico clásico. Una forma de mejorar la eficacia es la adición de ciertos reactivos químicos que, en primer lugar, desestabilicen la suspensión coloidal (coagulación) y a continuación favorezcan la floculación de las mismas para obtener partículas fácilmente sedimentables. Los coagulantes suelen ser productos químicos que en solución aportan carga eléctrica contraria a la del coloide. Los elementos más utilizados son la cal, el cloruro férrico y el sulfato de alúmina.

Los fosfatos pueden ser eliminados mediante este método, se pueden utilizar sales metálicas como el cloruro de hierro o cal.

- **Adsorción.** Proceso consiste en que las sustancias solubles son extraídas de la disolución en la que están. El tratamiento usual de adsorción es a través de carbón activado, este suele ser un proceso

de refinado tras un tratamiento biológico básico. Tras el tratamiento que recibe el carbón este puede encontrarse de dos formas; granular o en polvo. Este proceso es viable económicamente si el carbón tiene un medio eficaz para su regeneración y posterior reutilización. Ya que el carbón cuando pierde su capacidad de adsorción es tratado otra vez, pero no tiene las mismas propiedades que el carbón virgen.

- **Desinfección.** Esta operación destruye de forma selectiva organismos que provocan enfermedades. Se puede realizar mediante distintos métodos que serán descritos en los siguientes apartados. Es importante que la desinfección sea controlada, es decir, que la cantidad o fuerza del desinfectante sea la adecuada, porque si no puede ser contraproducente. Se pueden utilizar agentes químicos, como el cloro o el yodo. Agentes físicos como la luz o el calor. También a través de medios mecánicos o radiación.
- **Desinfección con cloro.** Este es el proceso de desinfección más común. El Cl_2 es el compuesto más utilizado, aunque también son comunes el hipoclorito sódico y cálcico, estos se utilizan en plantas pequeñas por su simplicidad y seguridad. Por último, el dióxido de cloro también se utiliza porque no reacciona con el amoníaco. No solo las medidas de DBO y DQO afectan a la eficacia de este tipo de desinfección, también se ve afectada por los tipos de compuestos presentes en el agua, el pH y el tiempo de contacto. Aunque si hay una relación directa entre la reducción del contenido bacteriano, las dosis de cloro y el tiempo de contacto.

Para comprenderlo es necesario explicar la reacción “Breakpoint”, esta tiene lugar cuando el tiempo de contacto es elevado, por lo que el N reaccionará con parte del Cl, lo cual puede constituir un problema. Esto se soluciona mediante una decloración, antes de verter el agua. Aunque según la experiencia para eliminar una mayor cantidad de bacterias, como el E. coli, se debe clorar sobrepasando el “Breakpoint”, así se obtiene cloro libre. En conclusión, si se desea eliminar una gran cantidad de bacterias, es más conveniente sobrepasar el “Breakpoint”, y de ser así se debe de clorar el agua posteriormente.

- **Decloración.** Proceso que elimina la totalidad del cloro tras el uso del mismo para desinfectar las aguas residuales. Ya que algunos compuestos que se forman al reaccionar con el cloro tienen efectos tóxicos sobre la fauna y otros seres que habitan las aguas donde se vierte el agua. El compuesto más utilizado para ello es el dióxido de azufre. Aunque el método más eficaz para realizar una decloración completa, es el carbón activado, proceso explicado anteriormente.
- **Desinfección con ozono.** Este proceso comenzó a ser utilizado en Francia para tratar aguas de abastecimiento. En la actualidad debido a los avances en materia de generación de ozono, esta operación ha comenzado a ser una alternativa económica al cloro en la desinfección de aguas residuales. Además, el ozono puede eliminar los olores y la materia orgánica soluble refractaria, lo que sustituiría al carbón activado también. El ozono es un oxidante extremadamente reactivo, gracias a esto destruye las bacterias directamente desintegrando su pared celular. Se traduce en que tiene mayor efectividad que el cloro. Además, la ozonización no se ve afectada por el Nitrógeno, ni por el pH. El ozono no tiene impacto ambiental sobre las aguas, esto se debe a que a pesar de tener un efecto nocivo sobre los organismos, es muy inestable por lo que en cuestión de minutos este compuesto desaparece. Algunas investigaciones muestran que el ozono genera compuestos tóxicos, pero estos también tiene una vida corta. La desinfección con ozono normalmente se encuadra en el tratamiento terciario. Se muestra gráficamente en la Figura 3-4.

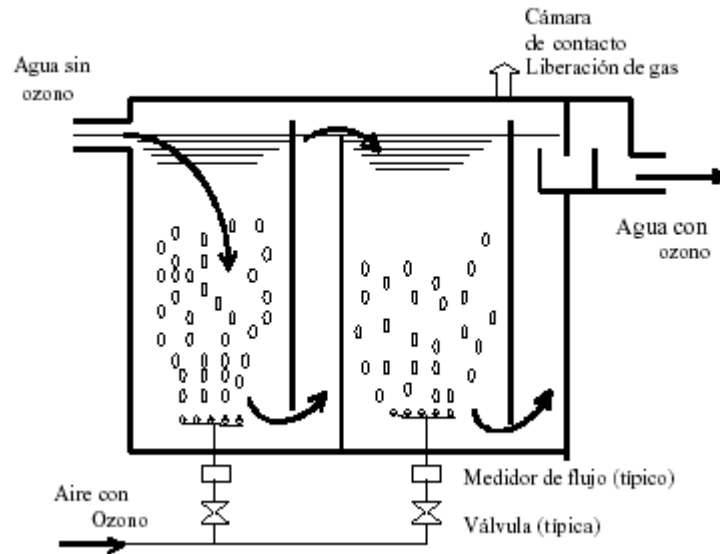


Figura 3-4 Esquema de la desinfección con ozono [23]

- **Desinfección por rayos UV.** Al principio se utilizaba esta técnica para aguas de suministro de alta calidad, pero como en el ozono esta operación se utiliza actualmente para el tratamiento de aguas residuales. Esta como el ozono no genera compuestos tóxicos. Se podría tratar como un desinfectante físico, la radiación penetra en la pared celular y es absorbida, esto modifica el ADN y el ARN, provocando que estos organismos no se puedan reproducir o incluso su muerte. Se ha demostrado que si hay gran cantidad de SST, o la turbiedad del agua es considerable este proceso pierde eficacia. Porque estos sólidos absorben la radiación convirtiéndose en escudos de las bacterias. Aunque esta técnica no genera residuos tóxicos si es cierto que altera determinados compuestos químicos, aunque a día de hoy se comprende que estos compuestos que se generan no son dañinos o su vida es muy corta. A pesar de ello es reseñable que se consume más energía que en los otros procesos nombrados.

3.1.3 Tratamientos biológicos

Los procesos biológicos, según [6], tienen en común la utilización de microorganismos (entre los 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. 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. Los procesos aerobios se basan en la eliminación de los contaminantes orgánicos en presencia de oxígeno por su transformación en biomasa bacteriana, CO₂ y H₂O. Los procesos anaerobios, en ausencia de oxígeno, transforman la materia orgánica en biogás, mezcla de metano y CO₂. Se pueden diferenciar en procesos de cultivo en suspensión, donde los microorganismos se encuentran en suspensión. O los de cultivo fijo, cuyos microorganismos se encuentran fijados a un medio inerte, como piedras o plásticos.

Los principales procesos biológicos empelados en EDAR urbanas son los siguientes:

- **Fangos activos.** Es un proceso aerobio de cultivo en suspensión, que requiere un contacto íntimo entre el agua residual, la biomasa activa y el oxígeno. Consiste en poner en contacto en un medio aerobio, normalmente en un reactor o en un tanque de aireación, el agua residual con flóculos

biológicos formados por bacterias, en los que la materia orgánica es oxidada y degradada. Para acelerar los procesos naturales se les suministra oxígeno disuelto mediante difusores o aireadores mecánicos aumentando así la capacidad de tratamiento, también obtiene una mejor calidad del efluente y menor cantidad de fangos. En este proceso las bacterias son los microorganismos más importantes, una parte de la materia orgánica se oxida, mientras que otra se emplea para el crecimiento celular. Es tan importante que las bacterias eliminen la materia orgánica, como que formen un floculo adecuado para que se pueda separar posteriormente en la sedimentación. Sus instalaciones se encuentran abiertas como se puede observar en la Figura 3-5.



Figura 3-5 Estación de fangos activos [24]

- **Lagunas aireadas o estanques.** El proceso es esencialmente el mismo que los fangos activos, aunque en vez de un reactor utiliza un depósito excavado en el terreno. En la actualidad es necesario la recirculación de sólidos biológicos, así como instalaciones de sedimentación para cumplir los requisitos actuales del agua tratada. A diferencia de los fangos activos, en este proceso puede tener lugar la nitrificación, conversión del amoníaco en nitrato y nitritos. Esto se debe a los efectos térmicos, aumento de temperaturas, que puede conllevar estar en contacto directo con la atmósfera.
- **Reactores biológicos secuenciales.** (RBS) Su proceso biológico es idéntico al de los fangos activos, pero se llevan a cabo en reactores discontinuos cuyo proceso se divide en cinco etapas, Figura 3-6: llenado, reacción (aireación), sedimentación (clarificación), extracción (vaciado por decantación) y la fase inactiva. En ambos sistemas intervienen la aireación y la sedimentación. A diferencia de en las plantas convencionales, donde los procesos se llevan a cabo simultáneamente en tanques separados. El empleo de un único tanque reduce sustancialmente el espacio y la inversión necesaria. Es fundamental controlar los parámetros que regulan la purga del fango, es decir, la cantidad y la frecuencia de fango purgado. Este fenómeno puede tener lugar en la fase de sedimentación o en la inactiva.

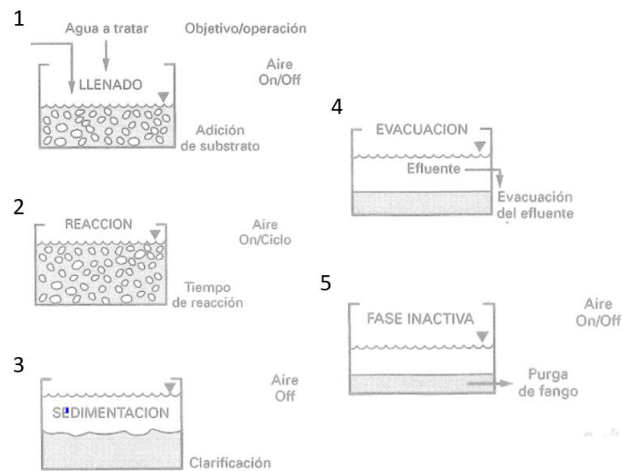


Figura 3-6 Secuencia de funcionamiento de un RBS [2]

- **Filtros percoladores.** También denominados lechos bacterianos. Este tratamiento consiste en un lecho formado por un medio permeable que tiene adheridos microorganismos y a través de este se filtra el agua. El medio filtrante está compuesto fundamentalmente por piedras o escorias y tiene una profundidad media de 1,8 metros. Estos suelen ser circulares, y también pueden estar compuestos por plásticos y ha de quedar espacio suficiente para que circule aire, que asciende de forma natural. Los filtros tienen un sistema de drenaje para recoger el efluente y los sólidos biológicos. La materia orgánica se degrada bajo la acción de microorganismos aerobios, que se encuentran en la superficie de estas piedras o plásticos, con un espesor de milímetros. Cuanto mayor sea el espesor la materia orgánica, se metaboliza antes hasta llegar a la fase de arrastre, donde parte de la película es empujada por el efluente. En los filtros actuales la carga hidráulica se modifica para obtener un espesor uniforme, siendo el más eficiente. En este proceso la recirculación no tiene tanta importancia como en los fangos activos. Aunque si es necesario una instalación para separar el agua tratada y los microorganismos.
- **Filtros de desbaste.** Son filtros percoladores especialmente diseñados para trabajar con altas cargas de trabajo. Se usan principalmente para reducir la carga orgánica así como para obtener una nitrificación estacional. Necesitan altas tasas de recirculación.
- **Contactores biológicos rotativos.** Basados en los procesos biológicos aerobios. Requieren un contacto íntimo entre el agua residual, la biomasa activa y el oxígeno. Consisten en una serie de placas o discos, de polietileno, colocados en un eje horizontal que giran lentamente parcialmente sumergidos, un 49 %. Sobre la superficie de los discos se fija la biomasa que se encuentra alternativamente en contacto con el agua residual y el aire. Esto posibilita la ingestión de la materia orgánica por parte de los microorganismos y su posterior degradación en presencia del oxígeno del aire.
- **Digestión anaerobia.** Es un proceso anaerobio de biomasa suspendida. Se utiliza cuando las aguas residuales tienen una gran carga contaminante. En la descomposición de la materia orgánica, se genera como producto final, biogás, un gas de alto contenido energético, formado fundamentalmente por metano (60-80%), dióxido de carbono (40-20%) y trazas de otros elementos como sulfuro de hidrogeno. El biogás obtenido es susceptible de ser utilizado como combustible para la generación de energía térmica y/o eléctrica.

El proceso de digestión anaerobia se realiza en tanques completamente cerrados en los que intervienen varios tipos de microorganismos. Entre los más importantes y específicos de este proceso están por un lado las bacterias productoras de ácidos y por otro las bacterias productoras de metano. Las bacterias productoras de ácidos transforman la materia orgánica compleja, en productos intermedios. Las bacterias productoras de metano actúan sobre dichos productos

intermedios transformándolos en gases y subproductos estabilizados. El proceso que se origina es lento y requiere unas condiciones determinadas. La primera fase del proceso se denomina fase ácida, con pH por debajo de 6,8, la segunda fase se denomina metánica, la cual aumenta el pH a valores de 7,4, estas bacterias son muy sensibles a los valores de pH y se inhiben con valores inferiores a 6.

- **Filtro anaerobio.** Proceso de cultivo fijo, donde una columna rellena de medios sólidos trata la materia orgánica carbonosa contenida en el agua residual. El agua a tratar fluye en ascendente, así las bacterias se quedan adheridas al medio. Se utiliza para aguas con bajas concentraciones de residuos a temperatura ambiente.
- **Reactor biológico de membrana (MBR)** Se compone de dos partes integradas en una sola: por un lado, el reactor biológico responsable de la depuración biológica y por otro, la separación física de la biomasa y el agua mediante un sistema de filtración directa con membranas. El sistema, mostrado en la Figura 3-7, tiene una mayor capacidad para eliminar DQO coloidal, ya que al no atravesar la membrana tiene un tiempo de contacto mucho mayor con la biomasa. En los sistemas MBR se deriva de las elevadas concentraciones de biomasa con las que se trabaja en el reactor biológico gracias a la presencia de una barrera física (membrana) que no deja escapar las bacterias, lo que permite un control perfecto sobre la edad del fango y los parámetros principales de operación del sistema.

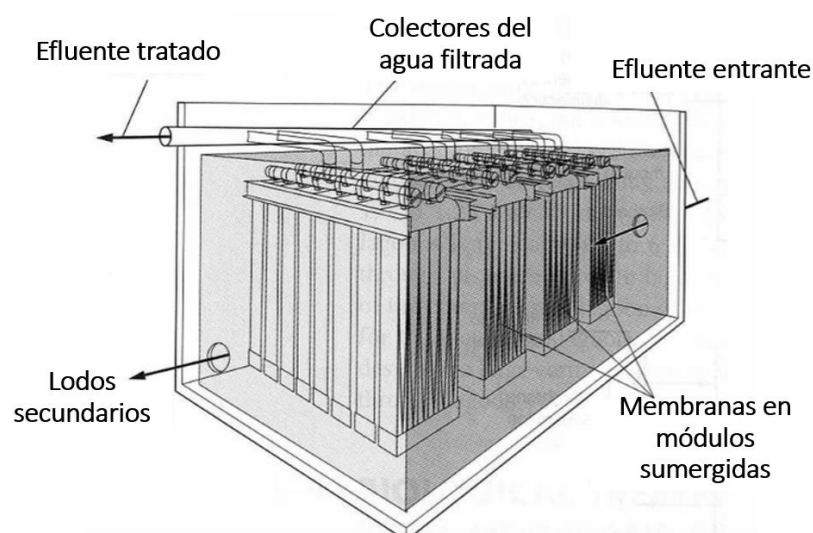


Figura 3-7 Esquema de un MBR [25]

- **Eliminación biológica de nutrientes.** Algunos procesos nombrados anteriormente, como los lodos activos, el RBS o el MBR, pueden ser modificados para eliminar tanto el P, como el N. Se produce aumentando el tiempo de contacto de las aguas residuales con los microorganismos, aumentando la temperatura, variando las condiciones de aireación, etcétera. Esta adaptación del proceso tiene un coste relativamente bajo.

El nitrógeno puede encontrarse de diversas formas en las aguas residuales, de hecho, este para ser eliminado en forma de N_2 es transformado en distintas moléculas intermedias. Los tres procesos biológicos fundamentales son la asimilación, la nitrificación y la desnitrificación. Como se muestra en la Figura 3-8 y según [26], la reacción de nitrificación se produce cuando hay aireación, es decir, oxígeno. En presencia de oxígeno el amonio presente en las aguas residuales se transforma en nitratos. Tras ellos las aguas pasan por otra etapa, la anóxica, donde hay ausencia de oxígeno disuelto. Provocando que la biomasa utilice el oxígeno presente en la molécula nitrato. Por último, la molécula al perder el oxígeno se une con otras moléculas de nitrógeno, creando gas nitrógeno el cual se evapora.

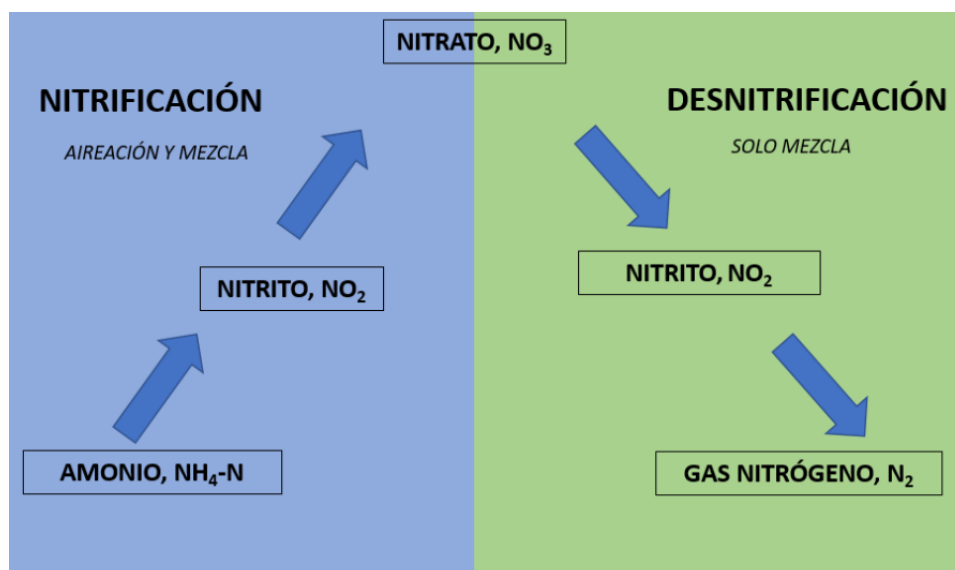


Figura 3-8 Esquema del proceso de eliminación de Nitrógeno [26]

Por otro lado, en cuanto a la eliminación del fósforo es reseñable que este se encuentra principalmente en forma de fosfatos y polifosfatos. Como los microbios utilizan este nutriente para su alimentación, una parte es eliminada en los procesos biológicos secundarios. Los dos tratamientos posteriores son la purga de fangos y el tratamiento en línea auxiliar. Es reseñable comentar que tanto el proceso de eliminación de N, como el de P pueden llevarse a cabo independientemente o en conjunto.

- **Humedales artificiales.** Este tratamiento tiene lugar en grandes depósitos excavados de poca profundidad. En estos el agua es tratada mediante procesos naturales que incluyen la utilización de microorganismos y algas. Existen distintos tipos, que son los aerobios, de maduración, facultativos y anaerobios.

3.2 Alternativas tecnológicas para la línea de fangos

De acuerdo a [6], las diferentes operaciones de depuración de un agua residual generan una serie de residuos que pueden clasificarse en dos grupos:

Sólidos gruesos, normalmente se obtienen en los pretratamientos y, por lo general, o bien son incinerados o se depositan en vertederos.

Lodos o fangos, se generan tanto en tratamientos primarios como en los secundarios. Se presentan en forma líquida o semisólida y con un contenido de entre 0,25 y 12% (en peso) de sólidos mayoritariamente biodegradables, según el proceso del que precedan. Los lodos se someterán a uno u otro tratamiento según sea su origen y su carga contaminante o tóxica. Estos tratamientos intentan reducir el volumen de estos fangos y estabilizar su composición. Las fases más usuales son:

- **Tratamiento químico.** Para realizar los tratamientos posteriores con eficacia es usual tratar los fangos químicamente. Se utilizan sustancias químicas inorgánicas, como sulfato de hierro, cloruro de aluminio. Utilizando polímeros solubles en el agua, esta sustancia orgánica tiene como objeto transformar las propiedades físicas de los lodos, como su densidad, o viscosidad. Los polímeros al disolverse en el agua se separan en aniones y cationes.
- **Concentración de fangos.** Para realizar dicha concentración existen varios métodos, los principales son los siguientes:

- Espesamiento, se emplean espesadores estáticos o dinámicos, según tengan o no rasquetas. Son unos depósitos de forma cónica en los que se concentran los fangos por decantación física.
- Flotación, determinados fangos se concentran mediante un proceso de flotación ayudado por la inyección de aire.
- Centrifugación, permite separar sólidos de líquidos. Cuando se aplica a fangos muy diluidos (1-2% de sólidos) se concentran.
- Prensa de alta presión, es uno de los sistemas más utilizados actualmente. Al comienzo del tratamiento los lodos drenan parte del agua gracias a la gravedad. Posteriormente hay dos zonas, primero la prensa de baja presión y después la de alta presión. El lodo circula por una cinta donde al final es extraído a través de rascadores.
- Prensa rotatoria, cuyo esquema gráfico se muestra en la Figura 3-9., es similar a la prensa de tornillo. Estas prensas al ser estancas también aíslan los olores y los ruidos. Esta prensa tiene forma cilíndrica y gira a bajas revoluciones. Debido al filtro que se encuentra en los lados, el agua lo atraviesa gracias a la fuerza centrífuga y a las fuerzas de fricción. Además, hay dos pantallas que ejercen presión sobre los lodos facilitando su separación.

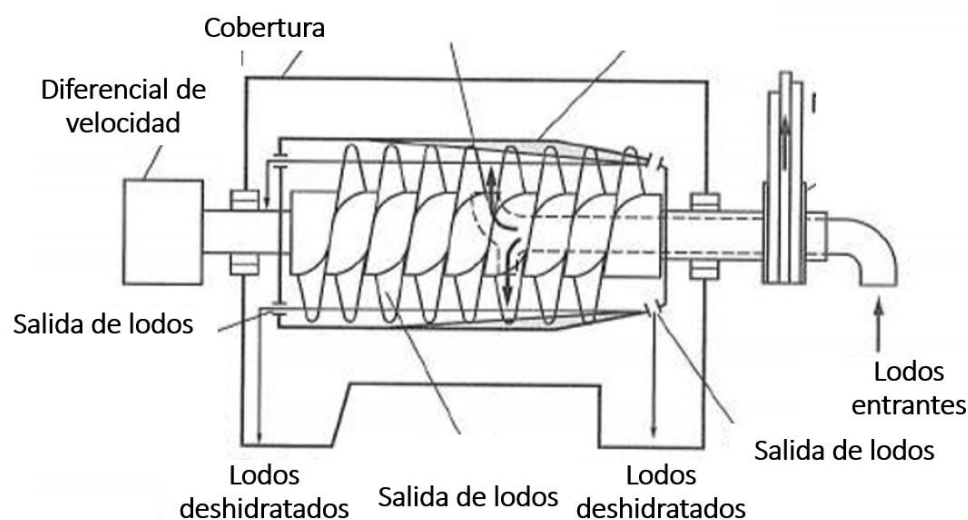


Figura 3-9 Prensa rotatoria [6]

- **Deshidratación de fangos.** Para disminuir el contenido de humedad de los fangos concentrados se emplean:
 - Eras de secado, consiste en la disposición de los fangos a secar sobre una superficie al aire libre dotada de un buen drenaje. Tienen como ventajas su simplicidad y bajo costes, aunque estas atraen insectos y generan grandes olores.
 - Filtración, se emplean filtros de vacío y filtros prensa para la deshidratación de fangos.
 - Centrifugación, permite separar sólidos de líquidos. Cuando se aplica a fangos menos diluidos (5-10% de sólidos) se deshidratan.
 - Secado térmico, se basa en la evaporación del agua a través de calor aplicado en los fangos. Existen secadores directos, indirectos y mixtos. Los secadores directos requieren una gran cantidad de energía, aunque el proceso es más rápido que los otros.
- **Estabilización.** Los fangos pueden ser estabilizados mediante digestión aerobia o anaerobia o mediante compostaje para su posterior uso como fertilizantes agrícolas.

- **Incineración o vertido.** Finalmente, los fangos no estabilizados pueden ser incinerados o retirados a vertederos controlado o empleados. La incineración de los fangos tiene varios aspectos que deben ser estudiado, estos son el tratamiento de las cenizas, la calidad de los humos, ya que muchas veces son necesarios filtros antes de ser expulsados a la atmósfera, y por último la cantidad de energía a utilizar.

3.3 Factores generales para la selección

De acuerdo a [6] los factores a tener en cuenta para la elección de los distintos procesos de la EDAR son los siguientes:

- Flujo de agua residual entrante en cada proceso, así como sus posibles variaciones.
- Las características, es decir, la carga contaminante del agua residual entrante y los requisitos de la saliente para su vertido directo a la Ría.
- Temperatura del agua durante todo el proceso, se debe a que ciertos procesos, sobre todo biológicos, deben tener lugar a una cierta temperatura para que sean los más eficientes posibles. Además, que no se puede verter el agua a una temperatura demasiado elevada.
- Dimensionamiento de las instalaciones, este debe realizarse a través de documentos y de datos de depuradores anteriores. Para esto es necesario conocer tanto los caudales, como las cargas de contaminantes y la cantidad de residuos que se van a generar.
- Energía consumida, así como productos químicos necesarios. Estos dos factores afectan tanto económicamente, como en su disponibilidad.
- Personal necesario, este factor es crítico ya que en la ENM hay falta de personal cualificado, lo que provocará que se elijan procesos automatizados. Así se disminuirá el mantenimiento y sus operaciones manuales.
- Fiabilidad y adaptabilidad, tanto la probabilidad que un proceso falle, por ejemplo, por su delicadeza, un tamiz, como su posibilidad de que continúe el funcionamiento o se puedan añadir otros nuevos.
- Terreno disponible, este factor es crítico ya que en la ENM no se dispone de una gran parcela para todas las instalaciones.
- Coste de construcción y mantenimiento, este factor es importante para considerar si es rentable la construcción de la EDAR a largo plazo con respecto al pago actual de las tasas por que sus aguas sean tratadas en la EDAR de Placeres

3.4 Criterios técnicos de selección

Estos criterios tienen como objetivo satisfacer todos los factores que condicionan la elección de los distintos procesos en esta planta. Es decir, los procesos que cumplan estos criterios van a ser los más aptos para la EDAR, por ejemplo, la automatización de la EDAR provoca que se requiera menos personal en la depuradora. Los criterios técnicos pueden clasificar en los siguientes apartados [6]:

3.4.1 Procesos sobre la línea de agua

Variabilidad de procesos, para cumplir las exigencias sobre el agua vertida es necesario utilizar distintos procesos que traten distintos contaminantes.

Igualar el flujo de agua y de concentración de contaminantes, al poder haber mayor flujo en momentos puntuales, sea por el mayor consumo de agua o por otras causas ajenas al usuario.

Automatizar los procesos, además deben tener sensores por si parámetros como la temperatura o el oxígeno se salen de los estándares necesarios.

Tratamientos de desinfección, además, de ser necesarios también se debe controlar los productos de la desinfección, como por ejemplo el cloro.

Procesos aeróbicos, convencionales y avanzados.

Uso de la energía, se deben evitar los picos de energía mediante un buen reparto de trabajos.

3.4.2 Procesos sobre la línea de fangos

Filtros mejorados y progresivos, así se evita que elementos extraños ataquen los procesos siguientes.

Las arenas pueden sedimentar en los decantadores primarios.

Control de patógenos sobre los lodos.

Recirculación de fangos para mejorar la eficacia de algunos procesos.

3.4.3 Control de olores

Cerramientos sobre las instalaciones para impedir que el olor llegue a zonas pobladas.

Impedir que se estanquen aguas en zonas no deseadas, lo que provocaría mayores olores.

3.4.4 Control del proceso

De ser posible se simulará el proceso mediante modelos matemáticos. También se realizarán modelos a pequeña escala, en el laboratorio, para comprobar la eficiencia de los procesos.

3.5 Selección de procesos

En base a lo expuesto anteriormente y teniendo en cuenta las necesidades propias de la ENM, los factores principales que van a determinar la selección de los distintos procesos en todas las etapas de la EDAR son los siguientes, por orden de importancia decreciente:

1. Cumplimiento de requisitos para verter las aguas en la Ría de Pontevedra y los requerimientos teóricos sobre el agua residual generada en la ENM.
2. El espacio que ocupen las instalaciones debido al limitado terreno disponible.
3. Los olores generados, porque la planta se encuentra cerca de zonas habitadas, los acuartelamientos.
4. La automatización de la planta, para disminuir el personal necesario y consecuentemente el personal necesario.
5. El precio de la construcción de las instalaciones y de sus mantenimientos y funcionamiento.

A continuación, se exponen las tecnologías seleccionadas para el pretratamiento, tratamiento primario, secundario y tratamiento de fangos.

3.5.1 Pretratamiento

- La obra de captación del agua residual del colector de la ENM, es decir, la red de alcantarillado que desvíe las aguas residuales a la EDAR, queda fuera del alcance de este proyecto. También la bomba que ejerce la suficiente presión manométrica para que el agua entre en la EDAR y alimente el proceso completo.
- Llegada del agua bruta, el agua residual procedente del bombeo de captación llegará mediante un colector que alimentará el pretratamiento. Al ser un sistema separativo no se considera necesario instalar un aliviadero general, ya que el caudal no aumentará más que lo estudiado, al no verse influenciado por las precipitaciones.

- Desbaste de sólidos [6], se establecerán unas rejillas, con un método de limpieza mecánico para disminuir el mantenimiento. Su finalidad es eliminar del agua todos los sólidos gruesos, que podrían dañar las instalaciones posteriores que atraviesan el efluente. Hay cuatro tipos distintos de rejillas cuyo mantenimiento es mecánico y no manual, son las siguientes: correa continua, catenaria, accionamiento por cadena y rastrillo recíprocante. La catenaria no va a ser utilizada porque al ser una instalación abierta esta emite olores y la EDAR se encontrará cerca de los acuartelamientos. Por otro lado, las rejillas con accionamiento por cadena tienen piezas móviles bajo el nivel del agua, esto dificultaría el mantenimiento y las reparaciones de la misma. Por último, las rejillas cuya limpieza se realiza a través del rastrillo, son más caras ya que el material principal es acero inoxidable, por ello el método seleccionado es la correa continua. Este método, transportará los sólidos a un contenedor mediante la correa, se expone a continuación en la Figura 3-10, un esquema gráfico de esta instalación.

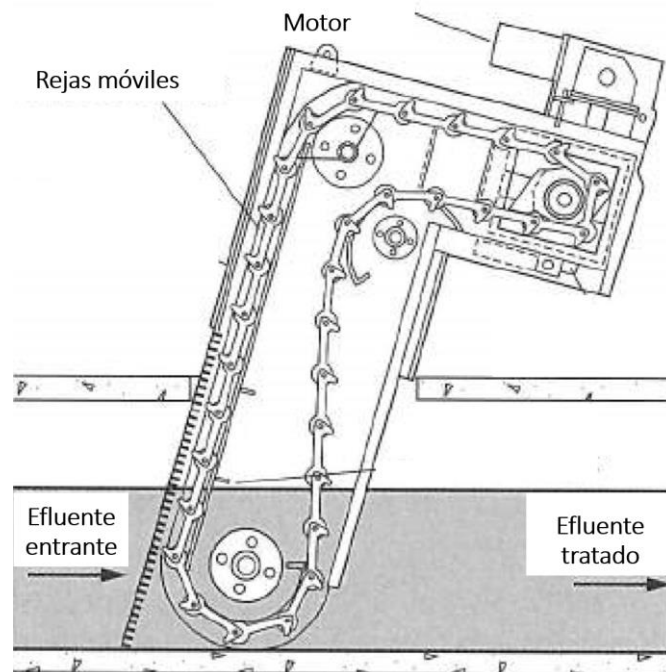


Figura 3-10 Rejas con correa continua [6]

- Desarenado y desengrasado, una vez eliminados los sólidos gruesos en las rejillas se procederá a eliminar las partículas de menor tamaño, fundamentalmente arenas y grasas. Estas partículas, se van a eliminar mediante un proceso de flotación. El agente de flotación será el aire. Existen dos métodos para realizar la aireación: la flotación por aire disuelto (DAF, dissolved air flotation) y por dispersión de aire, también llamado aire inducido (IAF, *induced air flotation*). El DAF es más eficiente ya que el tamaño de las burbujas es del orden de 30 a 50 micrómetros, mientras que las generadas en el IAF son de hasta 150 micrómetros. Además, el IAF tiene más gasto energético, por ello el coste es mayor, y aunque utilice menos piezas si se obstruyen los difusores del IAF el coste de reparación se eleva. Por lo que se ha decidido utilizar el sistema DAF. Tras este proceso se obtienen las grasas y arenas que una empresa contratada los retirará periódicamente, se puede observar en la Figura 3-11.



Figura 3-11 Desarenado y desengrasado [27]

- Homogeneización de caudales [2], este proceso, cuyo esquema se muestra en la Figura 3-12, se encuentra tras el proceso de flotación ya que las espumas y los sólidos pueden provocar problemas en la instalación. Las dos opciones de homogeneización son en línea o en derivación. La homogeneización en línea permite amortiguar considerablemente las cargas de contaminantes, mientras que en derivación es menos eficaz en este aspecto. Aunque en derivación tiene mayor capacidad para igualar el caudal entrante al ideal si hay sobrecarga de efluente. Al tratarse de un sistema separativo en el que no entrarían las aguas pluviales, no hay tanta fluctuación de caudales. Por ello el método elegido será la homogeneización en línea.

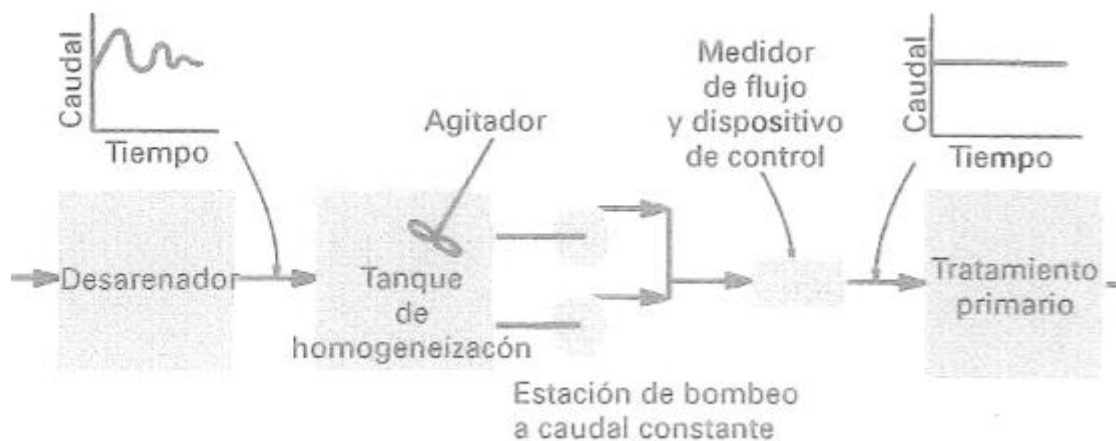


Figura 3-12 Diagrama de homogeneizador en línea [2]

3.5.2 Tratamiento primario

- Tamizado fino, tras eliminar las grasas y las arenas se hará atravesar al efluente de salida por un tamizado. En aguas urbanas permiten sustituir a los decantadores primarios, reduciendo el tamaño de la planta considerablemente. Al ser un sedimentar primario que se adapte al flujo de agua en esta EDAR, tendría unas dimensiones aproximadas de 25 metros de largo y aunque el

sedimentador elimine más DBO y SS, aproximadamente un 30% y un 45%, mientras que el tamiz elimina 25% de DQO y un 25% de SS.

Los distintos tipos de tamiz fino que eliminan la cantidad necesaria de DQO y de SS son: el tambor rotatorio, con un mallado de 0,1 a 0,01 mm, y el tamiz inclinado fijo. El tamiz fijo es más difícil de limpiar aunque sea de más fácil instalación, por ello se ha elegido el de tambor rotatorio, Figura 3-13. Son equipos independientes con sistemas de auto limpieza y accionamiento automático de funcionamiento. Este sistema disminuye la necesidad de personal en las instalaciones. Tras este proceso se obtienen los lodos primarios, que serán posteriormente tratados.

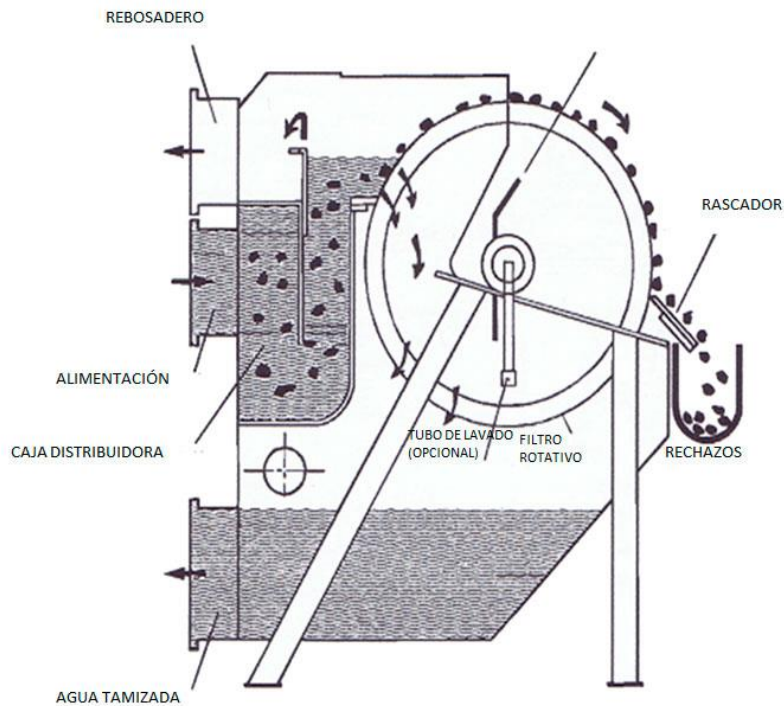


Figura 3-13 Esquema de un tamiz de tambor rotatorio [28]

3.5.3 Tratamiento secundario

- Reactor de biomembrana (MBR), el agua bruta al haber sido sometida a un tratamiento primario, ha perdido gran parte de los sólidos en suspensión. Por ello ahora recorrerá el tratamiento biológico en el que básicamente se trata de reducir la materia orgánica y los nutrientes (N y P) que lleva consigo el agua.

Existen tres tratamientos biológicos principales: fangos activos convencionales, reactor biológico secuencial (SBR) y reactor de biomembrana. El primero, aunque es el más empleado en EDAR urbanas por presentar menores costes de operación e instalación, es descartado debido a que el espacio que precisa es incompatible con el terreno disponible y los fangos activos al ser equipos abiertos generarían olores. Como se requiere de eliminación de nutrientes, nitrógeno y fósforo se decide elegir el reactor de biomembrana, con este se cumplen los requisitos en cuanto a eliminación de nutrientes en el mismo tratamiento, mientras que con el SBR sería necesario otro proceso de eliminación de nutrientes. Otra razón, de acuerdo a [25], por la que el MBR es la opción idónea es que según el paso de las membranas, el mallado, se puede realizar un tratamiento más o menos exigente. Si dichas membranas tienen un tamaño de paso de $0,02 \mu\text{m}$, el agua tratada tiene características similares a una que haya sido desinfectada. Se muestra en la Figura 3-14 un diseño de un MBR.

Por otro lado, al haber elegido un tamiz fino antes del MBR se protegerá más este equipo, ya que las membranas son muy sensibles a la obstrucción, esto conlleva que este biorreactor sea el proceso biológico ideal en este EDAR. Otra ventaja del MBR es que no depende el tiempo de retención hidráulica (TRH) del tiempo de retención celular (TRC), es decir, el tiempo que está el agua en el reactor es independiente del que están los microorganismos. Este fenómeno tiene tres principales consecuencias: la primera que la concentración de sólidos orgánicos es mayor que en otros procesos, como los fangos activos, lo que conlleva una mayor eficiencia con menos espacio, la segunda que al aumentar el TRC se eliminará más cantidad de nutrientes. La última que como el TRC es mayor en un MBR que en los lodos activos, se generan menos lodos en el primero, esto es porque los microorganismos eliminan más DBO, DQO, y demás contaminantes antes de ser enviados a la línea de fangos.

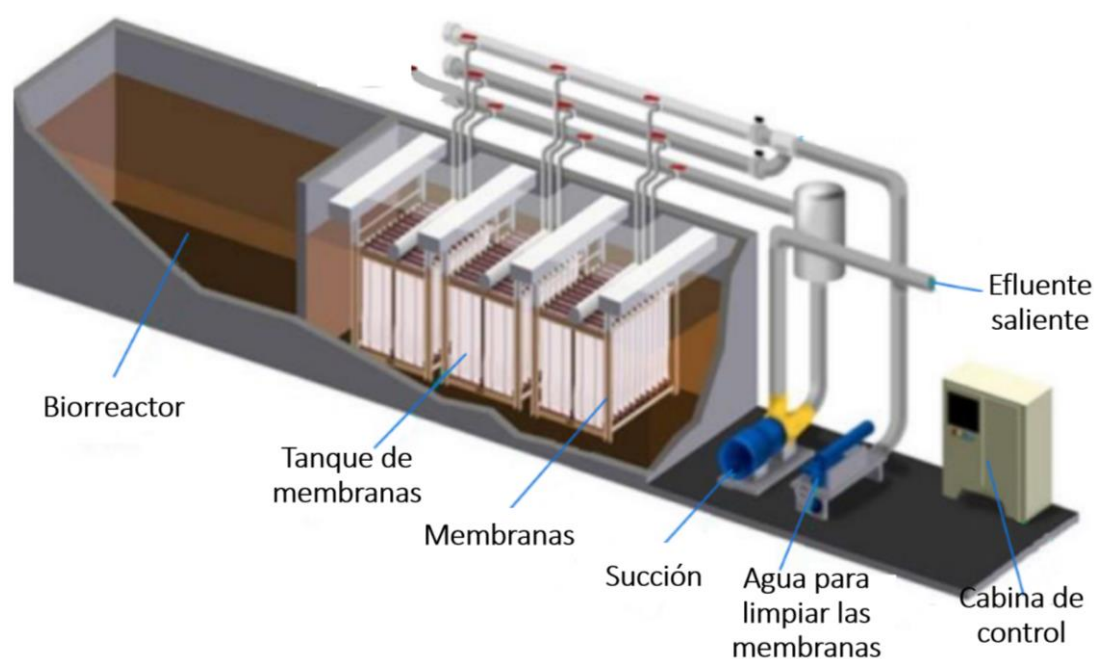


Figura 3-14 Diseño de un MBR con membranas sumergidas [29]

- Desinfección, se contempla una dosificación de hipoclorito sódico en el depósito de agua tratada para emergencia cuando se detecte que el tratamiento biológico no funciona correctamente [6].

Tras la elección de todos estos procesos, se ha elaborado un diagrama de la línea de agua, mostrado en la Figura 3-15, de la EDAR propuesta.

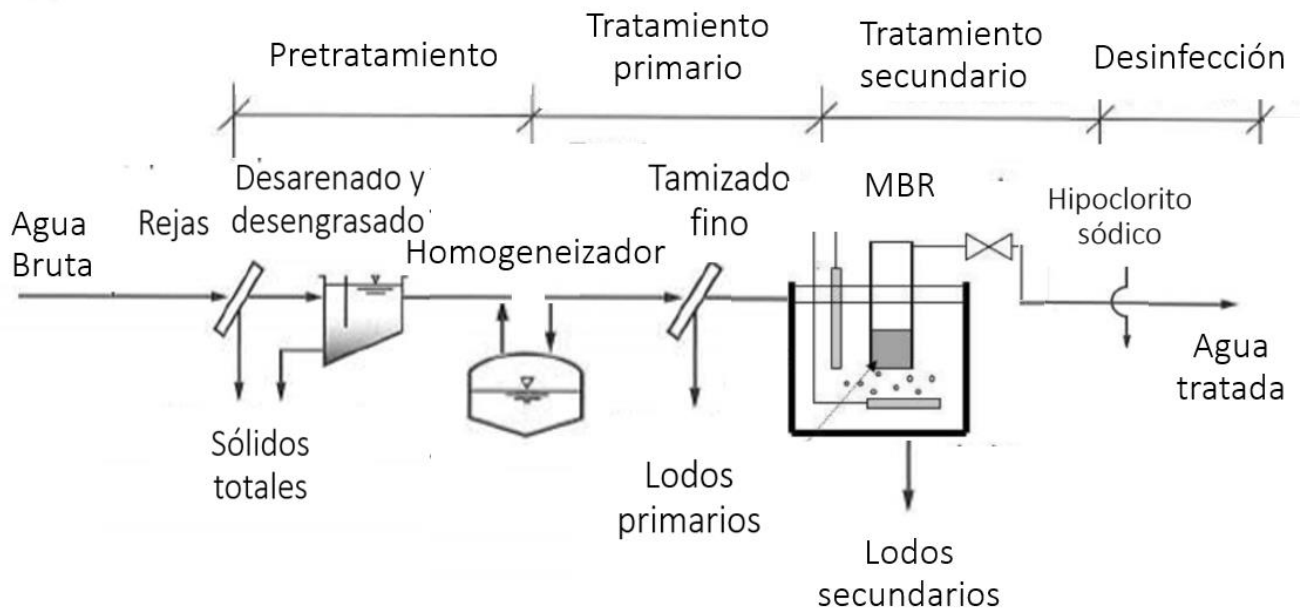


Figura 3-15 Diagrama de la línea de agua

3.5.4 Tratamiento de fangos

Los fangos primarios y secundarios se juntarán y se entregarán periódicamente a una empresa especializada que haga los tratamientos necesarios para que puedan ser reutilizados como compostaje o depositados en un vertedero, Figura 3-17. Pero estos no pueden ser entregados sin haber recibido un tratamiento de deshidratación, porque esto elevaría exponencialmente el precio. Esto se debe a que los lodos contienen gran cantidad de agua y por ello se entregaría más metros cúbicos de material, lo que elevaría el coste.

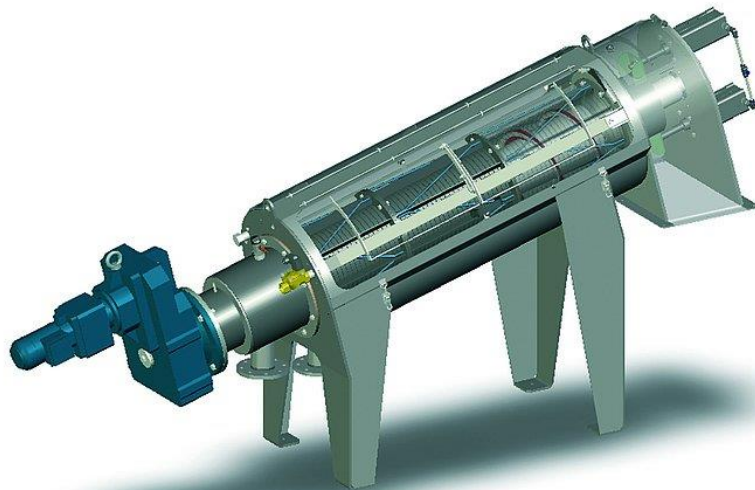


Figura 3-16 Deshidratador de prensa tornillo [30]

Para la concentración y deshidratación de fangos existen varios métodos, como se ha expuesto anteriormente, los más apropiados para esta EDAR podrían ser: prensa rotatoria, centrifugadora sólida, tornillo prensa y electro-deshidratador. El electro-deshidratador tiene un alto costo y no es necesario la eliminación de patógenos y materia biológica. La centrifugadora sólida necesita de personal experto,

así sus mantenimientos tienen un coste elevado. Por último, la prensa rotatoria y el tornillo prensa, son similares, aunque la prensa rotatoria consume más energía, y el tornillo prensa debe realizar un mantenimiento periódico de limpieza con un flujo de agua. Por ello se ha decidido utilizar el tornillo prensa, véase Figura 3-17, el cual se adapta mejor a las necesidades de la EDAR [30].

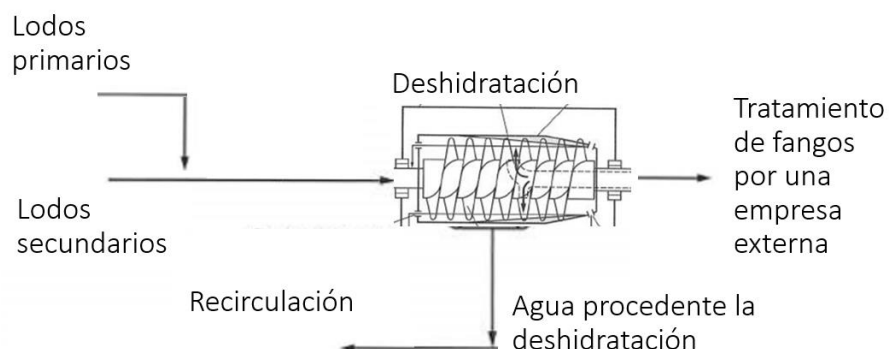


Figura 3-17 Diagrama de la línea de fangos

4 DISEÑO PRELIMINAR Y EVALUACIÓN DE LA ECO-EFICIENCIA

4.1 Carga de contaminantes en los afluentes de entrada

4.1.1 Introducción

Según [8], las concentraciones de los contaminantes de las aguas residuales son una parte fundamental para desarrollar el diseño de una EDAR. Estas darán lugar a las cargas de trabajo que deben desempeñar cada etapa del proceso de depuración.

$$\text{Carga (g/d)} = \text{Caudal (m}^3\text{/d)} \times \text{Concentración (mg/L)}$$

De forma general, estos contaminantes se caracterizan por sus concentraciones, las cuales provienen solamente del propio uso de las aguas, al tratarse de un sistema separativo. Además, también hay aguas provenientes de la infiltración, pero se considera que estas no tienen carga contaminante. Por lo que solamente existe carga contaminante de origen urbano, al no generarse aguas residuales provenientes del sector industrial.

Existen dos formas de obtener las características de las aguas residuales entrantes. La primera es a través de registros históricos, pero al ser esta una nueva depuradora se carece de los mismos. Supone por tanto realizar un cálculo teórico en este proyecto.

4.1.2 Determinación teórica

Los excrementos humanos son los responsables de la mayor parte de la carga contaminante. La contaminación media generada por los excrementos de un adulto al día es de 35 a 40 g/día de DBO₅, que es el 60% de lo generado al día por individuo. También generan una gran cantidad de nutrientes, como el nitrógeno [8].

Tras un estudio bibliográfico de multitud de estudios obtenidos de [6], “Water Environment Federation” [31] y otras, se establece en la Tabla 4-1 la carga contaminante generada por un habitante equivalente (h-e). Para calcular la concentración de N se utiliza el NTK (método Kjeldahl) el cual determina el Nitrógeno a partir de la suma del Nitrógeno Orgánico y el Nitrógeno Amoniacal [32].

Parámetro	Dotación (g/h-e/día)
DBO ₅	60
DQO	140
SST	75
NTK	13
P	3

Tabla 4-1 Dotación adoptada de contaminantes por habitante equivalente [8]

Además, como resultado del estudio se establecen unos valores mínimos admisibles para la concentración de los contaminantes característicos en las aguas residuales urbanas, los cuales se presentan en la Tabla 4-2. Por lo que en el cálculo de contaminantes contenidos en el agua residual de la ENM, si el resultado teórico es inferior a los valores de la Tabla 4-2, se tomarán los datos de dicha tabla.

Parámetro	Concentración mínima (mg/l)
DBO ₅	133
DQO	339
SST	130
NTK	23
P	3,7

Tabla 4-2 Valores mínimos de concentración en aguas residuales brutas [8]

El número de habitantes equivalentes se va a asimilar a la suma de cantidad de gente que vive y que trabaja en todos los acuartelamientos. Es necesario estudiar el caso más restrictivo y se desconoce cuánto uso le dan los trabajadores a los aseos y demás instalaciones sanitarias de la ENM. Se tomará como que estos le dan el mismo uso que un habitante. Por todo ello $P_d = 1325$ p y según Anexo I: Cálculo de caudales. Para obtener las concentraciones es necesario:

Obtener la carga de contaminante de cada parámetro;

$$CD_{m,i} = D_i \times P_d$$

D_i = dotación de contaminante i (g/p/d)

P_d = población de diseño (p)

Tras ello con el caudal medio diario ($QD_{m, total}$) calculado en el Anexo 1 de este proyecto se obtiene la concentración media del contaminante i (C_i);

$$C_i = CD_{m, urb} / QD_{m, total}$$

Los cálculos para determinar la carga contaminante de cada parámetro son los siguientes:

$$QD_{m, total} = 9 \text{ L/s} = 777 \text{ m}^3/\text{día}$$

- DBO₅

$$CD_{DBO5} = 60 \text{ (g/p/día)} \times 1325 \text{ p} = 79500 \text{ g/día}$$

$$C_{DBO5} = 79500 \text{ (g/día)} / 777 \text{ (m}^3/\text{día)} = 102 \text{ mg/L}$$

- DQO

$$CD_{DQO} = 140 \text{ (g/p/día)} \times 1325 \text{ p} = 185500 \text{ g/día}$$

$$C_{DQO} = 185500 \text{ (g/día)} / 777 \text{ (m}^3\text{/día)} = 239 \text{ mg/L}$$

- SST

$$CD_{SST} = 75 \text{ (g/p/día)} \times 1325 \text{ p} = 83400 \text{ g/día}$$

$$C_{SST} = 83400 \text{ (g/día)} / 777 \text{ (m}^3\text{/día)} = 107 \text{ mg/L}$$

- N

$$CD_N = 13 \text{ (g/p/día)} \times 1325 \text{ p} = 17225 \text{ g/día}$$

$$C_N = 17225 \text{ (g/día)} / 777 \text{ (m}^3\text{/día)} = 22 \text{ mg/L}$$

- P

$$CD_P = 3 \text{ (g/p/día)} \times 1325 \text{ p} = 3975 \text{ g/día}$$

$$C_P = 3975 \text{ (g/día)} / 777 \text{ (m}^3\text{/día)} = 5 \text{ mg/L}$$

4.1.3 Resultados

Como se puede observar solamente el P sobrepasa los valores mínimos de concentración, esto se debe a la gran cantidad de agua que entra en la depuradora por la infiltración en la red de alcantarillado de la ENM. Ya que esta al entrar sin contaminantes diluye la carga contaminada en las aguas residuales. Las concentraciones de diseño resultantes son las siguientes:

$$DBO_5 = 133 \text{ mg/L}$$

$$DQO = 339 \text{ mg/L}$$

$$SST = 130 \text{ mg/L}$$

$$N = 23 \text{ mg/L}$$

$$P = 5 \text{ mg/L}$$

4.2 Dimensiones de los equipos

4.3 Como conclusión a la eficacia de la EDAR, la Tabla 4-3, muestra la cantidad de contaminantes eliminados en cada fase de la misma y el porcentaje de eliminación (rendimiento) final. Estos datos se han obtenido del

Anexo II: Cálculos de **dimensionamiento**.

Contaminante	Tratamiento primario	Tratamiento secundario	Eliminación total
DBO ₅	33 mg/L	97 mg/L	99%
DQO	-	309 mg/L	91%
SST	32,5 mg/L	96,5 mg/L	99%
NTK	-	13 mg/L	57%
P	-	3,12 mg/L	61%

Tabla 4-3 Cantidad de contaminantes eliminados y eficacia de la EDAR

Tras los cálculos realizados en el Anexo II, se muestra en este apartado la Tabla 4-4, en la cual se exponen las dimensiones principales de los distintos tratamientos, así como sus rendimientos.

Etapas del proceso	Proceso	Volumen (m³)	Superficie (m²)	Cantidad de materia eliminada (kg/h)	Consumo eléctrico (KWh)	Eficiencia (%)
Pretratamiento	Rejas con correa continua	-	0,6	-	0,52	-
	Desarenado y desengrasado: flotación	-	67 (1)	0,04	0,43	-
	Homogeneizador	400	-	-	0,53	-
Tratamiento primario	Tamizado fino, tambor rotatorio	-	0,3	1,05	9,71	25 DBO ₅ 25 SST
Tratamiento secundario	Biorreactor de membrana	86	2976 (2)	3,3	32,27	97 DBO ₅ 91 DQO 99 SST 61 P 57 NTK
Tratamiento de fangos	Deshidratador de tornillo	.	15 (3)	.	0,044	30

Tabla 4-4 Dimensiones y eficiencia de los equipos

4.4 Presupuesto preliminar de construcción

En este apartado se va a exponer los costes de las instalaciones, así como de forma preliminar el coste de construcción. La finalidad es exponer un presupuesto muy aproximado para tener una idea del coste de la EDAR. Estos precios se han adaptado a partir de un Proyecto Básico de una ERAR en La Finca, Somosaguas [33], algunos de estos precios se han reducido proporcionalmente a la cantidad de habitantes equivalentes de cada EDAR. Es necesario reseñar que los costes reales de la construcción de la EDAR serían mayores de los expuestos en este apartado. Se debe a que no se ha tenido en cuenta la mano de obra, sistemas de seguridad, etcétera. Y sobre la obra civil se va a exponer una aproximación de los costes, ya que es necesario realizar un estudio geotécnico, y otros estudios para determinar la cantidad exacta de trabajo necesario.

4.4.1 Pretratamiento

Pretratamiento compacto, formado por el desbaste, el desarenado y desengrasado. 30.000 €

Turbina para inyección de aire en el desarenado y deseng. 700 €

Contenedor para recogida de residuos. 300 €

Turbina para el homogeneizador. 500 €

Depósito de homogeneización. 2.000 €

Tuberías acero inoxidable. 800 €

4.4.2 Tratamiento primario

Tamiz rotativo. 4.800 €

Tolva de recogida de lodos. 300 €

Tuberías de acero inoxidable. 400 €

4.4.3 Tratamiento secundario

Agitador sumergido. 1.800 €

Soplantes, aireación. 7.000 €

Cabina insonorizante. 2.000 €

Equipo de motorización del agua. 1.200 €

Membranas. 40.000 €

Bombeo de permeado, limpieza de membranas. 2.500 €

Dosificador de hipoclorito. 950 €

Tuberías acero inoxidable. 1.100 €

4.4.4 Tratamiento de fangos

Bombeo de fangos, tornillo helicoidal. 1.800 €

Deshidratador de fangos, prensa de tornillo. 30.000 €

Contenedor metálico. 3.000 €

Tuberías de acero inoxidable. 800 €

4.4.5 Obra civil

Pavimentos. 3.000 €

Cerramientos y edificaciones. 75.000 €

4.4.6 Coste total

El coste total de todas las instalaciones será aproximadamente de 210.000 €.

4.5 Aquaenvec, método para evaluar la ecoeficiencia

4.5.1 El proyecto: Aquaenvec

La clave de la sostenibilidad ambiental se encuentra en los núcleos de población, ya que más del 80% de la población europea vive en uno. En la actualidad la legislación ambiental sobre la sostenibilidad urbana es esencial, la estrategia europea propone una reducción de más del 20% en emisiones de gases de efecto invernadero, aguas residuales y consumo de energía. Como parte de la contaminación de los sistemas urbanos se encuentra el ciclo del agua urbana. Tras el consumo del agua en zonas urbanizadas, se encuentra una cantidad de contaminantes, como productos químicos, generación de desechos, etcétera. Por consiguiente, se debe proporcionar un tratamiento de aguas residuales con un costo asumible y a su vez un impacto ambiental mínimo. El impacto ambiental máximo de una EDAR viene regulado por distintas Directivas Europeas, como: 91/271/CEE [7] o la 2008/105/CE, esta última trata sobre las sustancias prioritarias en el ciclo del agua.

Para poder obtener el mejor balance entre costo económico e impacto medioambiental se creó en el 2015 la herramienta Aquaenvec. Esta permite obtener dicha información a través de un estudio integral de la ecoeficiencia de todo el ciclo urbano del agua Figura 4-1: captación del agua, la red de abastecimiento, la red de alcantarillado y la propia EDAR. En este caso de estudio solamente se analizará la EDAR. Al realizar únicamente el estudio sobre la EDAR no se dispondrá de la información sobre los costes de construcción, así que solamente se podrá analizar su eco-eficiencia en la fase de operación y mantenimiento [3].

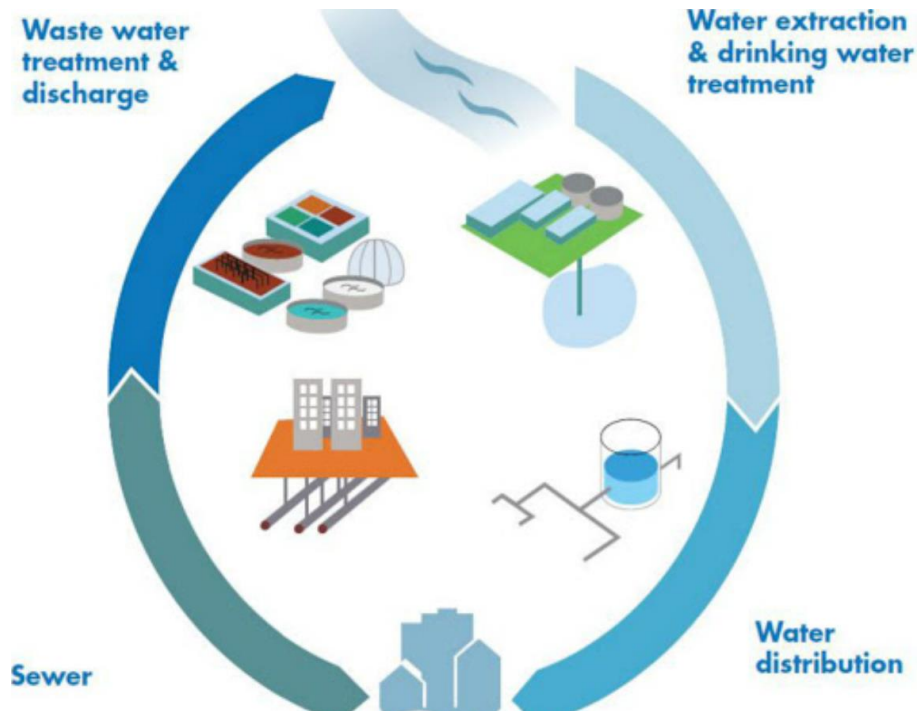


Figura 4-1 Ciclo del agua urbana [3]

El proyecto de Aquaenvec comenzó en 2012 y terminó en 2015, este tuvo apoyo financiero de LIFE+. En este proyecto se analizó el ciclo urbano del agua de dos ciudades costeras españolas: Betanzos y Calafell. Los objetivos de este proyecto son: la reducción del impacto medioambiental y de los costos en del ciclo del agua urbano, mejorando la eficiencia de todo el sistema del agua. Se realiza a través de unos indicadores definidos en el programa que apoyan a la toma de decisiones del ciclo urbano del agua, promoviendo así el uso sostenible del agua y la reutilización de los productos finales. Esto se consigue a través de la herramienta Aquaenvec de fácil uso que muestra dichos indicadores, que son tanto medioambientales como económicos y se integran en el resultado final. Esta herramienta también sirve para compartir conocimientos, casos de estudio y crear una metodología común en la evaluación de la ecoeficiencia.

La ecoeficiencia está definida por la ISO 14045:2012 como la relación entre el impacto ambiental de un producto o sistema y su valor. Debido a ello, este proyecto se propuso la integración de los indicadores económicos provenientes del coste del ciclo de vida, con los indicadores del impacto medioambiental generado.

4.5.2 La herramienta Aquaenvec

En este supuesto solamente se va a estudiar una instalación, la EDAR de la ENM. Para realizar este estudio son necesarios una serie de datos, estos se han obtenido de forma teórica en el Anexo I, Anexo II, y se muestran en la memoria, dichos datos son los siguientes: caudal de agua, número de habitantes equivalentes, número y tipo de procesos, consumo energético de cada proceso y cantidad de lodos generados, así como la calidad del efluente entrante y saliente de la planta depuradora.



Figura 4-2 Uso de la herramienta Aquaenvec [34]

Tras ello se obtienen los resultados, estos son tanto datos numéricos, como gráficos. Se dividen en tres partes: resultados ambientales, económicos y de la ecoeficiencia.

Los resultados ambientales evalúan el potencial de calentamiento global, es decir, los kilogramos equivalentes de CO₂ generados. El potencial de eutrofización, es decir, la cantidad de nutrientes vertidos en el mar, medidos en kilogramos equivalentes de fosfatos. El agotamiento de la capa de ozono, medido en la cantidad de CFC equivalente, que son los principales causantes de la destrucción del O₃. Y por último la demanda acumulada energética, medida en MJ, mega julios. Todos estos indicadores se miden en distintos periodos de tiempo. El concepto de kilogramos equivalentes atiende a que hay distintas sustancias que afectan al calentamiento global, no solo el CO₂, estas afectan en mayor o menor medida. La forma de representar todas esas sustancias es a través del CO₂ equivalente, que suma de forma ponderada todas estas sustancias nocivas. Este concepto también se aplica al potencial de eutrofización y al agotamiento de la capa de ozono. Por otro lado, los resultados económicos nos muestran el coste mínimo, máximo y el medio. Estos se obtienen con respecto al ciclo de vida de la EDAR, anuales, por habitante y por cada m³ de caudal. Por último, los resultados de la ecoeficiencia de la planta integran ambos resultados.



Figura 4-3 Cómo funciona la herramienta Aquaenvec [34]

4.6 Evaluación de la ecoeficiencia de la EDAR

Tras la breve explicación de la herramienta Aquaenvic [34], se va a proceder a mostrar los resultados obtenidos con el análisis del prediseño realizado. El primer paso es introducir los datos iniciales, estos son los siguientes: $Q_m = 32,4 \text{ m}^3/\text{h}$. $Q_{m, \text{anual}} = 283561 \text{ m}^3/\text{año}$. $N^\circ \text{ h-e} = 1325$. Tras esto se realiza un esquema que muestra los principales procesos de la planta depuradora. Estos son: el desbaste, el desarenado y desengrasado, el tamizado fino, el MBR, la deshidratación de los fangos y su disposición en un vertedero. La disposición en un vertedero sería realizado por una empresa externa a la ENM, aunque esta podría tratar los fangos para que pudiesen ser reutilizados, hemos optado por el vertedero ya que es la opción más probable y desfavorable.

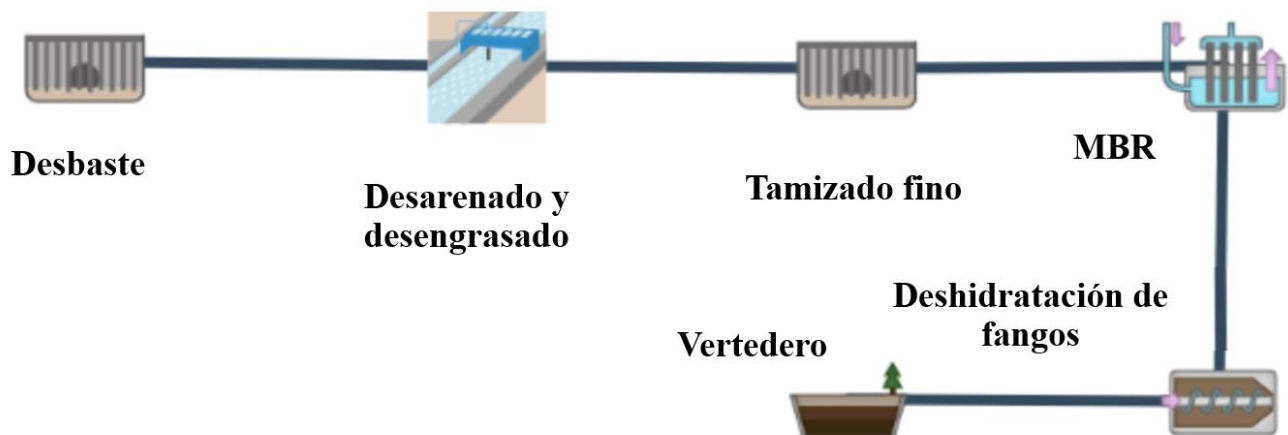


Figura 4-4 Esquema de la EDAR diseñada [34]

Posteriormente se introducen los consumos de electricidad de cada proceso, el caudal que tienen que tratar, de hacerlo la cantidad de lodos generados y la distancia que deben recorrer los camiones para verter los lodos. Para calcular dicha distancia se ha buscado el vertedero más próximo a Marín, este se encuentra en A Lama, cerca de Ponte Caldelas, a 32 km de la ENM. Por último, se introducen la calidad del agua entrante, que se muestra en la memoria y la calidad del agua saliente. Tras todo ello se obtiene la evaluación de la ecoeficiencia de la depuradora, que es la siguiente:

	Potencial de calentamiento global	Potencial de eutrofización	Agotamiento capa ozono	Demanda acumulada energética	Coste
	[kg CO ₂ eq.]	[kg PO ₄ ³⁻ eq.]	[kg CFC-11-eq.]	[MJ-eq.]	[€]
Impacto anual de EDAR [/año]	1.33 E+05	1.62 E+02	7.88 E-03	3.45 E+06	53.88 k
Impactos en el ciclo de vida	6.66 E+06	8.09 E+03	3.94 E-01	1.72 E+08	2.69 M
Impactos anuales por ciudadano [€/habitante * año]	1.01 E+02	1.22 E-01	5.95 E-06	2.60 E+03	40.67
Impactos volumetricos [/m ³ recolectados]	4.70 E-01	5.70 E-04	2.78 E-08	1.22 E+01	0.19

Figura 4-5 Resultados numéricos de la ecoeficiencia de la EDAR diseñada [34]

De estos resultados se puede observar que el coste de mantenimiento y operación de la depuradora es de 53.880 € al año y cada m³ de agua tratada cuesta 0,19 €. También se muestra en la Figura 4-5 la cantidad de CO₂ equivalente generado al año, estos son 133 toneladas, así como 101 kilogramos por habitante. Este último resultado se puede comparar con la cantidad de CO₂ generado por un vehículo, según [34], es de aproximadamente 0,15 kg CO₂ por km recorrido. Por lo que la cantidad de CO₂ generado por la EDAR es ínfima, ya que un turismo emite más CO₂, si recorre 1000 km, que la EDAR anualmente por habitante. En cuanto al potencial de eutrofización, se emiten 0,57 mg/L de fosfato equivalente, este valor es despreciable. Por otro lado, el agotamiento de la capa de ozono, medido por la cantidad de CFC-11 equivalente, se debe principalmente a los químicos utilizados en la planta. Al solo utilizar hipoclorito en la desinfección, la cantidad de CFC-11 equivalente es casi despreciable, 27,8 µg/m³. La emisión de CFC de esta EDAR es menor al límite impuesto el Real Decreto, [35]. Por último, la demanda energética de la EDAR es de 3.450.000 MJ/año, y una casa española de media consume 35.000 MJ/año [36], es decir, cien veces menos.

Como conclusión de estos resultados, se puede decir que los costes de la EDAR diseñada son altos para la cantidad de agua tratada, pero en cambio los consumos energéticos y la contaminación producida es ínfima.

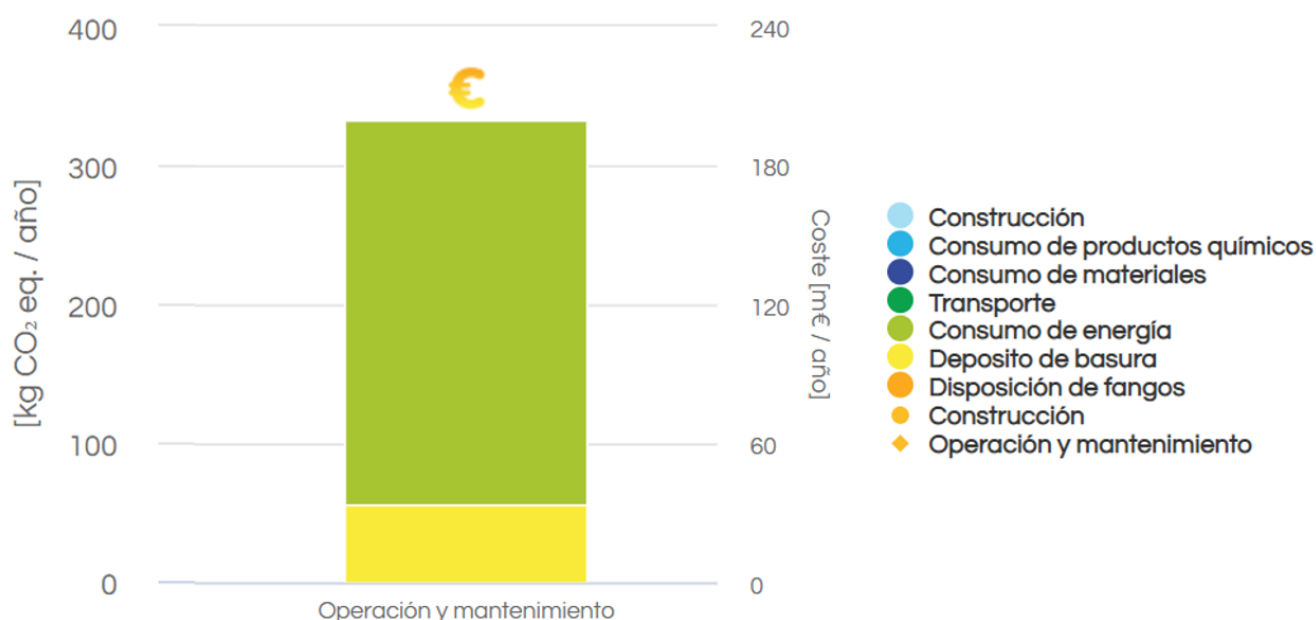


Figura 4-6 Resultados gráficos de la ecoeficiencia de la EDAR diseñada [34]

En cuanto a los resultados gráficos, estos principalmente nos muestran el origen, las causas, de la contaminación, así como de los costes. En la Figura 4-6 se muestra que las causas de la contaminación son principalmente los depósitos de las grasas, arenas y lodos, el transporte de estos y el consumo de energía. Esto es debido a que el uso de químicos en la planta es muy limitado. Mientras que en eje derecho se muestra la cantidad de costes provenientes del consumo de energía y del propio depósito de basuras.

4.7 Comparación de la ecoeficiencia con la antigua EDAR de la ENM

Tras obtener los resultados en el apartado anterior, se ha considerado necesario comparar la EDAR diseñada con la antigua EDAR que se encontraba en la ENM hace dos décadas. Se ha decidido comparar los resultados de ambas ya que estas tendrían unas dimensiones similares, porque los cálculos son para la misma población, la ENM.

En la página 13 de esta memoria y en la Figura 2-5 se muestran los distintos procesos que componían la antigua EDAR de la ENM, así como la calidad de las aguas entrantes y salientes. Aunque debido a la carencia de algunos datos se han tenido que hacer varias suposiciones sobre los

consumos energéticos, así como la cantidad de lodos generados. De modo que se han calculado teóricamente los consumos, a través de la Figura II- 3 Consumos eléctricos de distintos procesos . Y por tanto, se ha determinado que todos los procesos iguales a la depuradora diseñada consumen la misma cantidad de energía, así como generan la misma cantidad de lodos primarios. Por otro lado, los fangos activos consumen 4,76 KWh, la decantación secundaria 0,2 KWh y el espesado de fangos 0,1 KWh. Además, la concentración de SST a la salida del decantador es menor que en un BMR, porque los microorganismos en un BMR están más controlados y estos eliminan SST de forma más eficiente que en los lodos activos. En el tratamiento convencional parte de los microorganismos presentes en el reactor no eliminan SST, esto provoca que los lodos generados tendrán menor concentración de materia orgánica, del orden de 5 veces menor.

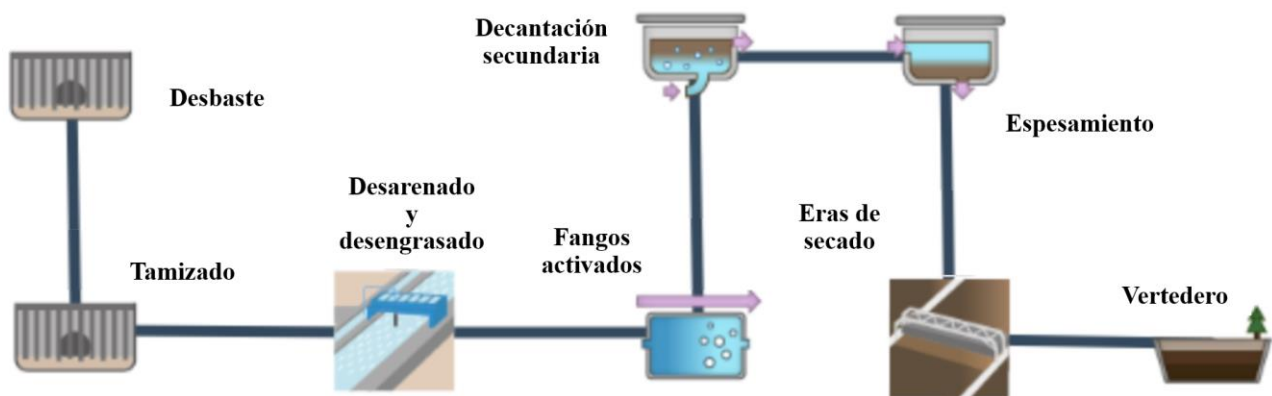


Figura 4-7 Esquema de la antigua EDAR de la ENM [34]

Tras obtener todos estos resultados se ha realizado la comparación de la ecoeficiencia de ambas plantas, reflejada en la Figura 4-8. Como se puede observar, la antigua depuradora emite aproximadamente la mitad de contaminantes, los tres indicadores ecológicos mostrados en la Figura 4-8 no contabilizan la contaminación presente en el agua vertida, sino solamente la emitida por la planta durante el tratamiento de las aguas. La antigua planta vertía aguas con una calidad inferior a la diseñada, es decir, con más contaminantes y no respetaba la 91/271/CEE [7], llegando a verter 30 mg/L de DBO₅ y 30 mg/L de SST, esto es diez veces más contaminantes que los vertidos por la EDAR diseñada. Provocando que al tratar menos las aguas se contamine menos, ya que los indicadores de contaminación no tienen en cuenta los contaminantes del agua vertida, si no la cantidad de contaminantes emitidos por la planta en el proceso de depuración. Además, como era de esperar, la planta antigua consumía menos energía que la propuesta, esto se debe principalmente al tratamiento secundario, el biológico. Como ya se ha señalado anteriormente los lodos activos consumen menos energía que un MBR, pero ocupan más espacio y emiten más olores. Además, las aguas tratadas en un MBR tienen mejor calidad que las de los lodos activados.

Por último, se observa que tiene más costes de operación y mantenimiento la depuradora diseñada, la razón principal es el consumo de energía y la segunda es que los equipos son más complejos y sofisticados, por lo que las reparaciones son más costosas.

DISEÑO PRELIMINAR DE UNA PLANTA DE DEPURACIÓN DE LAS AGUAS
RESIDUALES GENERADAS EN LA ENM Y EVALUACIÓN DE SU ECO-EFICIENCIA

		Potencial de calentamiento global	Potencial de eutrofización	Agotamiento capa ozono	Demanda acumulada energética	Coste
		[kg CO ₂ eq.]	[kg PO ₄ ³⁻ eq.]	[kg CFC-11- eq.]	[MJ-eq.]	[€]
Impacto anual de EDAR [/año]	EDAR ENM	1.33 E+05	1.62 E+02	7.88 E-03	3.45 E+06	53.88 k
	ANTIGUA EDAR ENM	6.34 E+04	7.67 E+01	3.56 E-03	1.35 E+06	43.09 k
Impactos en el ciclo de vida	EDAR ENM	6.66 E+06	8.09 E+03	3.94 E-01	1.72 E+08	2.69 M
	ANTIGUA EDAR ENM	3.17 E+06	3.84 E+03	1.78 E-01	6.74 E+07	2.15 M
Impactos anuales por ciudadano [€/habitante * año]	EDAR ENM	1.01 E+02	1.22 E-01	5.95 E-06	2.60 E+03	40.67
	ANTIGUA EDAR ENM	4.79 E+01	5.79 E-02	2.69 E-06	1.02 E+03	32.52
Impactos volumetricos [/m ³ recolectados]	EDAR ENM	4.70 E-01	5.70 E-04	2.78 E-08	1.22 E+01	0.19
	ANTIGUA EDAR ENM	2.24 E-01	2.71 E-04	1.26 E-08	4.76 E+00	0.15

Figura 4-8 Comparación de ecoeficiencia de la EDAR diseñada y la antigua de la ENM [34]

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

Los objetivos de este TFG eran: realizar un prediseño de una EDAR para la ENM y realizar un análisis de su ecoeficiencia, los cuales han sido cumplidos.

El prediseño ha sido materializado por el cálculo de los requisitos dimensionales de las distintas instalaciones en las que tienen lugar los procesos seleccionados. Este dimensionamiento ha sido basado en distintos cálculos, que son los siguientes: caudal de aguas residuales generadas en la ENM, carga de contaminantes de dichas aguas, requerimientos legales para el vertido de aguas en la Ría de Pontevedra y las necesidades especiales por encontrarse la planta en la ENM, como espacio reducido, mínimos olores y máxima automatización.

En cuanto a la evaluación de la ecoeficiencia de la depuradora. Este análisis, realizado a través de la herramienta Aquaenvec, muestra el impacto medioambiental derivado de la actividad de la EDAR, así como los costes de operación y mantenimiento y la relación entre ambos aspectos. Los resultados han sido los esperados, de acuerdo con los procesos seleccionados. Debido a que estos al ser comparados con la antigua EDAR de la ENM, los costes han sido más altos. Esto es porque se han diseñado procesos más modernos, que requieren más energía, pero a su vez tienen mejor eficiencia, ocupan menos espacio y no emiten tantos olores.

De forma paralela al cumplimiento de ambos objetivos, se han obtenido varias conclusiones: la primera es la falta de control del agua en la ENM, es decir, hay un porcentaje de pérdidas en la red del alcantarillado muy alta, y no se dispone de datos sobre cuál es el destino del agua consumida ni de cuánta agua residual se genera. Otra conclusión es que si se quiere tener una EDAR cercana a la población se deben rechazar los procesos clásicos, como los lodos activos, decantadores o eras de secado, eligiendo procesos más modernos, que son herméticos, y eliminan ruidos, olores y ocupan menos espacio, aunque presenten un mayor coste.

Por otro lado, en cuanto a la comparación de los costes de operación y mantenimiento de la EDAR propuesta con el tratamiento actual, el vertido de las aguas a la red de alcantarillado de Marín. El canon de agua pagado al Ayuntamiento de Marín es de 62.000 €/año aproximadamente [16], mientras que los costes de la EDAR diseñada son de 53.800 €/año. Por lo que sin tener en cuenta la inversión necesaria para construir la depuradora los costes anuales serían menores con la EDAR propuesta.

Por último, la cantidad de contaminantes contenidos en las aguas tratadas son inferiores a los niveles mínimos requeridos por la Directiva Europea [12], por lo que si estos se vuelven más exigentes la EDAR podría seguir funcionando. Además, tiene capacidad de mejorar su rendimiento, utilizando membranas más finas en el MBR o más desinfectante antes del vertido del agua.

5.2 Líneas futuras

Este proyecto es un diseño preliminar. Si fuera aprobado, se realizaría el proyecto definitivo, con la obra civil, un estudio geotécnico, cálculos de las instalaciones eléctricas, un estudio de seguridad y salud, así como un plan de gestión de residuos, un presupuesto final, los planos en detalle y un pliego de condiciones.

En la fase de elección de procesos de este proyecto se rechazó el uso de procesos terciarios, como la desinfección. Porque no se consideraba necesario obtener agua reutilizable, para su uso en distintas tareas como limpiezas de barcos, riego u otras. Pero al observar la cantidad de agua demandada en la ENM, podría ser un proyecto el estudio de un tratamiento terciario, así como el uso del agua reutilizable en distintas tareas en la ENM,

En esta EDAR se ha decidido que los lodos son recogidos y tratados por una empresa externa. Un posible proyecto sería el tratamiento de los fangos producidos en esta EDAR, pudiendo ser estos reutilizados como compostaje, o hasta conseguir energía de los mismos. Contribuyendo a una solución más sostenible desde el punto de vista medioambiental.

Por último, tras realizar los cálculos sobre el caudal de agua residual generado en la ENM y comparando estos con el registro histórico sobre el caudal de agua de agua de abastecimiento, se ha llegado a la conclusión que existen grandes pérdidas de agua en la red de abastecimiento de la ENM. Un posible proyecto en la ENM sería calcular dichas pérdidas, encontrar su origen y proponer medidas para reducirlas.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Rodríguez Pimentel, «iagua,» 17 03 2017. [En línea]. Available: <https://www.iagua.es/blogs/hector-rodriguez-pimentel/aguas-residuales-y-efectos-contaminantes>. [Último acceso: 15 01 2020].
- [2] G. Tchobanoglous, Ingeniería de aguas residuales tratamiento, vertido y reutilización, California: Metcalf & Eddy, INC., 1995.
- [3] «Aquaenvec,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.life-aquaenvec.eu/>. [Último acceso: 16 03 2020].
- [4] E. Rodríguez Hurtado, «Aqua explore,» 2018. [En línea]. Available: https://www.fundacionaquae.org/aquaexplore/depuradora_html/index.html. [Último acceso: 16 01 2020].
- [5] G. Saavedra, «saneamientodeaguas,» 17 07 2017. [En línea]. Available: <http://saneamientodeaguasguillermosaavedra.blogspot.com/2017/>. [Último acceso: 18 01 2020].
- [6] G. Tchobanoglous, Waterwater Engineering Treatment and Resource Recovery, Nueva York, 2014.
- [7] *Directiva Europea 91/271/CEE*, 1991.
- [8] Xunta de Galicia, «Instrucciones Técnicas para Obras Hidráulicas en Galicia-Abastecimiento,» 2013.
- [9] *Ley 9/2010 de aguas de Galicia*, 2010.
- [10] Asociación Española de Abastecimientos de Agua y Saneamiento, «Estudio Nacional de Abastecimiento y Saneamiento,» 2016.
- [11] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «Tratamiento de aguas residuales,» 2018.
- [12] Comisión Europea, "Evaluation of the Urban Waste Water Treatment Directive 91/271/EEC," 2017.
- [13] M. Planelles, «La falta de depuración del agua le ha costado ya a España 22 millones,» *El País*,

15 06 2019.

- [14] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, «Plan Nacional de Depuración, Saneamiento, Eficiencia, Ahorro y Reutilización,» 2018.
- [15] «Resolución de Determinación do Canon da Agua 326/015/4». 2016.
- [16] Oficial de Medioambiente M. Ramos Fernández, *Documentos de la ENM*.
- [17] N. Davila, «La depuradora de Placeres necesitará 12.000 m² más para duplicar su tamaño y capacidad,» *Faro de Vigo*, 22 05 2018.
- [18] «La depuradora de Placeres podrá tratar 900 litros por segundo de agua residual,» *Faro de Vigo*, 22 03 2019.
- [19] PESA Tratamiento de aguas rentable, «PESA,» [En línea]. Available: <http://www.pesama.com/es/tratamiento-de-aguas-residuales>. [Último acceso: 08 02 2020].
- [20] A. Pierluigi, *Tratamientos de Agua para Consumo Humano*, 2016.
- [21] GEDAR Empresa Andaluza, «GEDAR Gestión de Aguas y Residuos,» [En línea]. Available: <https://www.gedar.com/residuales/decantadores.htm>. [Último acceso: 22 02 2020].
- [22] «El Agua Potable,» [En línea]. Available: <http://www.elaguapotable.com/decantacion.htm>. [Último acceso: 25 02 2020].
- [23] «El agua potable,» [En línea]. Available: <http://www.elaguapotable.com/ozonizacion.htm>. [Último acceso: 16 02 2020].
- [24] S. Tuset, «Condorchem,» [En línea]. Available: <https://blog.condorchem.com/tag/fangos-activos/>. [Último acceso: 19 02 2020].
- [25] Universidad Politécnica de Valencia, «youtube,» 31 10 2019. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=2sWBQHT9Peg>. [Último acceso: 28 02 2020].
- [26] «Aeration Industries International,» [En línea]. Available: <https://www.aireo2.com/es/estudios-de-caso/libro-blanco-control-ciclico-de-aireacion/>. [Último acceso: 27 02 2020].
- [27] Tecnologías y equipos para el medioambiente, «iagua,» [En línea]. Available: <https://www.iagua.es/noticias/teqma/importancia-separacion-aceites-y-grasas-tratamiento-agua-residual-urbana>. [Último acceso: 14 02 2020].
- [28] «Hidro metálica,» [En línea]. Available: <https://hidrometalica.com/tamiz-rotativo/>. [Último acceso: 25 02 2020].
- [29] «Portal de ingenieros españoles,» 17 05 2013. [En línea]. Available: <http://www.ingenieros.es/noticias/ver/nueva-depuradora-mbr-para-el-aeropuerto-de-mallorca/3657>. [Último acceso: 25 02 2020].
- [30] HUBER Technology, «Prensa de Tornillo ROTAMAT RoS 3Q,» Santiago de Chile.
- [31] «Water Environment Federation,» [En línea]. Available: <https://www.wef.org/>. [Último acceso: 16 02 2020].
- [32] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, «IDEAM,» [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/entidad>. [Último acceso: 19 02 2020].
- [33] D. Sánchez Mariscal Rodríguez, *Proyecto Básico ERAR La Finca, Somosaguas*, Pozuelo de

- Alarcón, 2018.
- [34] «Herramienta Aquaenvec,» 31 05 2015. [En línea]. Available: <http://tool.life-aquaenvec.eu/es/Home/About>. [Último acceso: 28 02 2020].
- [35] M. Granda, «Las emisiones medidas de CO2 de los coches vendidos en 2018 aumentan un 1,8%,» *El País*, 10 10 2018.
- [36] *Real Decreto 117/2003 Limitación de emisiones de COVs*, 2003.
- [37] «Fundación para la Eficiencia Energética y el Medioambiente,» [En línea]. Available: <http://www.f2e.es/es/cuanta-energia-consume-una-casa>. [Último acceso: 29 02 2020].
- [38] Dirección de Personal de la Armada, «Plantilla Orgánica de la ENM,» 2019.
- [39] Xunta de Galicia, «Instrucción Técnica para Obras Hidráulicas en Galicia, Saneamiento,» 2009.
- [40] J. J. Suárez López, «Problemas de depuración, Universidad de La Coruña».
- [41] «Aguas industriales,» 16 01 2016. [En línea]. Available: <http://aguasindustriales.es/mbr-para-el-tratamiento-de-aguas-industriales-como-seleccionar-la-mejor-membrana/>. [Último acceso: 25 02 2020].
- [42] A. Trapote Jaume, «Estudio de los parámetros del funcionamiento del MBR de Helados Alacant a través de la viscosidad del licor mezcla,» Alicante, 2013.
- [43] Xylem Inc., «Aguas Residuales,» xylem, 2018. [En línea]. Available: <https://www.xylem.com/siteassets/brand/flygt/flygt-resources/flygt-resources/flygt-adaptive-mixers.pdf>. [Último acceso: 28 02 2020].
- [44] Siemens Industry Automation, *Siemens NX, CAD, CAM, CAE*.
- [45] «Google Maps,» [En línea]. Available: <https://www.google.es/maps/@40.4567355,-3.9164595,15z>. [Último acceso: 29 02 2020].
- [46] Instituto Geográfico Nacional, «Iberpix 4,» [En línea]. Available: <https://www.ign.es/iberpix2/visor/>. [Último acceso: 29 02 2020].

ANEXO I: CÁLCULO DE CAUDALES

1.1 Introducción

El objetivo del presente anexo es determinar la población, la dotación y los caudales que servirán de base para el diseño de la red de saneamiento contemplada en el proyecto.

Los cálculos se realizan de acuerdo con las Instrucciones Técnicas de Obras Hidráulicas de Galicia [8].

1.2 Estudio de población

Como paso previo para dimensionar las infraestructuras de la EDAR, es necesario definir el caudal de aguas residuales que dicha planta tendrá que tratar, y para ello necesitamos conocer la población que verterá sus aguas en la red. La Tabla I - 1 Habitantes y trabajadores en la ENM que se adjunta a continuación muestra los habitantes y trabajadores de la Escuela Naval Militar:

Categoría	Nº de personas
Alumnos	550
Cuartel Méndez Núñez	220
Residencias	192 (96 habitaciones)
Sector 7	40 (8 viviendas)
Trabajadores ⁽¹⁾	323
Población diseño (Pd)	1325

Tabla I - 1 Habitantes y trabajadores en la ENM [38]

Para realizar el cálculo de personal en la ENM se ha considerado el número máximo de ocupantes, es decir, la plantilla orgánica de trabajadores completa, el número máximo de alumnos con todas las habitaciones de las residencias ocupadas.

La instrucción ITOHG-ABA-1/1 [8], considera el crecimiento de la población de Galicia, la cual sigue el método aritmético, por lo tanto, es constante y evoluciona según una tendencia lineal, como el cálculo de caudales se realiza en una zona urbana consolidada, no se va a considerar el incremento de la población.

- (1) En el apartado de trabajadores se ha considerado el personal militar destinado en las ENM, todo el personal del CUD y los trabajadores de las contratas de la ENM, limpieza y restauración. A su vez se han restado todo el personal que podría habitar en el Cuartel Méndez Núñez, suponiendo que este estuviera completo.

1.3 Dotación de diseño

Con la población anteriormente descrita vamos a calcular el volumen medio diario de agua por cada persona, teniendo en cuenta que la red es de tipo separativo, por lo que no tendremos en cuenta caudales de lluvia.

Se adoptan los valores para dotación fijados por Plan de Abastecimiento de Galicia [15] y por el Plan Hidrológico de Galicia Costa, que son recomendados por las instrucciones ITOHG-ABA [39] y ITOHG-SAN [8] de la Xunta de Galicia, estas dotaciones se muestran en los siguientes cuadros Tabla I - 2, Tabla I - 3:

Población	Dotación máxima (L/hab/día)
<2.000	210
De 2.000 a 10.000	270
De 500 a 50.000	300

Tabla I - 2 Dotaciones máximas para poblaciones [8]

Tipo de centro	Consumo
Escuela (sin ducha, ni comedor)	20 a 40 L/persona/día
Escuela (con cafetería y comedor)	40 a 60 L/ persona/día
Escuela (con ducha y comedor)	60 a 80 L/persona/día
Piscina	20 a 50 L/persona/día
Acuartelamientos	30 L/hab/día
Hospitales y clínicas (sin considerar el consumo de restauración y lavandería)	60 L/cama
Hospitales (consumo total)	450 a 900 L/hab/día
Hoteles (sin considerar el consumo de restauración y lavandería)	100 a 160 L/habitación
Hoteles (considerando el consumo de restauración y lavandería)	200 a 400 L/plaza
Residencias de mayores (sin considerar el consumo de restauración y lavandería)	40 L/cama
Oficinas	40-60 L/hab/día
Restaurantes	25 a 40 L/persona/día
Teatros (por asiento, dos funciones al día)	10 a 20 L/asiento/día
Campin	60 a 120 L/plaza/día

Tabla I - 3 Suministros para centros colectivos [8]

Según las tablas anteriores, el proyecto se desarrolla en una zona de una actividad residencial, además, se va a considerar tres tipos distintos de dotación:

$Dem_1 = 210$ L/hab/día. Para poblaciones menores de 2.000 personas. Consideramos que pertenecen a este grupo todas aquellas personas que viven en la ENM. Se toman las dotaciones máximas debido a la alta actividad física de los alumnos y el resto del personal, lo que provoca un consumo elevado del agua.

$Dem_2 = 160$ L/hab/día. Hoteles (sin considerar el consumo de restauración y lavandería). Consideramos que pertenecen a este grupo aquellas personas que están en la Residencia de Oficiales.

Dem₃ = 50 L/hab/día. Oficinas. Incluido en este grupo aquellas personas que trabajan en la ENM, civiles o militares, pero que no residen en la misma. No tomamos los datos de acuartelamiento ya que parte del personal realiza al menos una comida al día en la Escuela, así como también realiza actividad física por lo que consideramos que el consumo como mínimo es igual al de una oficina.

1.4 Caudales teóricos de aguas residuales

Para el cálculo del caudal de diseño, tenemos que tener en cuenta que la red que pretendemos diseñar es de carácter separativo, el sistema debe estar concebido para evacuar el caudal punta diario del día de máximo aporte.

- Cálculo del caudal diario punta de aguas residuales: $QD_{p,total} = 5,626 \text{ L/s}$

$$QD_{p, total} = QD_{p,urb} + QD_{p,ind} + QD_{p,inf}$$

Donde:

$QD_{p,urb}$ = Caudal diario pico anual de agua de origen urbana.

$QD_{p,ind}$ = Caudal diario pico anual de agua de origen industrial.

$QD_{p,inf}$ = Caudal diario pico anual de agua residual por infiltración.

$$QD_{p,urb} = \text{Pob} \times \text{Dot} \times C_{p,est,urb}$$

$$QD_{p,ind} = 0^{(2)}$$

$$QD_{p, inf} = K \times (QD_{p,urb} + QD_{p,ind})$$

(2) No se considera consumo de origen industrial debido a su inexistencia en la ENM.

Donde:

Coefficiente punta de variación estacional. $C_{p,est,urb} = 1,4$ (según apartado 3.1 de [8])

Se considera un coeficiente de retorno de 0,8; es decir, de toda el agua suministrada para el abastecimiento un 80% se convierte en agua residual.

Dot₁ residual = 0,8 x 210 = 168 L/hab/día Población₁: 810 habitantes

Dot₂ residual = 0,8 x 160 = 128 L/hab/día Población₂: 192 habitantes

Dot₃ residual = 0,8 x 50 = 40 L/hab/día Población₃: 323 trabajadores

$K = 1$, según la tabla de valores de coeficiente K para estimar la infiltración del IOTHG SAN 1.1 [39]

Condiciones para estimar la infiltración Red vieja y rasante de conducto por debajo de nivel freático

$$QD_{p,urb} = (810 \text{ hab} \times 168 \text{ L/hab/día} + 192 \text{ hab} \times 128 \text{ L/hab/día} + 323 \text{ hab} \times 40 \text{ L/hab/día}) \times 1,4 = 2,813 \text{ L/s}$$

$$QD_{p,inf} = 1 \times (2,813 \text{ L/s} + 0) = 2,813 \text{ L/s}$$

$$QD_{p,total} = 2,813 \text{ L/s} + 0 \text{ L/s} + 2,813 \text{ L/s} = 5,626 \text{ L/s}$$

- Cálculo del caudal diario medio de aguas residuales: $QD_{m,total} = 4,019 \text{ L/s}$

$$QD_{m,total} = QD_{p,total} / C_{p,est,urb}$$

$$QD_{m,total} = 5,626 \text{ L/s} / 1,4 = 4,019 \text{ L/s}$$

- Cálculo del caudal horario punta total de aguas residuales: $QH_{p,total} = 9,859 \text{ L/s}$

En el cálculo de los caudales punta urbanos se utilizará la fórmula siguiente para el coeficiente punta horario.

$$QH_{p,total} = QH_{p,urb} + QH_{p,inf} + QH_{p,ind}$$

Donde:

$QH_{p,urb}$ = Caudal horario punta de aguas residuales de origen urbano.

$QH_{p,ind}$ = Caudal horario punta de aguas residuales de origen industrial.⁽²⁾

$QH_{p,inf}$ = Caudal horario punta de aguas residuales por infiltración.

$$QH_{p,urb} = QD_{p,urb} \times C_{ph,urb}$$

$$QH_{p,ind} = 0 \text{ }^{(2)}$$

$$QH_{p,inf} = QD_{p,inf} \text{ }^{(3)}$$

(3) Al no considerarse existencia de puntas horarias en el caudal de infiltración, este es igual al caudal medio.

Coefficiente punta horario. $C_{ph,urb} = 1,6 \times [1 + (1/(QD_{m,urb}))^{0,5}] = 1,6 \times [1 + (1/(2,009 \text{ L/s}))^{0,5}] = 2,729$

$QD_{m,urb} = P_{ob} \times D_{ot} = 2,009$

$QH_{p,urb} = 2,813 \text{ L/s} \times 2,729 = 7,676 \text{ L/s}$

$QH_{p,inf} = 2,813 \text{ L/s}$

$QH_{p,total} = 7,676 \text{ L/s} + 0 \text{ L/s} + 2,183 \text{ L/s} = 9,859 \text{ L/s}$

1.5 Caudales registrados de aguas residuales

En este apartado se utilizan los consumos reales de agua de la ENM, mostrados en la Tabla I - 4, para calcular el agua residual generada. De esta forma se comparan con los resultados obtenidos anteriormente y no se sobredimensionará o al contrario, infra dimensionará, la EDAR.

Consumo medio m³	Año
132266	2004
133504	2005
111157	2006
103468	2007
98680	2008
138969	2009
149925	2010
95903	2011
95600	2012
114967	2013
177158	2014
104931	2015
98057	2016
92322	2017
111287	2018
127098	2019

Tabla I - 4 Consumo de agua en la ENM [16]

Como se puede observar en la Tabla I - 4, en el registro desde el 2004 el año que más agua se consumió fue en 2014. Esto es igual a 5,62 L/s.

A partir de este dato el cual es el consumo medio anual se pueden obtener los caudales de aguas residuales generadas durante ese año.

$$QD_{m,total} = QD_{m,urb} + QD_{m,inf}$$

$$QD_{m,urb} = 0,8 \times 5,62 \text{ L/s} = 4,496 \text{ L/s}$$

$$QD_{m,inf} = 4,496 \text{ L/s}$$

$$QD_{m,total} = 8,992 \text{ L/s}$$

$$QD_{p,total} = QD_{m,total} \times C_{pest,urb}$$

$$QD_{p,urb} = 4,496 \text{ L/s} \times 1,4 = 6,29 \text{ L/s}$$

$$QD_{p,inf} = 6,29 \text{ L/s}$$

$$QD_{p,total} = 8,992 \text{ L/s} \times 1,4 = 12,589 \text{ L/s}$$

Tras esto obtenemos el caudal horario punta durante este año.

$$QH_{p,total} = QH_{p,urb} + QH_{p,inf}$$

$$C_{ph,urb} = 1,6 \times [1 + (1/(QD_{m,urb}))^{0,5}] = 1,6 \times [1 + (1/(5,62 \text{ L/s}))^{0,5}] = 2,275$$

$$QH_{p,urb} = 6,29 \text{ L/s} \times 2,275 = 14,319 \text{ L/s}$$

$$QH_{p,inf} = QD_{p,inf}^{(3)} = 4,496 \text{ L/s}$$

$$QH_{p,total} = 14,319 \text{ L/s} + 4,496 \text{ L/s} = 18,816 \text{ L/s}$$

1.6 Resultados finales

Se puede observar que los caudales teóricos son menores que los caudales obtenidos a partir del consumo real. Según [10], el volumen medio de pérdidas de agua en España es del 23%, con respecto a la totalidad del agua suministrada. Además, la red de alcantarillado de la ENM está constituida por tuberías viejas, lo que contribuye a que haya más pérdidas que la media. Esta es la razón principal por la que el consumo histórico es mayor al caudal teórico calculado. Por otra parte, pueden existir otras causas de consumo de agua no tenidas en cuenta. Como la piscina de la ENM, el mantenimiento y lavado de las embarcaciones y buques de la ENM, la limpieza de vehículos. Estas causas pueden provocar que las aguas residuales generadas en la ENM sean mayores que las calculadas.

Estas circunstancias justifican los datos reales como base de partida para diseñar la EDAR, ya que se debe considerar los datos más restrictivos, el caudal más alto. De esta forma no se infra calcularán las dimensiones de la EDAR. Los datos determinados son los siguientes:

Caudal diario medio de aguas residuales: 8,992 L/s

Caudal diario punta de aguas residuales: 12,589 L/s

Caudal horario punta de aguas residuales: 18,816 L/s

ANEXO II: CÁLCULOS DE DIMENSIONAMIENTO

II.1 Objeto

Este anexo tiene como objetivo definir las características geométricas y funcionales de los diferentes depósitos e instalaciones de la EDAR, de la Escuela Naval Militar.

Los datos técnicos, dimensiones y capacidades son los valores mínimos necesarios. Evidentemente, los datos reales serán los que aparezcan en las especificaciones técnicas de cada equipo, que reflejarán los valores definidos por los diferentes fabricantes de equipos. Pero primero se debe hacer un estudio teórico para elegir el equipo más adecuado a las necesidades de la EDAR.

II.2 Datos básicos

De las diferentes alternativas seleccionadas y tras el estudio comparativo realizado, se consideró que la solución más viable desde todos los aspectos evaluados era la de un proceso de superfiltración, en concreto un biorreactor de membrana. En todo caso, los procesos que van a ser utilizado son los siguientes:

- Línea de agua:
 - Pretratamiento: Captación de agua, desbaste de sólidos, desarenado y desengrasado con flotación.
 - Tratamiento primario: tamizado fino con tambor rotatorio.
 - Tratamiento biológico: Biorreactor de membrana.
- Línea de fangos:
 - Deshidratación mecánica por tornillo prensa.

II.3 Datos técnicos

Tras el estudio realizado sobre los consumos de agua en la ENM, Anexo 1, y la carga de contaminantes. Así como las exigencias legales para verter aguas a la Ría de Pontevedra. Se recopilan en este apartado, en las Tabla II- 2 y Tabla II- 1, todos los datos que debe cumplir la EDAR:

Parámetros	Concentración	Porcentaje mínimo de reducción
DBO ₅	25 mg O ₂ /l	70-90
DQO	125 mg O ₂ /l	575
SST	35 mg/l	90
P	2 mg/l	80
N	15 mg/l	70-80

Tabla II- 1 Requisitos del agua tratada [5]

Parámetro	Unidades	Valor
Habitantes Equivalentes	(h-e)	1.112
Caudal Diario (Qd)	(m ³ /d)	776,91
Caudal Pico Diario (Qm)	(m ³ /h)	45,32
K Punta (Kp)	(--)	1,4
Caudal Punta Horario (Qp)	(m ³ /h)	67,74
Concentraciones Medias		
DBO ₅	(mg/l)	133
DQO	(mg/l)	339
SST	(mg/l)	130
NTK	(mg/l)	23
P	(mg/l)	5,12
Cargas Contaminantes Medias		
DBO ₅	(kg/d)	66,72
DQO	(kg/d)	155,68
MES	(kg/d)	83,4
NTK	(kg/d)	14,46
PT	(kg/d)	4,78

Tabla II- 2 Exigencias de la EDAR propuesta

II.4 Cálculo del desbaste: rejas con correa continua

Para calcular las dimensiones de las rejas es esencial que la velocidad del efluente se encuentre entre unos parámetros: $0,5\text{m/s} \leq V \leq 1\text{m/s}$. Además, se tendrá en cuenta el caudal medio y el caudal máximo. Los parámetros y dimensiones en los que se basan los cálculos son los siguientes [40]:

$$Q_m = 32,37 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_M = Q_{p, h} = 67,74 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_i = 0,6 \text{ m/s (Velocidad ideal)}$$

$$e = 10 \text{ mm (espesor de los barrotes)}$$

$$d = 15 \text{ mm (separación entre barrotes)}$$

$$a = 30\% \text{ o } 0,3 \text{ (atascamiento máximo)}$$

$$r = 0,3 \text{ m (resguardo)}$$

R = 1 (Relación anchura y altura del canal)

- Cálculo de la velocidad de paso con caudal máxima y la reja colmatada (atascada), caso más desfavorable: $V_p = 0,857$ m/s

$$V_p = \frac{v_i}{1 - a}$$

- Cálculo de la superficie del canal, las rejillas: $S = 0,6$ m²

$$S = \frac{Q_M}{V_p} \times \frac{e + d}{d} \times \frac{1}{1 - a}$$

- Cálculo de la anchura del canal: $A = 0,8$ m

$$A = \sqrt{\frac{S}{R}}$$

- Cálculo de la altura del canal: $H = 1,1$ m

$$H = \frac{S}{A} + R$$

II.5 Cálculo del desarenado y desengrasado: floculación

Esta reacción química depende del efluente de entrada y de sus características particulares, como la temperatura, tipo de contaminantes, densidad, etcétera. Todos ellos varían con el tiempo, por tanto se han tomado datos estándar al no haber realizado un estudio de laboratorio de las aguas residuales generadas en la ENM. Estos datos, según [6], son los siguientes:

$A/S = 0,008$ mL/mg (Relación entre el volumen del aire y la masa de sólidos)

$S_a = 18,7$ mL/L (Solubilidad del aire)

$f = 0,5$ (Relación del aire disuelto con respecto al total)

$Q_m = 8,992$ L/s = 32371,2 L/h

$C_{SS} = 130$ mg/L (Concentración de SS)

$V_{f, sol} = 8$ L/m²/min (Velocidad de flotación de sólidos)

- Cálculo de la presión del aire en los difusores: $P = 2,086$ atm

$$\frac{A}{S} = \frac{1,3 \times (f \times P)}{C_{SS}} - 1$$

- Cálculo de la superficie necesaria: $S = 67,44$ m²

$$S = \frac{Q_m}{V_{f, sol}}$$

- Cálculo de la cantidad de sólidos eliminados: $SST = 624$ mg/m²/h = 42,08 mg/h

$$SST = \frac{Q_m \times C_{SS}}{S}$$

II.6 Homogeneizador: en línea

El método teórico para calcular las dimensiones del homogeneizador es a través de un registro horario de la cantidad de agua residual generada. Estas muestras deben ser una media de distintos días, en distintos periodos del año. Al carecer de estos datos se realizará el cálculo con los caudales máximos y mínimos, así como con un coeficiente de seguridad. En consecuencia se considera que la capacidad necesaria del homogeneizador debe ser la diferencia entre el caudal máximo diario y el caudal medio, durante un día [2].

$$C_{seg} = 1,5 \text{ (Coeficiente de seguridad)}$$

$$Q_{p, día} = 18,816 \text{ L/s} = 1087 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$Q_m = Q_{sal} = 8,992 \text{ L/s} = 776,88 \text{ m}^3/\text{día}$$

- Cálculo de volumen con caudal mínimo; $V = 400 \text{ m}^3$

$$V_m = (Q_{p,día} - Q_{m,día}) \times 1,5$$

II.7 Tamizado fino: tambor rotatorio

Al igual que en el desbaste [40], existe una velocidad límite tanto superior como inferior. Pero a diferencia de los procesos anteriores solo se considera el caudal medio, que es el de salida del homogeneizador.

$$Q_m = 32,37 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$d = 0,25 \text{ mm (Mallado cuadrado)}$$

$$e = 0,15 \text{ mm (espacio entre el mallado)}$$

$$0,5 \leq V \leq 1 \text{ m/s; } V_M = 0,5 \text{ m/s}$$

$$a = 0,3 \text{ (colmatación o atascamiento)}$$

$$R_{D/H} = 5 \text{ (Diámetro/Altura)}$$

$$R = 0,2 \text{ m}$$

- Cálculo de la velocidad de paso con caudal medio y la reja colmatada (atascada): $V_p = 0,71 \text{ m/s}$

$$V_p = \frac{v_i}{1 - a}$$

- Cálculo de la superficie del canal, las rejillas: $S = 0,3 \text{ m}^2$

$$S = \frac{Q_m}{V_p} \times \frac{e + d}{d} \times \frac{1}{1 - a}$$

- Cálculo del diámetro del canal: $D = 0,8 \text{ m}$

$$S = \pi \times D \times H$$

$$D = 5 \times H$$

- Cálculo de la altura del canal: $H = 0,35 \text{ m}$

$$H = \frac{S}{A} + R$$

- Cálculo de DBO_5 eliminado y de SST: $\text{DBO}_{5,\text{elim}} = 33,25 \text{ mg/L}$; $\text{SST}_{\text{elim}} = 32,5 \text{ mg/L}$
En el Metcalf se muestra la Figura II- 1, en esta se determina el rango de eliminación del DBO y de los SST. A partir de esta se determina la cantidad eliminada, se tomará el porcentaje mínimo, y de esta forma se determinará si la EDAR cumple los requisitos legales, trabajando de la forma menos eficiente.

$$\text{DBO}_{5,\text{elim}} = 0,25 \times C_{\text{DBO5}}$$

$$\text{SST}_{\text{elim}} = 0,25 \times C_{\text{SST}}$$

Type of screen	Size of openings		Percent removal	
	in.	mm	BOD	TSS
Fixed parabolic	0.0625	1.6	5–20	5–30
Rotary drum	0.01	0.25	25–50	25–45

Figura II- 1 Rendimiento medio del tamiz de tambor rotatorio [6]

II.8 Biorreactor con membrana

Para realizar los cálculos del biorreactor se ha utilizado los siguientes datos [6]:

$$Q_m = 8,992 \text{ L/s} = 776,88 \text{ m}^3/\text{día} = 32371,2 \text{ L/h}$$

$$C_{\text{DBO5}} = 100 \text{ mg/L}$$

$$C_{\text{SST}} = 97,5 \text{ mg/L}$$

$$C_{\text{SSLM}} = 6 \text{ g/L (Concentración de sólidos en suspensión en el reactor)}$$

$$\text{SSV/SST} = 0,7 \text{ (Relación de sólidos en suspensión volátiles/totales)}$$

$$\text{TRH} = 1 \text{ día}$$

- Cálculo del flujo de DBO_5 . $\text{DBO}_5 = 77,69 \text{ kg/h}$

$$\text{DBO}_5 = C_{\text{DBO5}} \times Q_m$$

- Cálculo del flujo de SST. $\text{SST} = 75,73 \text{ kg/h}$

$$\text{SST} = C_{\text{SST}} \times Q_m$$

- Cálculo del flujo de SSV. $\text{SSV} = 53,01 \text{ kg/h}$

$$\text{SSV} = \text{SST} \times \frac{\text{SSV}}{\text{SST}}$$

- Cálculo de la carga másica. $C_M = 0,15 \text{ kg DBO}_5/\text{kg SSLM}$

$$CM = \frac{C_{DBO5}}{C_{SSLM}}$$

- Cálculo del volumen del reactor. $V = 86,33 \text{ m}^3$

$$V = \frac{C_{DBO5}}{C_{SSLMs} \times C_M}$$

- Cálculo de la superficie de las membranas de ultrafiltración: $S = 2976 \text{ m}^2$

$$S_{fil} = n_{mod} \times n_{caset} \times S_{mód}$$

Se ha elegido 2 casetes, es decir, un tren. De esta forma hay capacidad para añadir otro casete, en caso de que aumente el caudal o por mantenimiento. Tomando dos casetes, la capacidad de filtración de las membranas es la siguiente: $Q_{filtr} = 59371 \text{ L/h}$

$$Q_{filt} = C_{fil} \times S$$

Según [41], el cálculo de la superficie se debe realizar a través de datos experimentales, por ello se han obtenido datos de un fabricante en particular, “Membranas Zenon”. Esta empresa organiza los filtros en distintas piezas. La pieza más grande se llama tren, esta tiene capacidad para tres casetes, aunque puede tener menos. Cada casete contiene un número fijo de módulos. Y a su vez cada módulo está formado por millones de fibras que filtran el agua. Esta empresa nos muestra los siguientes datos:

$C_{fil} = 19,95 \text{ L/m}^2/\text{h}$ (Capacidad de filtración de las membranas)

$S_{mod} = 31 \text{ m}^2/\text{modulo}$ (Superficie por modulo)

$n_{mod} = 48 \text{ módulos/casete}$ (Cantidad de módulos por casete)

- Cálculo de contaminantes eliminados

En [6] se muestra la Figura II- 2, las concentraciones finales que se obtiene en el efluente tras el tratamiento con membranas:

$DBO_5 = 3 \text{ mg/L}$

$DQO = 30 \text{ mg/L}$

$SST = 1 \text{ mg/L}$

$NTK = 10 \text{ mg/L}$

$P = 2 \text{ mg/L}$

Constituent	Unit	Untreated wastewater	Range of effluent quality after indicated treatment		
			Conventional activated sludge ^b	Activated sludge with BNR ^c	Membrane bioreactor
Total suspended solids (TSS)	mg/L	120–400	5–25	5–20	≤1
Biochemical oxygen demand (BOD)	mg/L	110–350	10–30	5–15	<3
Chemical oxygen demand (COD)	mg/L	250–800	40–80	20–40	15–30
Total organic carbon (TOC)	mg/L	80–260	20–40	10–20	5–10
Ammonia nitrogen	mg N/L	12–45	1–10	0.7–3.0	0.7–3.0
Nitrate nitrogen	mg N/L	0–trace	10–30	2–10	2–10 ^d
Nitrite nitrogen	mg N/L	0–trace	0–trace	0–trace	0–trace
Total nitrogen	mg N/L	20–70	15–35	5–10	3–10 ^d
Total phosphorus	mg P/L	4–12	4–10	0.5–2.0	0.5–2.0 ^d

Figura II- 2 Cantidad de contaminantes eliminados en un MBR [6]

- Cálculo del rendimiento de eliminación de contaminantes

% DBO₅ eliminado: 97%

% DQO eliminado: 91%

% SST eliminado: 99%

% NTK eliminado: 57%

% P eliminado: 61%

II.9 Cantidad de fangos generados

En este apartado, según [42] se calcularán la cantidad de fangos generados, tanto primarios, como secundarios. Los primeros se generan en el tamizado fino, mientras que los segundos se generan en el MBR.

- Cálculo de la cantidad de fangos primarios: $Pf_{prim} = 25,13 \text{ kg/día}$

$C_{SST, elim} = 32,25 \text{ mg/L}$ (Concentración de SST eliminado en el tratamiento primario)

$Q_m = 8,992 \text{ L/s} = 776,88 \text{ m}^3/\text{día} = 32371,2 \text{ L/h.}$

$$Pf_{prim} = Q_m \times C_{SST, eli}$$

- Cálculo de la cantidad de fangos secundarios: $Pf_{secun} = 79,68 \text{ kg/día}$

$DBO_{5, elim} = 97 \text{ mg/L}$ (Concentración de DBO₅ eliminado en el tratamiento secundario)

$SST_{elim} = 96,5 \text{ mg/L}$

$\theta = 5 \text{ días}$ (Edad de fangos) Con esta duración se elimina más del 90% del DBO₅

$$Pf_{secun} = Q_m \times C_{DBO5, elim} \times \zeta$$

- Cálculo de la tasa de producción de fangos: $\zeta = 1,19 \text{ kg SS/kg DBO}_5$

$$\zeta = 0,55 + 0,675 \times r - 0,007 \times \theta \times (1 + r)$$

- Cálculo de la relación entre los SST eliminados y el DBO₅ eliminado: $r = 0,994$

$$r = \frac{SST_{elim}}{DBO_{5,elim}}$$

II.10 Concentración de fangos

Para calcular las dimensiones y rendimientos de la deshidratación de fangos, a través del tornillo deshidratador de fangos es necesario calcular el volumen de fangos generados. Lo primero de todo es reseñar que los lodos primarios y secundarios se juntarán y tratarán por igual. Para el cálculo del volumen de los fangos se dispone de los siguientes datos, según [6]:

$$M_{F,prim} = 25,13 \text{ kg/día (Cantidad de fangos primarios)}$$

$$M_{F,secun} = 79,68 \text{ kg/día (Cantidad de fangos secundarios)}$$

$$M_{F,T} = 104,81 \text{ kg/día (Cantidad de fangos totales)}$$

$$C_{SST} = 0,05 \text{ (Concentración de SST en los lodos sin tratar)}$$

$$SSV/SS = 0,7$$

$$GE_{SS} = 2,5 \text{ (Gravedad específica de los sólidos en suspensión)}$$

$$GE_{SSV} = 1 \text{ (Gravedad específica de los sólidos en suspensión volátiles)}$$

- Cálculo de la gravedad específica media de los SST: $GE_{SST} = 1,22$

$$\frac{1}{GE_{SST}} = \frac{SSV/SS}{GE_{SSV}} + \frac{1 - SSV/SS}{GE_{SS}}$$

- Cálculo de la gravedad específica media de los lodos: $GE_m = 1,02$

$$\frac{1}{GE_m} = \frac{C_{SST}}{GE_{SST}} + \frac{1 - C_{SST}}{1}$$

- Cálculo del caudal de los lodos: $V_F = 2,06 \text{ m}^3/\text{día}$

$$V_F = \frac{M_{F,T}}{D_{agua} \times GE_m \times C_{SST}}$$

La reducción del volumen en uno de estos deshidratadores es del 30 al 40%. Mientras que en la empresa "Huber" [30], se determina que sin un tratamiento previo, se obtienen reducciones del orden de 29 al 33%. Por lo que el volumen resultante de fangos a ser recogidos por una empresa, es el siguiente:

- Cálculo de volumen de lodos deshidratados: $V_{F,desh} = 1,442 \text{ m}^3/\text{día}$

$$V_{F,desh} = V_F \times 0,7$$

Para obtener las dimensiones del equipo se han consultado las distintas empresas que ofrecen este producto. Esto se debe a la novedad del proceso en el mercado, por lo que su

dimensionamiento se realiza a través de casos prácticos. Tras ello se ha determinado que la superficie ocupada por la totalidad de los equipos es inferior a 15 m². En el caso de la empresa “Huber”, oferta un equipo que trata 70 kg/h, de sólidos secos. Mucho mayor a la cantidad generada en esta EDAR. La instalación completa ocuparía 12 m².

II.11 Consumos eléctricos por proceso

Para obtener el presupuesto preliminar de la EDAR, así como la evaluación de su eco-eficiencia, es necesario obtener los consumos eléctricos de cada uno de los procesos. A pesar de que estos variarán según el fabricante, se puede obtener un consumo estimado a partir de la Figura II- 3. El consumo eléctrico incrementa el coste de operación de la misma planta, provocando un análisis más negativo a la hora de valorar la ecoeficiencia.

Technology	Energy consumption ^b	
	kWh/10 ³ gal	kWh/m ³
Conventional secondary treatment WWTP^c	0.38 to 0.67	0.10–0.18
Wastewater influent pumping	0.12–0.17	0.032–0.045
Screens	0.001–0.002	0.0003–0.0005
Grit removal (aerated grit removal)	0.01–0.05	0.003–0.013
Trickling filters	0.23–0.35	0.061–0.093
Trickling filter-solids contact	0.35	0.093
Activated sludge for BOD removal	0.53–4.1	0.14
Activated sludge with nitrification/denitrification	0.87–0.88	0.23
Membrane bioreactor	1.9–3.8	0.5–1.0 ^d
Return sludge pumping	0.03–0.05	0.008–0.013
Secondary settling	0.013–0.015	0.003–0.004
Dissolved air flotation	0.12–0.15	0.03–0.04
Tertiary filtration (depth filtration)	0.1–0.3	0.03–0.08
Tertiary filtration (surface filtration)		
Chlorination (sodium hypochlorite)	0.001–0.003	0.0003–0.0008
UV (ultraviolet) disinfection	0.05–0.2	0.01–0.05
Microfiltration/ultrafiltration	0.75–1.1	0.2–0.3
Reverse osmosis (without energy recovery)	1.9–2.5	0.5–0.65
Reverse osmosis (with energy recovery)	1.7–2.3	0.46–0.6
Electrodialysis (TDS range 800–1200 mg/L) ^e	4.2–8.4	1.1–2.2
UV photolysis with O ₃ or H ₂ O ₂ (advanced oxidation) ^g	0.2–0.4	0.05–0.1
Sludge pumping	0.003	0.0008
Gravity thickening	0.001–0.006	0.0003–0.0016
Aerobic digestion	0.48–1.2	0.13–0.32
Mesophilic anaerobic digestion (primary plus waste activated sludge) ^f	0.35–0.6	0.093–0.16
Mesophilic anaerobic digestion with thermal hydrolysis pretreatment (primary plus waste activated sludge) ^f	0.58–0.6	0.015–0.02
Sludge dewatering (centrifuge)	0.02–0.05	0.005–0.013
Sludge dewatering (belt filter press)	0.002–0.005	0.0005–0.0013

Figura II- 3 Consumos eléctricos de distintos procesos [6]

A partir de la tabla, así como de datos obtenidos de distintos fabricantes, los consumos por caudal o unidad de masa son los siguientes:

$$Q_m = 8,992 \text{ L/s} = 32,37 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$CE_{u, \text{rejas}} = 0,0005 \text{ KWh/m}^3$$

$$CE_{\text{cinta}} = 0,5 \text{ KWh (Consumo eléctrico de una cinta transportadora medía)}$$

$$CE_{u, \text{flot}} = 0,013 \text{ KWh/m}^3$$

$$CE_{\text{homog}} = 0,53 \text{ KWh [37]}$$

$$CE_{u, \text{tamiz}} = 0,3 \text{ KWh/m}^3$$

$$CE_{u, \text{MBR}} = 1 \text{ KWh/m}^3$$

$$CE_{u, \text{deshid}} = 0,01 \text{ KWh/kg (consumo del deshidratador de tronillos por kg de sólido seco) [30]}$$

$$M_{F,T} = 104,81 \text{ kg/día} = 4,36 \text{ Kg/h}$$

- Consumo eléctrico de las rejjas: $CE_{\text{rejas}} = 0,52 \text{ KWh/h}$

$$CE_{\text{rejas}} = Q_m \times CE_{u, \text{rejas}} + CE_{c, \text{trans}}$$

- Consumo eléctrico de la flotación: $CE_{\text{flot}} = 0,43 \text{ KWh/h}$

$$CE_{\text{flot}} = Q_m \times CE_{u, \text{flot}}$$

- Consumo eléctrico del homogeneizador: $CE_{\text{homog}} = 0,53 \text{ KWh}$

- Consumo eléctrico del tamiz fino: $CE_{\text{tamiz}} = 9,71 \text{ KWh/h}$

$$CE_{\text{tamiz}} = Q_m \times CE_{u, \text{tamiz}}$$

- Consumo eléctrico del MBR: $CE_{\text{MBR}} = 32,37 \text{ KWh/h}$

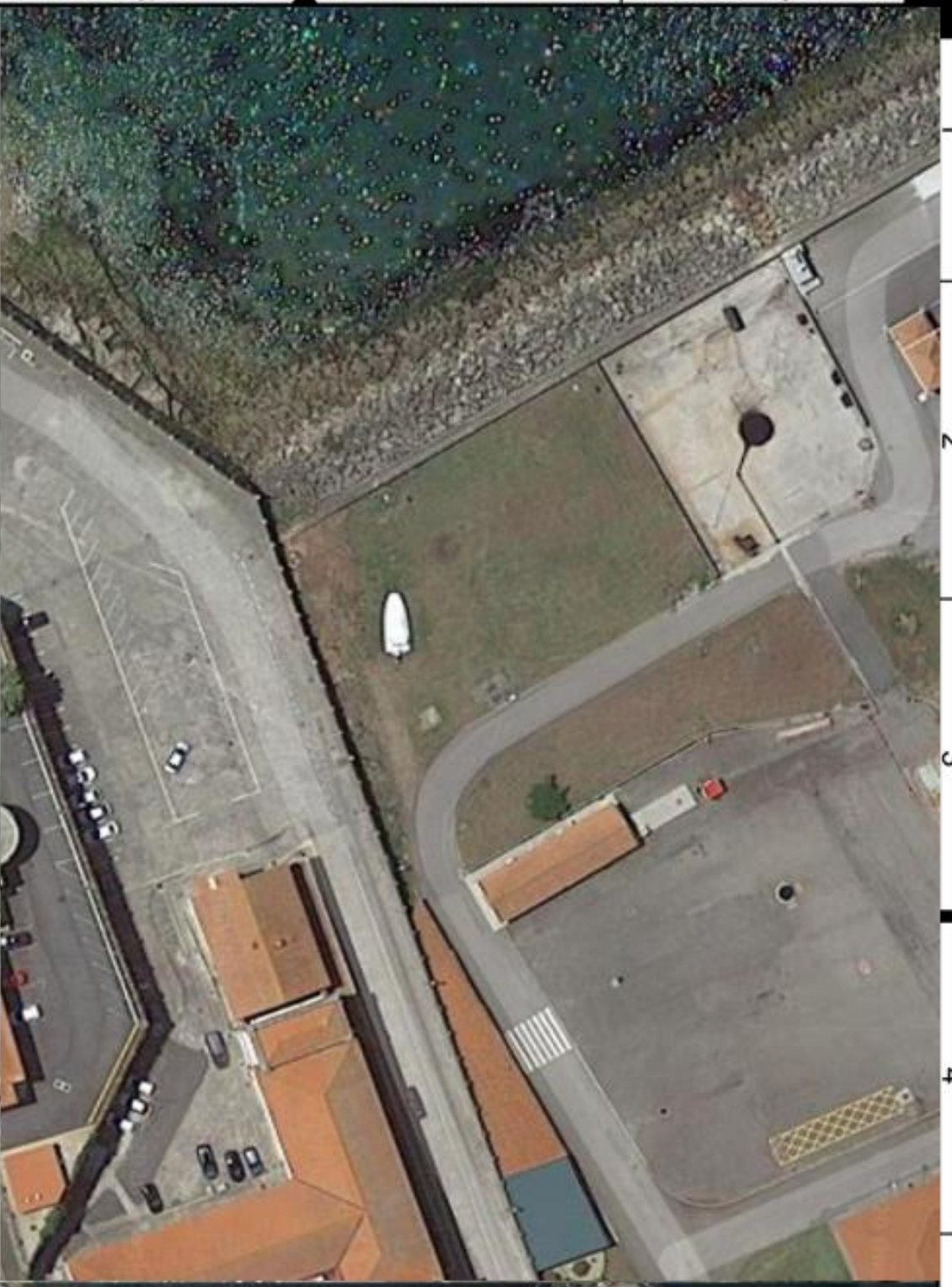
$$CE_{\text{MBR}} = Q_m \times CE_{u, \text{MBR}}$$

- Consumo eléctrico del deshidratador: $CE_{\text{deshid}} = 0,044 \text{ KWh/h}$

$$CE_{\text{deshid}} = M_{F,T} \times CE_{u, \text{deshid}}$$

ANEXO III: PLANOS

En este anexo se adjuntan los planos de situación de la EDAR, así como las dimensiones del recinto donde se encontraría la depuradora. Las herramientas para obtener dichos planos han sido: NX Siemens [44], Google Maps [45] e Iberpix IGN [46].



PLANTA DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES EN LA ENMI

Propietario: Yago de Pazos Azpeitia

Proyectista: Yago de Pazos Azpeitia

Plano Nº: 1

Situación General

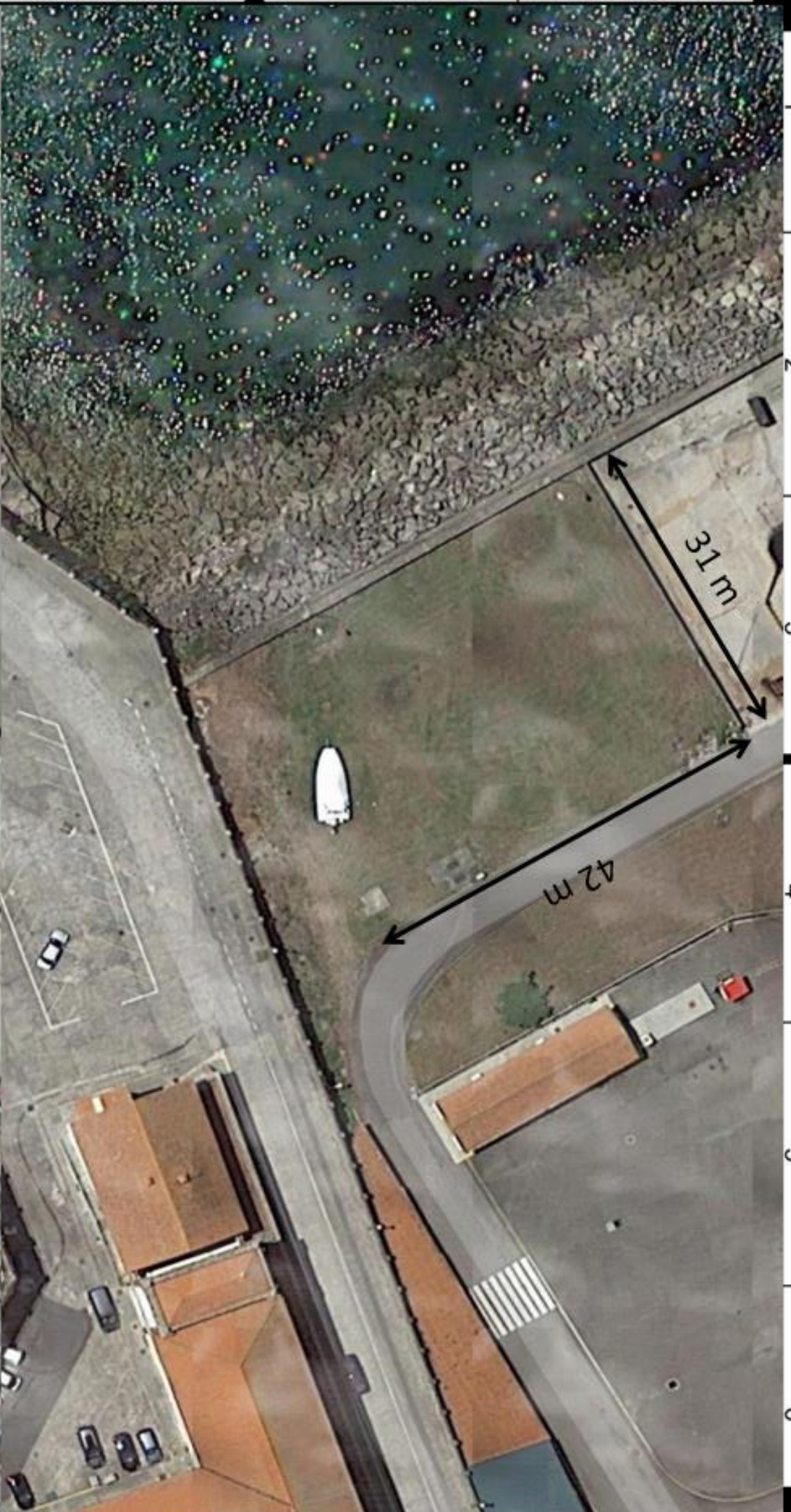
Nº Registro: 1

Fecha: 29 Feb 2020

A4

1:1500

1 2 3 4 5 A4



Nº Registro: 1

PLANTA DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES EN LA ENM

Propietario: Yago de Pazos Azpeitia

Proyectista: Yago de Pazos Azpeitia

Plano Nº: 2

Situación

Fecha: 29 Feb 2020

A4

1:500

1

2

3

4

5

A4

