

GRADO EN INGENIERÍA CIVIL  
**TRABAJO FIN DE GRADO**

***AMPLIACIÓN DE LA EDAR DE MUSKIZ  
(BIZKAIA), PARA LA REUTILIZACIÓN  
INDUSTRIAL DEL AGUA TRATADA***

***DOCUMENTO 1- MEMORIA Y ANEJOS***

**Alumno:** Zumelzu, Núñez, Gaizka

**Directora:** de Luis, Álvarez, Ana

**Curso:** 2017-2018

**Fecha:** Julio de 2018

- Resumen y palabras clave:

La EDAR de Muskiz vierte su efluente directamente al Barbadún, afectando a la calidad de las aguas en el humedal y en la desembocadura de esta ría en la playa. Por otro lado, el elevado consumo de agua de Petronor es un problema medioambiental por la contribución al agotamiento de dicho recurso.

Con la ampliación de la EDAR de Muskiz y el añadido de una etapa de afino y almacenamiento del agua tratada para una posterior reutilización industrial, se pueden minorar ambos problemas.

La etapa de afino consiste en un proceso de membrana basado en ultrafiltración que permite mejorar los parámetros físicos y biológicos que requiere la legislación para un uso industrial. Además, se realiza una cloración final que aporte una desinfección remanente y duradera hasta su reutilización.

Finalmente, el agua se almacena en un depósito con capacidad suficiente para embalsar todo el volumen tratado durante más de doce horas.

Las nuevas instalaciones que se han planteado en la parcela de la EDAR de Muskiz, siguiendo el recorrido natural del agua, son: una arqueta y pozo de bombeo (dispuesto tras el tratamiento secundario), un equipo de ultrafiltración basado en filtros de fibra hueca y un depósito colocado en la cola de la línea y después de la cloración. Además, se ha colocado un depósito de agua corriente para cubrir el ciclo de lavado de los filtros y todas las conducciones necesarias para materializar este tratamiento de afino.

Se ha apostado, principalmente, por equipos y elementos prefabricados en diversos materiales (hormigón, poliéster reforzado con fibra de vidrio, acero y otros metales...). De esta forma se logrará una rápida puesta en servicio y una reducción de plazos que se traduzca en una mínima afección al actual funcionamiento de la EDAR.

El total del proyecto saldrá a concurso con un Presupuesto de Ejecución por Contrata de 1.564.318,05 € y el plazo de ejecución estimado, contando con una correcta planificación y con la mano de obra suficiente, rondará los 60 días.

Palabras clave: Tratamiento terciario, Reutilización, Procesos de membrana, Ultrafiltración.

- Summary and keywords:

The Muskiz WWTP pours its effluent directly to Barbadún, affecting the quality of the waters in the wetland and in the mouth of this estuary on the beach. On the other hand, the high water consumption of Petronor is an environmental problem due to the contribution to the depletion of said resource.

With the expansion of the Muskiz WWTP and the addition of a refining and storage stage for treated water for later industrial reuse, both problems can be attacked.

The refining stage consists in a membrane process based on ultrafiltration, which allows improving the physical and biological parameters required by legislation for industrial use. Furthermore, a final chlorination is carried out that provides a lasting disinfection until its reuse.

Finally, the water is stored in a tank which has enough capacity to dam all the treated volume for more than twelve hours.

The new installations that have been raised in the plot of the Muskiz WWTP, following the natural route of the water, are: a chest and pumping well (arranged after secondary treatment), ultrafiltration equipment based on hollow fiber filters and a deposit placed at the end of the line and after the chlorination. In addition, a tank of clean water has been placed to cover the washing cycle of the filters and the necessary conductions to materialize this refining treatment.

It has been bet, mainly, by prefabricated equipment and elements done in various materials (concrete, polyester reinforced with fiberglass, steel and other metals...). In this way, a quick start-up and a reduction in terms will be achieved. That translates into a minimal impact on the current operation of the WWTP.

The total of the project will go out to tender with a Contract Execution Budget of 1.564.318,05 €. The estimated execution time, having a correct planning and sufficient manpower, will be around 60 days.

Keywords: Tertiary treatment, Reuse, Membrane processes, Ultrafiltration.

- Laburpena eta hitz gakoak:

Muskizko UHA-k bere ur-efluentea zuzenean Barbadunera botatzen du, hezegunearen uraren kalitatea eta hondartzaren itsasadarraren estuarioa kaltetuz. Bestalde, Petronor-en ur kontsumo handia ingurumen-arazo argi bat da, baliabide hori agortzeaz laguntzen baitu.

Muskiz UHA-ren hedapenarekin, eta tratatutako uraren fintze eta biltegitratzearekin batera, ondorengo berrerabilpen industrialerako, bi arazo hauek murriztu daitezke.

Fintze-etapa ultrafiltzazioan oinarritutako mintza prozesua izango da. Eta honek industria erabilerarako legeak eskatzen dituen parametro fisiko eta biologiko arte hobetuko du tratatutako uren kalitatea. Gainera, egiten den azken klorazioarekin, desinfekzio iraunkor bat bermatzen da berrerabilera arte.

Azkenean, ura hamabi ordu baino gehiagoko edukiera duen depositu batean gordetuko da.

Muskizko UHA-n planteatu diren instalazio berriak, uraren ibilbide naturala jarraituz, hurrengoak dira: kutxatila eta ponpaketa putzua (bigarren mailako tratamenduaren ondoren jarrita), ultramiltzazio ekipo bat zuntz huts iragazkietan onarritutakoa eta linearen buztanan, klorazio ondoren, kolokatutako depositu bat. Gainera, iragazkien garbiketa zikloa betetzeko, beste depositu bat jarri da eta tratamendu osoa gauzatzeko behar diren hodiak ere.

Batez ere, ekipamendu eta elementu aurrefabrikatuengaz apustu egin da, material desberdinez eginak (hormigoia, beirazko zuntzaz indartutako poliesterra, altzairu eta beste metalak...). Horrela, denbora minimo batean amaituko dira lanak eta UHA-ren egungo lanetan eraginak txikiagotuko dira.

Dena kontuan hartuta, Kontrata Egite Aurrekontua hurrengoa da: 1.564.318,05€. Eta egite epea, plangintza aproposa eta eskulan nahiko bat suposatzen, 60 egungoa, gutxi gorabehera, izango da.

Hitz gakoak: Hirugarren mailako tratamendua, Berrerabilera, Mintz prozesuak, Ultrafiltrazioa

## ÍNDICE GENERAL

---

1.1 MEMORIA DESCRIPTIVA .....	6
1.2 ANEJO 1: DIMENSIONAMIENTO DEL TRATAMIENTO Terciario.....	98
1.3 ANEJO 2: CÁLCULO DE LA LÍNEA DE PRESIÓN DEL TRATAMIENTO	125

## 1.1 MEMORIA DESCRIPTIVA

---

## ÍNDICE MEMORIA DESCRIPTIVA

---

1.1 MEMORIA DESCRIPTIVA .....	6
1 Introducción y Antecedentes.....	10
2 Justificación del trabajo .....	15
3 Objeto del proyecto .....	18
4 Situación y emplazamiento .....	19
5 Selección de alternativas .....	23
6 Descripción del proyecto .....	57
6.1 Bombeo .....	59
6.2 Filtración y desinfección .....	66
6.3 Post-desinfección y desinfección de seguridad mediante cloración ...	73
6.4 Depósito de almacenamiento del agua tratada .....	77
7 Obra civil .....	78
8 Planificación de la obra.....	80
9 Resumen del Presupuesto .....	82
10 Conclusiones .....	83
11 Normativa .....	84
12 Bibliografía .....	87

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Evolución demográfica Muskiz. [1].....	10
Figura 2: Vista en perspectiva del valle. Detalle de EDAR, Petronor y playa de La Arena. [4].....	11
Figura 3: Vistas de la playa de La Arena abarrotada de gente. [16,17].....	16
Figura 4: Distribución consumo de agua Petronor. [9].....	16
Figura 5: Alzado de la zona objeto de proyecto. [20].....	19
Figura 6: Planta de la zona objeto de proyecto. [14].....	20
Figura 7: Definición por colores y categorías de los usos del suelo. [14].....	21
Figura 8: Vista del emplazamiento con la cartografía de la zona. [21].....	22
Figura 9: Parámetros de calidad de entrada/salida de las aguas en la depuradora de Muskiz comparados con los que dicta la normativa de vertido. [22,23].....	23
Figura 10: Criterios de calidad para reutilización de las aguas según sus usos. [24].....	23
Figura 11: Tabla resumen de los diferentes procesos de desinfección. [Elaboración propia].....	26
Figura 12: Tabla resumen de los diferentes procesos de oxidación avanzada. [Elaboración propia].....	26
Figura 13: Tabla resumen de los diferentes procesos de membrana. [Elaboración propia].....	26
Figura 14: Izq: Perspectiva de cámara de cloración. Dcha: Detalle del tanque de cloración. [28].....	28
Figura 15: Resumen esquematizado del funcionamiento del proceso de ozonización. [30].....	30
Figura 16: Tratamiento terciario de agua residual con radiación UV. [34].....	32
Figura 17: Agitación en tratamiento de afino de agua depurada con ácido peracético. [36].....	34
Figura 18: Clasificación y características de membranas. [27].....	39
Figura 19: Principio y tipo de membranas. [27].....	39
Figura 20: Principio y tipo de membranas. [42].....	40

Figura 21: Esquema de circulación de flujo de membrana tubular. [43].....	41
Figura 22: Sección transversal y funcionamiento de membranas de los sistemas de fibra hueca. [44].....	42
Figura 23: Izq: Detalle del conjunto placa-membrana. Dcha: Funcionamiento del módulo. [45].....	42
Figura 24: Sistema de membrana en espiral, funcionamiento. [46].....	43
Figura 25: Pesos y criterios valorados. [Elaboración propia].....	47
Figura 26: Valoración alternativa 1. [Elaboración propia].....	50
Figura 27: Valoración alternativa 2. [Elaboración propia].....	52
Figura 28: Valoración alternativa 3. [Elaboración propia].....	54
Figura 29: Valores suma y valor ponderado para cada alternativa. [Elaboración propia].....	55
Figura 30: Rango ponderado para cada alternativa. [Elaboración propia].....	56
Figura 31: Croquis del emplazamiento para el proceso de membrana (rojo) y el tanque de almacenamiento (verde). [57].....	58
Figura 32: Esquema de funcionamiento del tornillo de Arquímedes. [66].....	61
Figura 33: Diferentes vistas y disposiciones de una bomba sumergible de hélice. [65].....	62
Figura 34: Instalación típica de bomba sumergible en pozo prefabricado. [65]	63
Figura 35: Vistas de un pozo de bombeo. [67,68].....	65
Figura 36: Equipo de ultrafiltración Fluytec. [58].....	67
Figura 37: Esquema de flujo de la instalación de ultrafiltración. [Elaboración propia].....	69
Figura 38: Frecuencias y métodos de muestreo contaminantes para reuso de refrigeración. [69,70].....	72
Figura 39: Características tanque de cloración EDAR Muskiz. [72].....	75
Figura 40: Diagrama de Gantt. [Elaboración propia].....	81

## 1 Introducción y Antecedentes

A continuación se realiza un breve repaso a la historia y al estado actual y pasado de Muskiz, lugar en el que se llevará a cabo el proyecto de ampliación de la actual EDAR.

Además en este primer apartado, también se va a introducir el concepto de reutilización o reuso del agua y se tratarán los prolegómenos y el sentido de esta técnica.

Muskiz es un municipio de 7579 habitantes repartidos en 6 núcleos urbanos claramente separados. Pertenece a la provincia de Bizkaia, concretamente a la comarca del Gran Bilbao y dentro de esta, a la división denominada como “Zona Minera”.

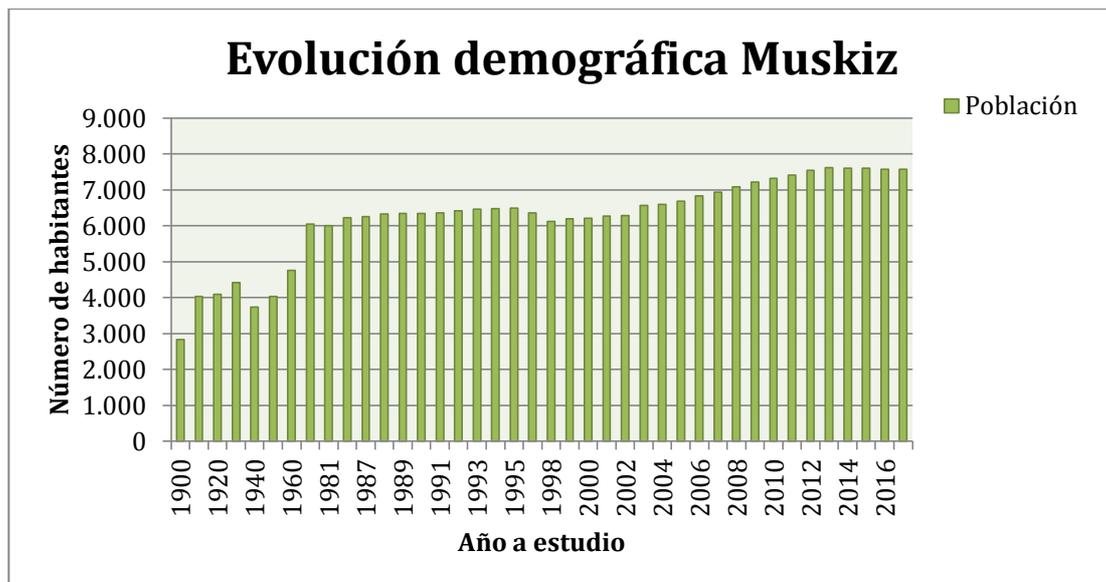


Figura 1: Evolución demográfica Muskiz. [1]

Está ubicado en el punto más occidental de la costa bizkaína limitando, por tanto, con el mar Cantábrico por el Norte y Castro Urdiales (Cantabria) por el oeste. Además linda con los municipios de Galdames por el sur y Abanto y Zierbena y Zierbena por el este, todos ellos integrados en el territorio histórico bizkaíno.

El municipio está localizado en el valle del río Barbadun, del que se hablará bastante a lo largo de este proyecto. Este torrente que da nombre a la citada hondonada, desemboca en la playa de La Arena, la cual Muskiz comparte con la localidad de Zierbena. El entorno de dicho delta es un espacio natural protegido, denominado como Zona de Especial Conservación según la Red Natura 2000. [2,3]

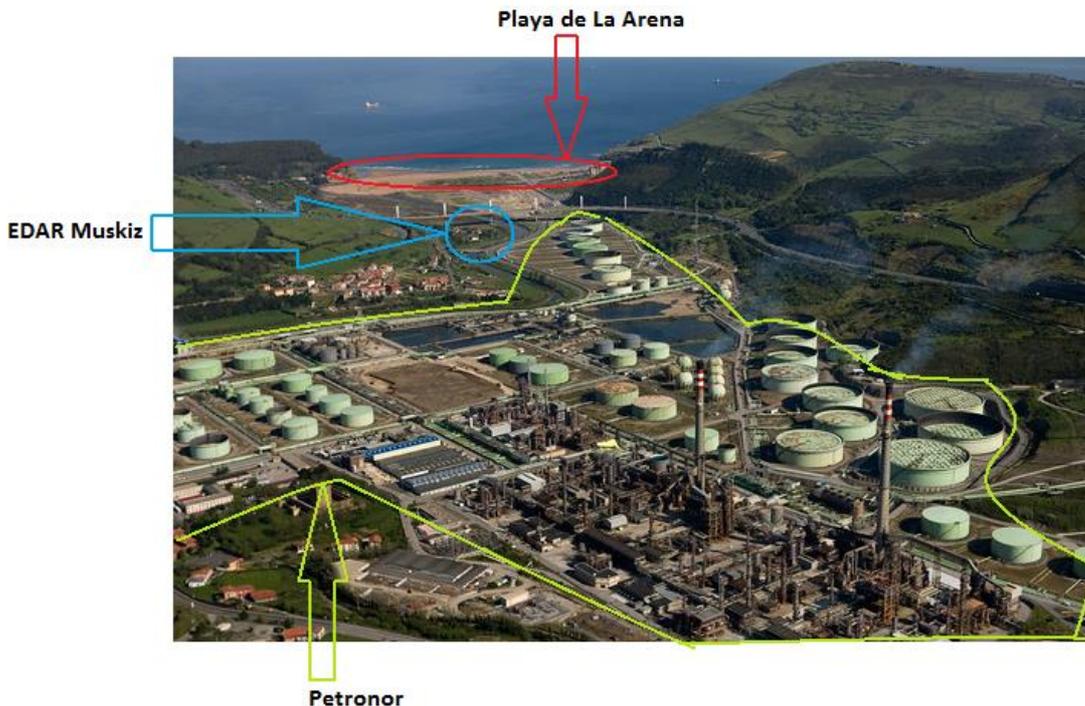


Figura 2: Vista en perspectiva del Valle. Detalle de EDAR, Petronor y playa de La Arena. [4]

Muskiz, aunque ligado a la naturaleza mineral de su entorno conocida desde el siglo I, vivió principalmente de la explotación agrícola y ganadera hasta la segunda mitad del siglo XVI.

Fue entonces cuando la aparición de nuevos sistemas que aprovechaban la fuerza hidráulica animó a los vecinos del municipio a comerciar con el hierro de sus tierras. La cercanía y cantidad de mineral, la comunicación por vía férrea y la fácil salida al mar hacían de esta localidad un enclave muy atractivo para trabajadores y burócratas. Esto pronto se tradujo en un incremento poblacional y de la reputación de la zona.

Esta inmigración se vio intensificada tras superar el bache económico y social que supusieron las Guerras Carlistas. Ya que tras este conflicto bélico y debido a la abolición foral, se permitía la extracción y exportación del hierro en bruto. Este hecho despertó el interés y atrajo capital tanto autóctono como extranjero a Bilbao y alrededores, para la explotación del hierro de la zona minera. Este boom siderúrgico se mantuvo durante muchas décadas hasta que a inicios del último tercio del siglo XX la reconversión industrial dio pie a un declive del negocio local empujando al Gran Bilbao a una modernización en todos los ámbitos. Con la adaptación que, en consecuencia, todo esto suponía.

Actualmente, y como toda la comarca del Gran Bilbao desde la citada conversión de las últimas cinco o seis décadas, Muskiz se dedica principalmente al sector servicios. Aun así uno de los acontecimientos de mayor transcendencia para la zona, tanto a nivel económico como por lo tanto a nivel social e histórico, fue la constitución de Petróleos del Norte en el 1968. Poco tiempo después la compañía ponía en marcha la refinería de mayor capacidad de toda la Península Ibérica y una de las más importantes a nivel europeo. Esto, unido a la mejora de comunicación que supuso la construcción del Superpuerto de Bilbao abrió una nueva industria, la del petróleo, a esta localidad. Tanto es así, que a día de hoy solo la citada refinería crea de forma directa o indirecta más de 6000 puestos de trabajo en la zona. [5-8]

En el proceso de refino, Petronor necesita grandes caudales de agua y sería interesante poder plantear una idea para reducir el elevado consumo de agua de red de la misma. Para ello se ha pensado en el concepto de reutilización. [9]

Esta concepción no es nueva, ya en el año 1958 el Consejo Económico y Social de las Naciones Unidas, impulsó la idea de llevar a cabo una política para evitar la utilización del agua de mayor calidad en usos que podían verse satisfechos con calidades más bajas.

El desarrollo de este concepto es el que da sentido y conduce a la técnica actual de reutilización y reuso de las aguas.

Además motivos como por ejemplo, el aumento de la población, la sequía producto del cambio climático, el deterioro de las aguas superficiales y subterráneas o la desigual distribución de los recursos hídricos, han refrendado el pensamiento de que devolver al ciclo natural el agua habiéndole dado un único uso es un verdadero lujo.

Debido a todo esto, el aprovechamiento de las aguas residuales tratadas antes de ser vertidas, está recibiendo cada vez más atención y aceptación y hoy en día ya se considera una fuente fiable de nuevos recursos. Estos, al ser independientes de sequías, permiten amortiguar la escasez a la vez que se reduce el vertido de sustancias contaminantes al medio ambiente. De forma que se acometen dos de los principales problemas que giran en torno a este bien.

Por tanto, y para poder reutilizar este agua residual tratada, que en un principio se vertería tras su depuración, se redirige y somete a la misma a un tratamiento de afino para adaptar su calidad a la de la aplicación final que se le vaya a dar.

El tipo de procesos que se apliquen al agua dependerán de los requerimientos de calidad del uso final que esta tenga tras ser regenerada.

Actualmente esta técnica se utiliza para satisfacer muy diversas aplicaciones, tales como, urbanas, comerciales, industriales y, por supuesto, agrícolas. El riego de parques, campos o medianas de las vías públicas, el agua de procesos de refrigeración en la industria, el de limpieza y mantenimiento, el de extinción de incendios, el volumen requerido para higiene de servicios sanitarios, el utilizado en la construcción y/o sus materiales, el agua empleada en aplicaciones recreativas o medioambientales, como la recarga de acuíferos, son solo algunos de los ejemplos que no requieren estándares de calidad tan altos como los del agua potable.

Son cada vez más los países que han incorporado esta idea a sus políticas hídricas. Cabe destacar los ejemplos de Estados Unidos, Japón o Israel, que por las dificultades históricas que han tenido para adaptar los recursos a la demanda, son claros ejemplos de vanguardia en el aprovechamiento del agua regenerada.

Poco a poco se ha logrado superar la reticencia que la población, que en definitiva sería directa o indirectamente el usuario final, presentaba por temor a que su salud o la del medio natural se viesan afectadas al cubrir según que usos con aguas reutilizadas.

En gran medida esto se ha debido a la puesta en público de información y de explicaciones por parte de los organismos que están detrás de este asunto y a los fructíferos ejemplos de países pioneros como los citados anteriormente. Algunos de estos casos se remontan a fechas anteriores a la propuesta por parte de las Naciones Unidas del desarrollo de esta idea.

En Grand Canyon Village, Arizona (Estados Unidos), en la segunda década del siglo XX se instaló el primer sistema para reutilización de aguas en usos urbanos. Esto se ha extendido hasta hoy en día, y son muchos los ejemplos de ciudades que cubren incluso el 35% de los volúmenes necesarios para el abastecimiento de la ciudad con agua regenerada.

También en USA, concretamente en la ciudad de Baltimore (Maryland), en el 1942 se comenzó a suministrar, tras ser clorado previamente, el efluente secundario de una depuradora de aguas,  $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$ , a una planta de fabricación de acero situada a 7.2 km. Lo que supone el empleo de este recurso para reusos industriales.

Otro ejemplo claramente ilustrativo es el de Israel, donde por motivos obvios el agua regenerada constituye un recurso vital. De hecho, de los 420 millones de  $\text{m}^3$  previstos para consumo en el año 2010 el 10% eran de este tipo. Y, además, un tercio del total destinado al sector agrícola.

En la provincia de Alicante esta técnica también es por todos conocida, ya que la escasez prolongada debida a la sequía ha obligado al desarrollo a nivel regional del Plan Director de Saneamiento y Depuración. Con esto se ha estimulado la reutilización sobre todo para cubrir el uso de riego agrícola.  
[10,11]

## 2 Justificación del trabajo

En primer lugar y como se explicaba en el apartado primero, Muskiz es atravesado por el río Barbadún que desembocando en la playa de La Arena forma en su delta un enclave paisajístico dunar sin igual, protegido desde el año 2003.

Esto se traduce en que sobre todo en época estival el atractivo del lugar per se, sumado a factores como la calidad de las olas y la oferta de servicios de la playa, el buen ambiente que se respira o la accesibilidad que posee, hagan de Muskiz y especialmente de La Arena un lugar de visita habitual de los habitantes del Gran Bilbao y del turismo que este acoge en los meses de verano.

Un kilómetro y 300 metros aguas arriba de la bocana de este estuario, lleva en funcionamiento desde el año 1988 una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) que trata las aguas negras de 12.000 habitantes equivalentes, originadas en los distintos barrios del municipio, a excepción de Cobarón que cuenta con su propia estación depuradora. [12-14]

Actualmente, el efluente que sale de estas instalaciones se vierte directamente sobre el cauce del Barbadún. Teniendo en cuenta que las inversiones para actualizar o modificar los equipos de esta depuradora han sido muy pocas, y que por tanto la planta presenta cierta obsolescencia a pesar de que cumplan con la normativa actual de vertido, los parámetros de calidad de las aguas volcadas al medio natural a través del río no son todo lo buenos que deberían. De hecho, hay referencias en la hemeroteca de periodos en los que tras la toma de datos por parte del Departamento de Salud en diferentes puntos de la zona, no se cumplen con las exigencias mínimas recogidas en el RD 1341/2007 de gestión de la calidad de las aguas de baño. Considerando que, como ya se ha mencionado, en época estival esta playa se encuentra a rebosar de gente, no procede que en el apartado microbiológico las aguas sean insuficientes para el baño en cuanto a los estándares que presentan. Ya que el hecho de prohibir la entrada al agua con bandera roja puede no ser suficiente para evitar que la gente se exponga a dicho peligro. [15]



Figura 3: Vistas de la playa de La Arena abarrotada de gente. [16,17]

Además de por esto, la proximidad de la refinería de Petronor también ha jugado un papel fundamental a la hora de decidir por qué derroteros enfocar el proyecto.

Este complejo industrial consume  $6.885.529 \text{ m}^3$  de agua bruta anualmente, según los datos del último ejercicio. Sobre este total de 2017, el 53% se emplea en funciones de refrigeración, el 30% como vapor para las turbinas y demás procesos, un 15% correspondería al agua de planta utilizada para limpieza o red de extinción de incendios y finalmente solo un 2% al volumen potable.

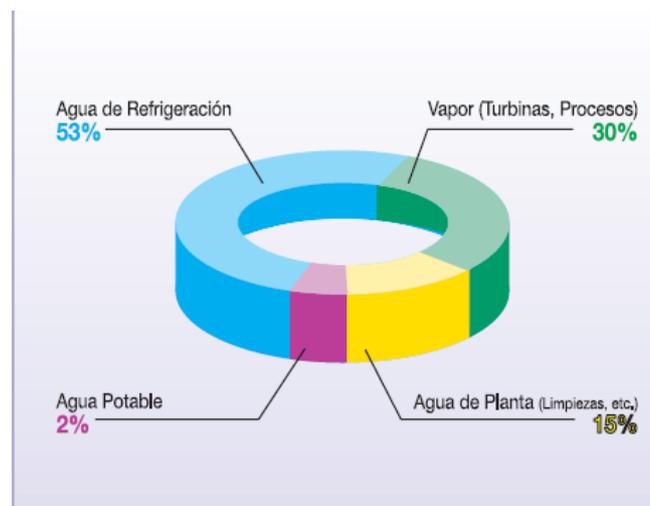


Figura 4: Distribución consumo de agua Petronor.[9]

Conscientes de las altísimas cifras que manejan, internamente se utilizan procesos de recuperación de agua (30% del total) como, las canalizaciones que conducen hasta balsas de derrame el agua de lluvia o las técnicas de recirculación de caudales de aquellos volúmenes que tienen como origen usos poco destructivos y como destino aquellos menos exigentes en cuanto a calidad de agua.

A pesar de estas medidas, el préstamo que la refinería requiere de la red de suministro de agua potable es verdaderamente grande, el 70% del total de recursos hídricos. Esto implica que se esté realizando un consumo brutal de agua de altísima calidad, cuando solo una ínfima parte de los volúmenes requeridos presentan la necesidad de tener parámetros tan buenos. [9]

Con el añadido a la EDAR de Muskiz de un proceso de regeneración de aguas se atacarían los dos principales problemas que se han comentado, cumpliendo así con el sentido básico de la técnica de reutilización. Por un lado se minimizaría el vertido de partículas contaminantes a la desembocadura de la ría Barbadún, con la correspondiente mejora en la seguridad para el baño de los muchos usuarios de la playa y en la protección de la fauna y la flora de la zona. Y por otro lado se reduciría el consumo de agua de red que hoy por hoy presenta la refinería de Petróleos del Norte. Con el impacto económico que para ellos esto supone actualmente, ya que invierten mucho dinero en ello, y sobre todo la aficción medioambiental por la contribución al agotamiento y escasez del propio recurso.

Otro factor a favor de hacer pasar el agua por Petronor en lugar de verterla al cauce del río es, que como industria con concesión de vertido, disponen de una EDARI (Estación Depuradora de Aguas Residuales Industriales) propia en sus instalaciones. Añadiendo a esta concesión una autorización de reutilización por parte del Organismo de Cuenca se asegura que el agua depurada se vierta a través del emisario submarino que la refinería posee a “El Abra Exterior” favoreciendo de esta manera la dilución del vertido y la menor aficción al entorno costero. [9,18]

### 3 Objeto del proyecto

Este proyecto tiene por objeto realizar una ampliación en la actual EDAR de Muskiz, que permita regenerar el efluente depurado para su posterior reutilización, principalmente, en el uso industrial de refrigeración de la refinería de Petronor.

Esta ampliación se materializará con el añadido de una serie de instalaciones que permitan realizar: un tratamiento extra de esterilización y adecuación de las aguas, una postdesinfección y el almacenamiento de un volumen considerable.

Así mismo, en el presente proyecto se detallan las bases técnicas para la dirección y la realización de las obras, por lo que ha de servir como documento administrativo para su presentación ante los organismos competentes para su posterior ejecución.

## 4 Situación y emplazamiento

Las instalaciones a llevar a cabo se van a ubicar en la actual EDAR localizada en el barrio de San Julián perteneciente al municipio de Muskiz. Las coordenadas de dicho lugar son las siguientes: 43°20'19.8"N 3°06'48.1"W. [12]

Esta se encuentra en una explanada a escasos 150 metros de las instalaciones de Petronor, de hecho, solo las separa el ya citado río Barbadún y una pequeña carretera calificada como de interés local BI-3794 con un bidegorri adosado a la misma. [14,19]

A su vez este solar que alberga a la depuradora está prácticamente debajo de la obra de paso que la A-8 tiene a la altura de Somorrostro. [14]

Para visualizar todo esto de forma más clara se ilustra con un par de figuras que muestran una perspectiva en alzado y una vista en planta de la zona objeto de proyecto, incluyendo además en otro enfoque cenital los usos del suelo. En ellas se pueden apreciar todos los elementos aludidos, puente, instalaciones de la refinería, la actual depuradora de aguas y la carretera con el bidegorri.



Figura 5: Alzado de la zona objeto de proyecto. [20]

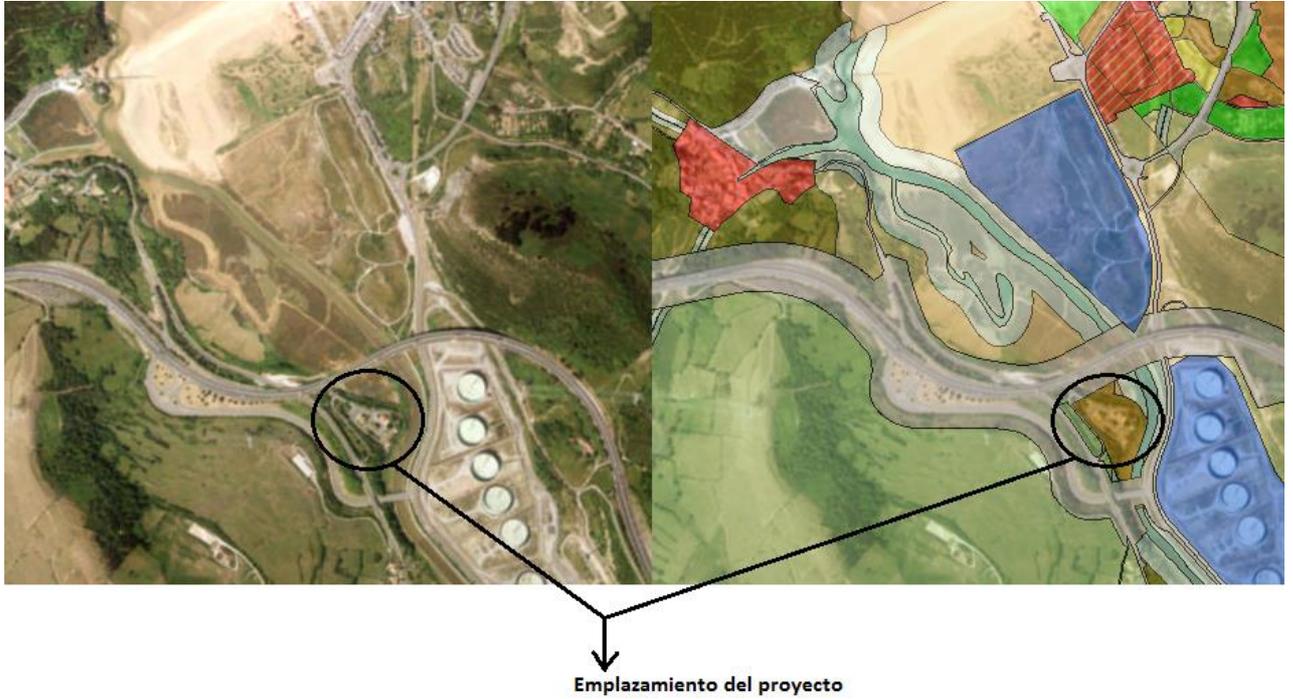


Figura 6: Planta de la zona objeto de proyecto. [14]



Figura 7: Definición por colores y categorías de los usos del suelo. [14]

Como se aprecia en los usos del suelo, la EDAR de Muskiz y todas las instalaciones que materialicen su ampliación se situarán dentro de terrenos destinados a infraestructuras básicas.

En la Figura 6, la planta presentada a la izquierda muestra la magnitud del delta y lo especial del paisaje dunar conectado con la playa de La Arena.

Este, como se demostrará a continuación con la representación de las curvas de nivel y como puede, a priori, observarse en la Figura 5, no presenta grandes pendientes ya que se encuentra en una vaguada.



Figura 8: Vista del emplazamiento con la cartografía de la zona. [21]

## 5 Selección de alternativas

Para llevar a cabo la reutilización de aguas planteada, antes se debe concretar el tipo de reuso industrial final y las características que este exige. Para, posteriormente, comparándolas con las del agua depurada en la actual EDAR de Muskiz, decidir los tratamientos de adecuación necesarios. Las características del agua de la EDAR serían las siguientes:

EDAR Muskiz: parámetros	SST mg/l	DQO TOTAL mg O <sub>2</sub> /l	DBO <sub>5</sub> mg O <sub>2</sub> /l	N-NH <sub>3</sub> mg N/l	P-PO <sub>4</sub> mg P/l
Entrada	268	472	167	24	7
Salida	12	40	4	2,3	1,3
Exigencias normativa vertido:	35	125	25	15	2

Figura 9: Parámetros de calidad de entrada/salida de las aguas en la depuradora de Muskiz comparados con los que dicta la normativa de vertido. [22,23]

Teniendo en cuenta lo anterior y la variedad de actividades de la refinería que requieren el recurso agua, se ha decidido hacer un estudio sobre los posibles usos y el tratamiento necesario para acondicionar el efluente depurado a los mismos.

USO DEL AGUA PREVISTO	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)				
	NEMATODOS INTESTINALES	ESCHERICHIA COLI	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	TURBIDEZ	OTROS CRITERIOS
<b>3.- USOS INDUSTRIALES</b>					
CALIDAD 3.1 <sup>1</sup>					
a) Aguas de proceso y limpieza excepto en la industria alimentaria. b) Otros usos industriales.	No se fija límite	10.000 UFC/100 mL	35 mg/L	15 UNT	OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs. <i>Legionella spp.</i> : 100 UFC/L
c) Aguas de proceso y limpieza para uso en la industria alimentaria	1 huevo/10 L	Teniendo en cuenta un plan de muestreo a 3 clases <sup>2</sup> con los siguientes valores: n = 10 m = 1.000 UFC/100 mL M = 10.000 UFC/100 mL c = 3	35 mg/L	No se fija límite	OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs. <i>Legionella spp.</i> : 100 UFC/L Es obligatorio llevar a cabo detección de patógenos Presencia/Ausencia ( <i>Salmonella</i> , etc.) cuando se repita habitualmente que c=3 para M=10.000
CALIDAD 3.2					
a) Torres de refrigeración y condensadores evaporativos.	1 huevo/10 L	Ausencia UFC/100 mL	5 mg/L	1 UNT	<i>Legionella spp.</i> : Ausencia UFC/L Para su autorización se requerirá: - La aprobación, por la autoridad sanitaria, del Programa específico de control de las instalaciones contemplado en el Real Decreto 865/2003, de 4 de julio, por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la legionelosis. - Uso exclusivamente industrial y en localizaciones que no estén ubicadas en zonas urbanas ni cerca de lugares con actividad pública o comercial.

<sup>1</sup> Cuando exista un uso con posibilidad de aerosolización del agua, es imprescindible seguir las condiciones de uso que señale, para cada caso, la autoridad sanitaria, sin las cuales, esos usos no serán autorizados

<sup>2</sup> Siendo n: n° de unidades de la muestra; m: valor límite admisible para el recuento de bacterias; M: valor máximo permitido para el recuento de bacterias; c: número máximo de unidades de muestra cuyo número de bacterias se sitúa entre m y M.

Figura 10: Criterios de calidad para reutilización de las aguas según sus usos. [24]

Considerando, como ya se ha visto, que el 53% del volumen de agua que necesita Petronor se utiliza en funciones de refrigeración y que las exigencias para este uso son más restrictivas que para el resto de los industriales, se afinará la calidad del agua depurada hasta la necesaria para alcanzar los estándares del apartado 3.2 de la figura anterior.

De esta forma en caso de que, por momentos, haya un excedente o sea necesario derivar parte del volumen a otras tareas, este se podrá utilizar sin problema para la satisfacción complementaria de actividades como puedan ser la limpieza o la extinción de incendios.

Además de los parámetros de calidad se verá más adelante como el Real Decreto 1620/2007, con la intención de asegurar los estándares requeridos en todo momento, define:

Por un lado en el Anexo IB la frecuencia mínima de muestreo, con las excepciones y supuestos de modificación de dichos intervalos de comprobación.

Y por otro lado en el Anexo IC los criterios de conformidad y aceptación de las muestras tomadas, las medidas de control frente a incumplimientos y, además, los métodos o técnicas propuestos para el muestreo de cada parámetro tanto físico como biológico del agua a controlar.

Por lo tanto, el estudio de alternativas sujeto a este proyecto se centrará en las diversas variantes existentes para materializar el tratamiento de afino del efluente depurado que actualmente sale de la EDAR de Muskiz, cuyas características recoge la figura 9, adaptándolo a la calidad exigida por el RD de reutilización para el uso industrial de refrigeración, condiciones en figura 10.

Esto significa que, atendiendo a los Valores Máximos Admisibles (VMA), habrá que garantizar en el agua regenerada lo siguiente:

- Nemátodos intestinales: 1 huevo/ 10L. Un huevo por cada 10 litros de muestra
- Escherichia Coli: Ausencia UFC/ 100mL. Ningún rastro de unidades formadoras de colonias por cada 100 mililitros de muestra. Siendo las UFC´s unidades de medida para la cuantificación de microorganismos, en este caso de la bacteria E.Coli.
- Sólidos en suspensión: 5mg/ L. 5 mg por cada litro
- Turbidez: 1 UNT. Una unidad nefelométrica de turbidez. Siendo las UNT unidades de medida de la turbidez en líquidos.

De igual manera se asegurará el cumplimiento del RD 865/2003 para la prevención y el control de la legionelosis. De hecho, los resultados del muestreo deberán concluir que hay ausencia total de unidades formadoras de colonias por cada litro de agua analizada en lo que a Legionella spp se refiere.

Además este último Decreto solamente permitirá este tipo de reutilización industrial en aquellas localizaciones que no estén ubicadas en zonas urbanas ni cerca de lugares con actividad pública o comercial.

Por encontrarse, como se ha visto, el emplazamiento de la EDAR de Muskiz sobre terrenos pertenecientes a sistemas generales, más concretamente de infraestructuras básicas, se cumplirá con esta condición.

Para llevar a efecto el tratamiento requerido y cumplir con las características listadas que exige la norma existen diversos métodos basados en diferentes principios. Tras consultar diferente bibliografía se ha hecho especial hincapié en tres técnicas diferentes a considerar de forma combinada o independiente, por ajustarse de manera bastante exacta a las pretensiones u objetivos de afino necesarios. A continuación se citan y después se explicarán de forma más o menos somera:

**A. Desinfección:**

Cloración
Ozonización
Radiación ultravioleta (UV)
Ácido peracético (APA)
Ácido Peracético más Radiación ultravioleta (APA + UV)

Figura 11: Tabla resumen de los diferentes procesos de desinfección. [Elaboración propia]

**B. Oxidación avanzada: Se dividen en varios tipos:**

Homogéneos	
Con aporte de energía	Sin aporte de energía
a) Energía procedente de radiación UV:	a) Ozonización en medio alcalino (O <sub>3</sub> /OH <sup>-</sup> )
Ozonización y radiación UV (O <sub>3</sub> /UV)	b) Ozonización con peróxido de hidrógeno (O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> y O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /OH <sup>-</sup> )
Peróxido de hidrógeno y radiación UV (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /UV)	c) Peróxido de hidrógeno y catalizador (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> / Fe <sup>2+</sup> )
Ozono, peróxido de hidrógeno y radiación UV (O <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /UV)	
Foto- Fenton (Fe <sup>2+</sup> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /UV)	
b) Energía procente de ultrasonidos US	
Ozonización y ultrasonidos (O <sub>3</sub> /US)	
Peróxido de hidrógeno y ultrasonidos (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /US)	
c) Electroquímica:	
Oxidación electroquímica	
Oxidación anódica	
Electro-Fenton	
Heterogéneos	
a) Ozonización catalítica (O <sub>3</sub> /Cat.)	
b) Ozonización fotocatalítica (O <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub> /UV)	
c) Fotocatálisis heterogénea (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub> /UV)	

Figura 12: Tabla resumen de los diferentes procesos de oxidación avanzada. [Elaboración propia]

**C. Membranas:**

Ósmosis inversa
Nanofiltración
Ultrafiltración
Microfiltración

Figura 13: Tabla resumen de los diferentes procesos de membrana. [Elaboración propia]

**A.** En cuanto a los métodos de desinfección se podría comenzar diciendo que hay que tener en cuenta que solo eliminarían microorganismos, mejorando únicamente ciertas propiedades biológicas del agua. Sin embargo no corregirían aquellas físicas que también hay que afinar, como por ejemplo la cantidad de sólidos en suspensión. Por lo que se necesitarían tratamientos complementarios. Entre las técnicas de desinfección se van a destacar:

- La cloración:

Es el método más común y aquel que utiliza el cloro como desinfectante. Este elemento químico juega un papel fundamental a la hora de evitar infecciones. Suele aparecer en diferentes formas, ya que se utilizan numerosos derivados clorados para llevar a cabo estas desinfecciones. Ejemplos de esto son, el cloro gas, dióxido de cloro, ácido hipocloroso, hipoclorito de sodio etc. Todas estas sustancias actúan como oxidantes, destruyendo la célula contaminante tras provocar la rotura de la pared celular.

Para asegurar una correcta desinfección mediante cloro, hay que considerar y controlar una serie de variables que dependen del agua a tratar, en este caso el efluente depurado de la EDAR de Muskiz, como el tipo de microorganismo a eliminar, el pH, la temperatura, la turbidez, la cantidad de compuestos nitrogenados, el hierro presente en el agua...

Atendiendo a todos estos condicionantes el lavado por medio de cloro presentará diferente resultado y/o exigirá diversas concentraciones, porque la capacidad de oxidación de las sustancias a eliminar será distinta.

Normalmente, y debido al poder de inactivación de microorganismos que tiene, elimina buena parte de los contaminantes biológicos de forma correcta, aunque hay determinados organismos que presentan cierta resistencia como los Ooquistes o las Pseudomonas. Asimismo, en presencia de cantidades notables de sólidos en suspensión o de un grado de turbidez importante puede perder capacidad de descontaminación y se requeriría mayor concentración de cloro.  
[25]

Ofrece una ventaja fundamental, y es que dosificando adecuadamente permite cubrir con la parte residual del desinfectante que quede en el agua, posibles activaciones de quistes y virus que puedan darse en el recurso regenerado desde la salida del tratamiento hasta la reutilización final del mismo.

De esta forma se garantizará que la calidad del agua se mantendrá hasta el final según los parámetros de salida del tratamiento de afino, amortiguando posibles ataques de microorganismos que se den en las etapas de almacenamiento y abastecimiento.

La presencia de nitritos y ausencia de amonio (en definitiva los procesos de nitrificación) pueden afectar a la eficacia de la cloración.

Por tanto, cuando las calidades a alcanzar son importantes, este sistema exige tratamientos complementarios que aseguren unas condiciones adecuadas del agua a clorar, para así, mejorar la eficacia que alcance la desinfección en sí misma. Ejemplo de esto son los habituales procesos de filtración que eliminan turbidez y sólidos en suspensión.

No obstante, y sin lugar a dudas, el principal inconveniente de la técnica de cloración es la generación de subproductos tóxicos de determinadas formas del cloro. Muchos de estos han sido identificados como potencialmente cancerígenos al contacto humano incluso en muy bajas concentraciones, entre ellos los trihalometanos, los ácidos haloacéticos o los halógenos orgánicos disueltos.

También se tendrán que considerar los riesgos asociados al almacenamiento y transporte de cloro, ya que provoca irritación en mucosas y piel o graves afecciones respiratorias.

Por lo que, en definitiva, exigirá unas condiciones de operación delicadas que se habrán de cumplir de forma escrupulosa según lo que dicta la instrucción técnica complementaria y la normativa que respecta al cloro. [26,27]



Figura 14: Izq: Perspectiva de cámara de cloración. Dcha: Detalle del tanque de cloración. [28]

- La ozonización:

Surgió como alternativa al primer método recién comentado, tras descubrir trihalometanos en aguas que habían sido cloradas. El objetivo era evitar la formación de estos subproductos nocivos.

Se propuso sustituir el oxidante anterior por otro, el ozono. Sus aplicaciones iniciales fueron exclusivamente para potabilización de aguas pero poco a poco se ha ido incorporando a los procesos de desinfección en tratamientos secundarios o, posterior y principalmente, terciarios.

Unas de las razones que retrasó la consolidación de este método fue la corta vida de esta especie química tanto en estado gaseoso como en disolución acuosa, lo cual impide su almacenamiento y obliga a generarlo in situ. Los principales sistemas de generación son: Electrolisis, generación fotoquímica, generación radioquímica y descarga eléctrica de alto voltaje.

El poder oxidante del ozono es bastante grande lo que se traduce en mayor poder desinfectante y menor cantidad de concentración necesaria en comparación con los productos basados en cloro. Esto le permite eliminar multitud de compuestos, destacando en la eliminación de coliformes. Dato que resulta interesante debido a la necesidad de reducir casi a cero la presencia del coliforme Escherichia Coli para el reuso de refrigeración en Petronor. [29]

En contraste con lo anterior, este método tiene algunos inconvenientes.

En presencia de cantidades importantes de materia orgánica, propio de las aguas residuales o de escasa/justa depuración, disminuye de forma notoria la eficacia del proceso de ahí que actualmente se use más en tratamientos de afino de aguas que han sido previamente depuradas. La existencia de sólidos en suspensión también dificulta el tratamiento. Todo esto se traduce en incrementos de gasto energético por aumentar la concentración de oxidante, y por ende se elevan los costes del proceso propiamente dicho.

Estos costes, aun en el mejor de los supuestos, tienden a ser muy elevados. Ya que no solo la producción del ozono a dosificar es cara, sino que también el propio equipo de generación. Puesto que se use el sistema que se use, exigirá una inversión inicial importante y que generalmente solo procede en depuradoras de gran tamaño.

Como en el caso del cloro, la utilización de ozono no está libre de generar subproductos. Y aunque sean menos nocivos, algunos de ellos siguen suponiendo un peligro por toxicidad a quienes entren en contacto con los mismos. Ejemplo de estos son los bromatos, aldehídos, cetonas o peróxidos. [27]

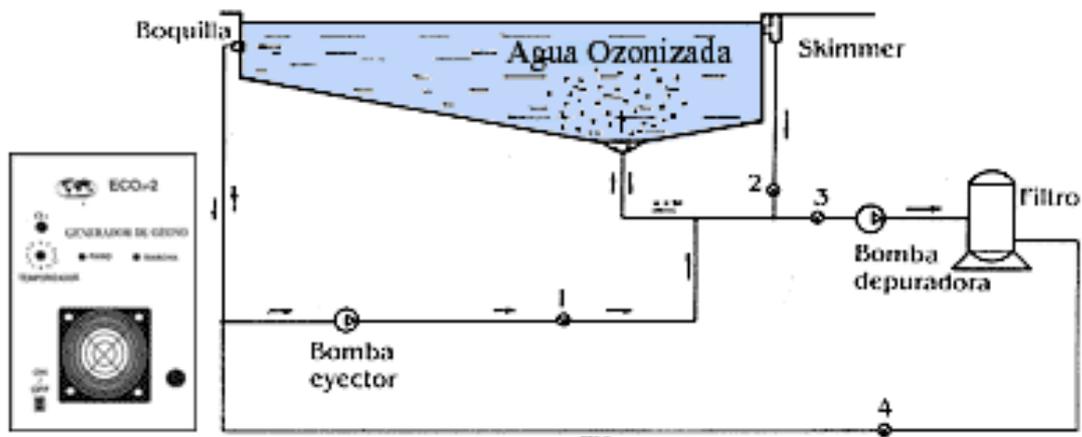


Figura 15: Resumen esquematizado del funcionamiento del proceso de ozonización. [30]

- La Ultravioleta (UV):

Es uno de los métodos de desinfección en aguas residuales más prácticos, debido a que es capaz de inactivar con eficacia multitud de microorganismos. Su efecto germicida es muy alto, eliminando con solvencia la mayoría de bacterias, virus, esporas y quistes de protozoos.

Normalmente se aplica en aguas industriales y para la desinfección de agua residual tratada. La razón de que se suele aplicar a aguas que ya han sido depuradas es sencilla, su efectividad aumenta exponencialmente cuando la presencia de sólidos en suspensión disminuye debido a que de esta manera la tramitancia de la UV aumenta, por lo que generalmente se usa en la fase de esterilización de los tratamientos terciarios. [31]

El principio de la eliminación reside en la energía asociada al binomio frecuencia-longitud de onda de la luz UV. Esto es capaz de producir daños fotoquímicos en los ácidos nucleicos de los microorganismos. Por lo que, tal y como se comentaba, la efectividad de este método pasa por garantizar en primer lugar una correcta irradiación con una adecuada penetración de los haces de luz en el agua a tratar. Y en segundo, una buena elección de la lámpara a utilizar para trabajar con longitudes de onda que presenten buena adsorción por parte de los contaminantes a eliminar.

Además de lograr, como ya se ha dicho, una eficaz desactivación de la mayoría de organismos, la desinfección con UV al tratarse de un proceso puramente físico, no da lugar a subproductos químicos ni obliga a generar, manejar, transportar o almacenar especies peligrosas o corrosivas. Por lo que no deja efecto residual que pueda afectar a seres humanos o cualquier organismo que se ponga en contacto con estas aguas.

Técnicamente también presenta ciertas ventajas. Es de fácil gestión para los operadores, tiene un periodo de contacto menor que otros desinfectantes y el equipo requiere menos espacio que otros métodos.

Por el contrario, tiene varios puntos débiles.

De no asegurarse una correcta irradiación puede no desactivar algunos de los microorganismos.

Exige un intensivo programa de mantenimiento de la parte externa de los tubos de luz, para evitar la acumulación de sólidos en dicho lugar y garantizar una correcta dosificación UV.

La operación conlleva un alto consumo energético asociado a las lámparas que generan la luz. Este consumo energético se traduce en costes reseñables. [32]

Y finalmente, uno de los principales inconvenientes de la utilización de UV es la fotorreactivación. Mediante esta, los microorganismos son capaces de reparar los ácidos nucleicos dañados por la UV. Tras exhaustivos estudios se ha llegado a la conclusión de que la existencia de este fenómeno tan difícil de controlar puede depender de la temperatura del agua durante el proceso de radiación, ya que esta tiene efecto directo en la reacción bioquímica que sufren los contaminantes. [33]

Esta tecnología está siendo ampliamente utilizada en aguas residuales. Uno de los más claros ejemplos es el tratamiento terciario de la planta de Manukau, Nueva Zelanda con una capacidad de  $50.400 \text{ m}^3/h$ . [27]



Figura 16: Tratamiento terciario de agua residual con radiación UV. [34]

- **Ácido peracético (APA):**

Es otro de los métodos que se ha propuesto, tras mucho estudio, como alternativa a la cloración.

Es un oxidante químico con buenas propiedades desinfectantes debido a la serie de reacciones que tienen lugar durante su descomposición, y que conducen a la formación final de ácido acético, oxígeno y peróxido de hidrógeno.

Al someter al agua residual urbana a un tratamiento de desinfección con APA, se puede observar según diversos estudios que los microorganismos heterotróficos muestran más resistencia que parámetros como los Coliformes totales, la E. Coli o los Enterococcus. La máxima inactividad se presenta en el caso de la Escherichia Coli donde una buena parte se elimina instantáneamente. Sin embargo, la mínima afección la presentan los valores físicos-químicos del agua, ya que la desinfección o adecuación de estos es inapreciable. [35]

La eficacia del tratamiento depende de factores como la dosis utilizada y los tiempos de contacto planteados. A medida que se aumentan estos dos factores, también lo hará la eficiencia del tratamiento, hasta alcanzar un máximo a partir del cual no se logrará mejorar la calidad del efluente depurado. Ese máximo depende del contaminante a eliminar, por lo que lo idóneo sería realizar un estudio previo y aplicar al agua una dosis y tiempo de contacto que presente resultados aceptables para todos los parámetros.

En general, presenta resultados algo inferiores a los del cloro, en cuanto a reducción de parámetros microbiológicos. Además, para cumplir la normativa vigente en cuanto a aguas depuradas, a veces se requieren dosis altas que se hacen económicamente inviables. Una de las medidas alternativas al incremento en la dosificación es la colocación de un agitador en la entrada del tratamiento. Esto aumenta la velocidad de reacción del APA, que originalmente es baja, y mejora ciertos parámetros pero no todos.

Como en otros casos, la presencia de sólidos en suspensión es inversamente proporcional a la disminución de los indicadores bacteriológicos. De hecho, a veces se realizan filtraciones previas al propio tratamiento para asegurar la reducción de este parámetro lo máximo posible.

Cuando la calidad del agua tratada sea insuficiente, se puede plantear un tratamiento combinado de APA más radiación UV.

Como se comentará a continuación, las mejoras obtenidas son evidentes. [27]



Figura 17: Agitación en tratamiento de afino de agua depurada con ácido peracético. [36]

- Ácido peracético y radiación ultravioleta (APA+UV)

En ocasiones se recurre a la aplicación de estos dos tratamientos de manera simultánea. Gracias a lo cual se aprovecha lo bueno de cada método logrando una mayor reducción de la actividad de los microorganismos presentes en el agua a tratar a menores dosis que las utilizadas separadamente en cada técnica.

Para llevar a cabo el tratamiento combinado, cuando se introduce el APA antes que la radiación se garantizan resultados significativamente mejores a los alcanzados al incorporar el ácido después de la radiación UV.

Además, está comprobado que el efecto del tratamiento simultáneo supera a la suma de efectos de ambas técnicas realizadas separadamente, confirmando la sinergia que existe entre los dos tratamientos. [27]

**B.** Cuando se trata de reducir el contenido de contaminantes más persistentes o de vertido más continuo, como fenoles, plaguicidas, disolventes, tintes, explosivos... muchas veces es necesario añadir, tras el tratamiento terciario, una etapa de aplicación de métodos de oxidación avanzada. Esta técnica se utiliza, sobre todo, en aquellas aguas de gran estabilidad química y baja biodegradabilidad, transformando a inocuos o degradables aquellos contaminantes que en principio no lo son. La presencia de este tipo de contaminantes en las aguas a tratar será baja. [37]

Los procesos de oxidación avanzada (POA) tienen, por tanto, la característica química de generar radicales  $\text{OH}^*$  muy reactivos que atacan a la mayoría de moléculas orgánicas, presentando una baja selectividad. [27,38]

De entre todos los recogidos en la tabla de la figura 12 se considerarán únicamente aquellos en cuyo proceso no intervenga ni ozono ni hierro.

El ozono se excluye porque, como ya se ha dicho, solo es económicamente viable en grandes depuradoras, por la inversión tan importante que supone. Por lo que la aplicación en pequeñas/medianas instalaciones, como es el caso de la EDAR de Muskiz, no tendría demasiado sentido.

En el caso del Fe se descartarán porque tras contrastar diferente bibliografía se ha concluido que el aporte de metales contraviene el posterior uso industrial de la refinería que se va a cubrir con el efluente regenerado, por favorecer los procesos de corrosión.

Además, por la complejidad y lo poco desarrollados que se encuentran los procesos heterogéneos, también se van a desestimar a la hora de buscar su posible aplicación en este proyecto. Ya que no se dispondría de información ni de precedentes suficientes como para garantizar el correcto funcionamiento de este tipo de técnicas aún en desarrollo.

Por lo tanto, se considerarán los siguientes POA, clasificándolos según su fuente aporte de energía:

a) Energía procedente de radiación ultravioleta:

Este tipo de procesos se suelen emplear para la degradación de compuestos que absorben en la zona del espectro de la luz ultravioleta.

Los costes de los tratamientos dependerán fundamentalmente de las propiedades de absorción de los contaminantes a eliminar.

De entre este tipo de técnicas POA se barajará la posibilidad de incorporar al tratamiento de regeneración en la EDAR de Muskiz, la siguiente:

- Peróxido de hidrógeno y luz ultravioleta ( $H_2O_2/UV$ )

Este proceso se lleva a cabo mediante la formación de radicales hidroxilo  $OH^*$  por fotólisis del  $H_2O_2$  y las consiguientes reacciones de propagación.

El fenómeno de la fotólisis no se verá afectado por el pH pero si por la absorbancia que presente el agua. Por tanto a mayor cantidad de sustancias disueltas peor funcionará esta técnica ya que estas competirán por la radiación con el peróxido de hidrógeno.

Un sistema sobre el que se emplee esta técnica, podrá mineralizar completamente cualquier compuesto orgánico hasta  $CO_2$  y agua. Pero en la mayoría de las aplicaciones reales, no es necesario un proceso tan drástico, debido a que todos los productos no representan un problema desde el punto de vista de su toxicidad y la mayoría se puede degradar fácilmente por métodos más sencillos y convencionales.

De hecho, y como se ha dicho en la presentación de estos métodos POA, se suelen aplicar después de tratamientos previos que ya eliminan, por ejemplo reteniéndolos en los fangos, buena parte de los contaminantes.

Esta fotoxidación es la mejor y más fácil alternativa a la resonancia magnética, método más complicado y costoso, para la eliminación de nematodos y las bacterias que estos albergan en su interior. Con eficacias del 97%. [39]

Otras, como la Legionella también se eliminan muy bien con esta técnica. [27]

#### b) Energía procedente de ultrasonidos (US):

En este caso, cuando la energía necesaria para el proceso de formación de los radicales de hidroxilo se obtiene a partir de ultrasonidos, se hace gracias a las condiciones de alta presión y temperatura que se alcanzan en el interior de las burbujas generadas por los US. Estas condiciones son tan extremas que son capaces de romper las moléculas del agua y dar lugar a los citados radicales.

- Peróxido de hidrógeno y ultrasonidos.

El peróxido de oxígeno se produce por sí solo al aplicar ultrasonidos sobre las disoluciones acuosas. Aun así, como esta creación espontánea es en muy pequeñas cantidades, es conveniente su adición para poder agilizar el proceso de oxidación de la sustancia a degradar.

Incluso bajo ciertas condiciones, como una concentración elevada de contaminantes o cuando la estabilidad química de los mismos es importante, se puede incluir radiación UV que actúe conjuntamente y favorezca la creación de radicales. Mejorando de un 18% a un 80% la eliminación de ciertas sustancias nocivas.

Por el contrario una pega importante de este tratamiento, teniendo en cuenta la cloración final a la que se somete actualmente al agua que pasa por Muskiz en su proceso de depuración, es que por mucho que se aumente la concentración o el tiempo de proceso no tiene ningún efecto al tratar de eliminar trihalometanos que puedan surgir como subproductos del cloro. Cosa que habrá que considerar en caso de respetar el proceso actual de cloración. [27,40]

#### c) Energía procedente de la electricidad:

Este tipo de procesos se basan en la utilización de energía eléctrica para romper los enlaces de las moléculas de los compuestos que se desean degradar.

Presentan una serie de mejoras como, la eficacia del proceso o la reducción del uso de reactivos ajenos.

Pero por otro lado hay que tener en cuenta el coste de la energía necesaria, que no es poco, y la necesidad de sustitución de los electrodos. [27]

#### - Oxidación electroquímica.

Proceso en el cual la descontaminación se produce a través de reacciones anódicas en las que el oxígeno se transfiere desde el agua a los productos a degradar.

Diferentes estudios llevados a cabo presentan la misma conclusión. Este tipo de oxidación permite alcanzar una eliminación casi completa del COT y de aproximadamente tres cuartas partes de la turbidez de la muestra. Aunque la eficiencia depende de la densidad de corriente eléctrica aplicada y de la naturaleza de los aniones contenidos en el agua.

También se ha observado que la presencia de productos clorados en el tratamiento favorece la eliminación de ciertos contaminantes. Por lo que en este caso la cloración actual a la que se somete al agua depurada tras el tratamiento biológico en la EDAR, vendría bien.

Presenta otras ventajas como la versatilidad, reducido tamaño y la capacidad de automatización del proceso. [38,41]

#### - Oxidación anódica.

En este caso los compuestos se degradan mediante los radicales hidroxilos que se generan únicamente en un ánodo a partir de la oxidación de moléculas de agua.

Este método presenta bajas eficacias aun añadiendo compuestos clorados.

#### - Electro-Fenton.

En este proceso se produce peróxido de hidrógeno electroquímicamente, por medio de una reducción catódica del oxígeno disuelto en un electrodo de carbono.

En general supone un coste muy elevado, y para convertir el medio acuoso en conductor y poder llevar a cabo la técnica citada es necesario añadir sales. Esto será contraproducente ya que en última instancia habrá que tratar de reducir la cantidad de sólidos para el reuso fijado.

Este método es interesante para la reducción de DQO de las aguas. La eficiencia de eliminación de este parámetro, en condiciones favorables de pH y corriente eléctrica, ronda el 90%.

También elimina bastante bien contaminantes que por su escasa presencia en las aguas a tratar en la depuradora de Muskiz interesarán menos, como tintes o fenoles. [27]

**C.** El elemento principal de estos procesos es la membrana. Dicho componente no es más que una película delgada que separa dos fases actuando como barrera selectiva al transporte de materia. Esta selección, y la clasificación de la membrana propiamente dicha, depende principalmente del tamaño del poro del filtro.

A continuación se muestra, primero una tabla con la clasificación de las membranas y las características de estas. Y después, dos gráficas de diferentes fuentes que sirven para aclarar el principio de retención en función del tipo de filtro elegido y el tamaño de poro asociado al mismo:

	Ósmosis inversa	Nanofiltración	Ultrafiltración	Microfiltración
Membranas	Asimétrica	Asimétrica	Asimétrica	Simétrica. Asimétrica
Grueso	150 mm	150 mm	150-250 mm	10-150 mm
Capa superficial	1 mm	1 mm	1 mm	1 mm
Tamaño de poro	0,002 mm	0,002 mm	0,05-0,2 mm	0,2-5 mm
Rechazos	HMWC LMWC Cloruro Sodio, glucosa Aminoácidos Proteínas	HMWC, mono, di y oligo-sacáridos, aniones polivalentes	Macromoléculas. Proteínas, polisacáridos y virus	Partículas barro, bacterias
Materiales de membrana	CA capa delgada	CA capa delgada	Cerámica, PSO, CA, PVDF, capa delgada	Cerámica, Pp, PSO, PVDF
Módulo de membrana	Tubular, enrollada en espiral y planas	Tubular, enrollada en espiral y planas	Tubular, enrollada en espiral, de fibra hueca y planas	Tubular, fibra hueca y planas
Presión	15-150 bars	5-35 bars	1-10 bars	2 bars

Figura 18: Clasificación y características de membranas. [27]

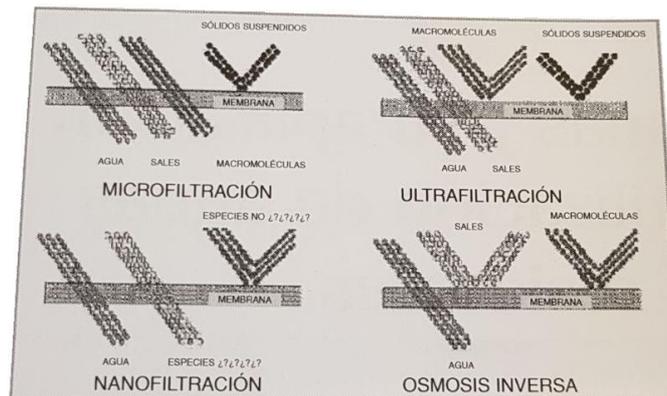


Figura 19: Principio y tipo de membranas. [27]

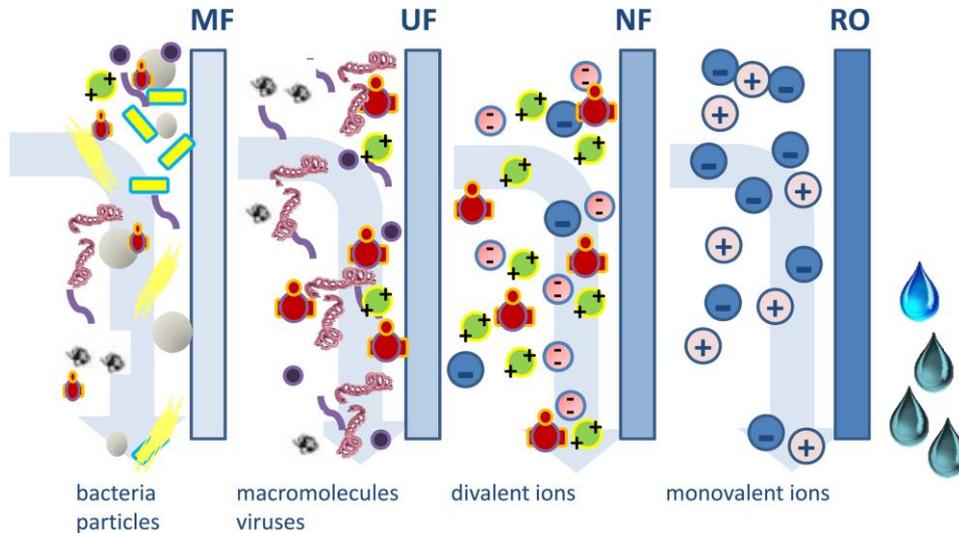


Figura 20: Principio y tipo de membranas. [42]

A la hora de elegir el tipo de membrana más conveniente hay que reparar sobre todo en el material, la disposición en la unidad de trabajo (módulo) y el tamaño de poro. Ya que esto influye mucho en el tipo de agua residual que se pueda tratar, en la eficacia y los ritmos del proceso y en la naturaleza de los contaminantes a eliminar.

Principalmente existen dos tipos de materiales que se suelen utilizar, poliméricos y cerámicos.

Las membranas compuestas por este último material suelen presentar mayores estabilidades físicas, químicas y térmicas que las poliméricas. Sin embargo son bastante frágiles, y pueden romperse de forma inesperada bajo la presión a la que se lleva a cabo el proceso.

Esto hace que la mayoría de las empresas que comercializan membranas, y por ende las estaciones de tratamiento de aguas, utilicen membranas poliméricas. Entre ellas, las más habituales son las derivadas de compuestos de celulosa, poliamidas, poliacrilonitrilo, polietileno o policarbonato.

En cuanto al módulo, las principales configuraciones existentes son los sistemas de membranas tubulares, los de fibra hueca, los de placa bastidor y los sistemas de membrana en espiral. Las características principales de cada una de estas son las siguientes:

- Sistemas de membranas tubulares

En este sistema la membrana está en el interior de un tubo. Los diámetros del mismo varían y se limpian fácilmente. El ensuciamiento es más lento que en otros tipos.

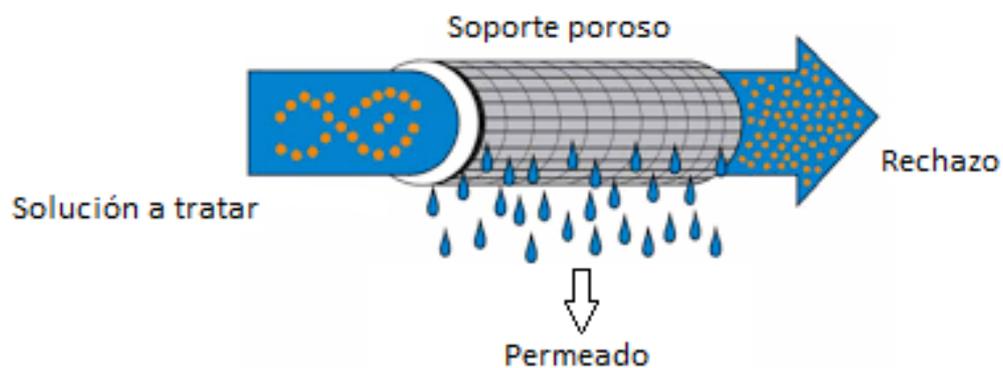


Figura 21: Esquema de circulación de flujo de membrana tubular. [43]

La ventaja principal es que los orificios permiten manejar partículas más grandes y procesa influentes con grandes concentraciones de sólidos.

El mayor inconveniente está asociado al costo del reemplazo de los tubos de membrana, aun así son menos costosos que otras técnicas basadas en módulos en espiral o en placa y bastidor.

- Sistemas de membrana de fibra hueca

Los elementos de filtración consisten en fibras con forma de mechones de fideos huecos por dentro. Estos mechones utilizan el principio de exclusión física reteniendo en los billones de poros que tienen, como si de un colador se tratase, las partículas sólidas, la turbidez y los patógenos al mismo tiempo.

Para compensar el ensuciamiento de las membranas se pueden lavar periódicamente con impulsiones de aire o agua filtrada que no dañe ni deje a su paso partículas en la pared de las fibras porosas.

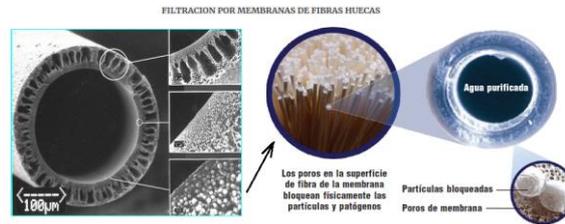


Figura 22: Sección transversal y funcionamiento de membranas de los sistemas de fibra hueca. [44]

- Sistemas de membrana de placa y bastidor

Las membranas se disponen en bastidores separados por placas, semejante a la disposición de los filtros-prensa.

El agua a tratar circula, impulsada por bombas, entre los espacios placa-membrana, concentrándose los contaminantes en las paredes de las membranas durante el proceso de filtrado.

El número de bastidores o módulos se ve limitado por el volumen de flujo que pueda manejarse en la entrada-salida del sistema y por la velocidad de filtración en la superficie de las membranas.

En este sistema, el proceso de ensuciamiento se trata mediante la introducción de energía mecánica en forma de vibraciones previniendo que las partículas queden adheridas a los poros.



Figura 23: Izq: Detalle del conjunto placa-membrana. Dcha: Funcionamiento del módulo. [45]

- Sistemas de membrana en espiral

Estos elementos consisten en dos o más capas de filtro, situadas alrededor de un polímero de textil de refuerzo llamado colector de permeado. Este elemento es el encargado de soportar las diferentes hojas de membrana ante las altas presiones de operación y, además, provee al sistema del canal de flujo por donde sale el agua clarificada.

Hay que garantizar un correcto sellado del colector para prevenir la contaminación del efluente limpio.

La diversidad de diseños que ofrece este método permite operar con gran variedad de materiales soportando grandes caídas de presión y temperaturas de hasta 70 °C.

Pero, existen dos grandes desventajas a destacar en estas membranas. La primera es que tanto las capas de filtro como su contenedor deben reemplazarse totalmente una vez se hayan contaminado, por lo que no hay manera de limpiarlos. Y la segunda, que tiene dificultad para tratar aguas viscosas o con gran cantidad de sólidos, debido a la poca luz de paso que tendrá el conjunto por estar las membranas enrolladas.

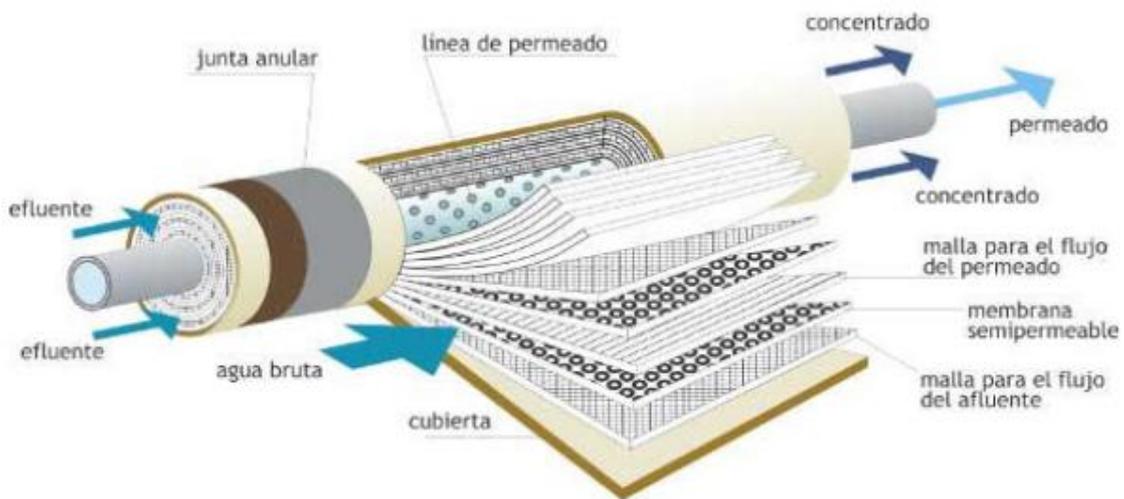


Figura 24: Sistema de membrana en espiral, funcionamiento. [46]

A continuación, y a modo de resumen y conclusión, se recogen las principales características comunes a los procesos de separación con membranas:

- Permiten la separación de contaminantes disueltos o dispersos en forma coloidal.
- Eliminan contaminantes que se encuentren a baja concentración.
- Las operaciones por norma general, y con más motivo en el caso de tratamiento de aguas residuales, se llevan a cabo a temperatura ambiente.
- Son procesos que se basan en principios sencillos y diseños compactos que ocupan poco espacio.
- Los contaminantes no se eliminan por degradación, sino que se concentran en otra fase gracias al filtrado.
- Puede darse el caso de incompatibilidad entre contaminante y membrana.
- Existen problemas de ensuciamiento de la membrana, para lo cual hay que realizar tareas de limpieza, mantenimiento y adecuación de las condiciones del proceso. Como por ejemplo ajustes del pH, para optimizar las precipitaciones, ciclos de parada para limpieza del equipo, sistemas de vibración y/o lavado etc.
- Generan ruido procedente de los equipos necesarios para conseguir las altas presiones a las que se lleva a cabo esta técnica. [27, 38, 42, 46-51]

Por tanto, y teniendo en cuenta todas las posibilidades descritas se va a proceder a justificar y seleccionar la alternativa más conveniente.

Para ello, se van a acompañar las explicaciones cualitativas con un proceso de elección basado en técnicas de evaluación de proyecto. Más concretamente aquellas que utilizan argumentos multicriterio. [52]

Se considerará que el proyecto es viable en cuanto al aspecto económico, técnico y operacional. Y se da por hecho que sea cual fuere la solución final a aplicar se cumplirá con la normativa vigente, por lo que también será viable legalmente.

En cuanto a la financiación hay que partir de la premisa de que, por tratarse de un proyecto público que busca cubrir una necesidad y evitar la problemática de una zona concreta, se va a suponer que el presupuesto no excederá la subvención a cubrir por los entes implicados. Estos serán el Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia e indirectamente Petronor, quien amortizará la inversión del Consorcio mediante el pago de un servicio de suministro.

Además, por el respeto que se plantea a la mayoría de las instalaciones actuales que conforman la EDAR de Muskiz, el proyecto no conllevará costes inconcebibles. Debido a que se tratará de una ampliación de algo que ya está realizado y no de un establecimiento desde cero.

Aun así se tratará de elegir la solución que económicamente sea más favorable por suponer gastos menores.

Respecto a los condicionantes técnicos y operacionales, se va a considerar que con la tecnología de hoy en día y con las diferentes soluciones propuestas, se dispondría de los suficientes recursos como para cubrir, con garantías, el proyecto.

Por tanto, seguidamente se presentarán, tras una criba preliminar, los criterios y sus pesos a considerar para la selección de la mejor alternativa.

Y después, diferentes alternativas que satisfagan el objetivo de regeneración.

Para todo esto se recurrirá al sentido común, al juicio del proyectista y a diversa bibliografía que se ha ido teniendo en cuenta.

Antes de comenzar hay que tener presente y recordar, que los parámetros del efluente depurado que hay que adecuar son: Por un lado, microorganismos y por otro, propiedades físicas.

Como ya se veía en las figuras 9 y 10, que recogen las calidades de entrada/salida del agua depurada y las exigidas para vertido y reutilización por los RD509/1996 y RD1620/2007 respectivamente, en el apartado biológico habrá que reducir la existencia de Nematodos Intestinales, Escherichia Coli y Legionella spp. Mientras que en cuanto a las propiedades físicas, los parámetros a optimizar serán la turbidez de las aguas y la presencia de sólidos en suspensión, para evitar abrasiones y fenómenos contraproducentes.

Teniendo en cuenta las diferentes técnicas que se han considerado, a través de esta criba preliminar se tratará de enfocar, aún más, hacia el objetivo concreto de reducción de estos parámetros físico-biológicos, los diversos métodos propuestos.

Por tanto, para reducir la carga de microorganismos se recurrirá a procesos de desinfección. De entre los cuales el ozono queda excluido por razones económicas y de inexistencia de precedentes en depuradoras de este tamaño.

Y para la reducción de los sólidos en suspensión y la turbidez de las aguas se empleará el uso de filtros y membranas. [53,54]

De esta forma, los procesos de oxidación avanzada quedarán desestimados y no tendrán cabida en el proyecto. Debido, principalmente, a la naturaleza de los contaminantes que hay que reducir, ya que estos son biodegradables y poco persistentes. Por lo que se eliminarán correctamente con procesos más sencillos y menos exigentes a nivel técnico y tecnológico, como es la citada desinfección.

Los criterios a valorar son los recogidos en la siguiente tabla:

Criterio	Peso del criterio (%)
Capacidad de reducción de contaminantes	30
Mantenimiento necesario	22.5
Rapidez de actuación	22.5
Coste	15
Calidad de las aguas	10

Figura 25: Pesos y criterios valorados. [Elaboración propia]

La capacidad de reducción de contaminantes (30%), cobrará un valor fundamental. Ya que como se ha venido diciendo a lo largo de toda la memoria descriptiva, el objetivo principal de este proyecto es dotar a las instalaciones de Muskiz de equipos que sean capaces de eliminar el exceso de contaminantes físicos y biológicos del efluente depurado, para permitir la reutilización de esas aguas. Es por esto que cuanto más y mejor se garantice la reducción de los parámetros, más recomendable será la alternativa.

En segundo lugar, se valorará y será muy importante el mantenimiento necesario (22.5%). Y se tomarán como más recomendables, aquellas alternativas que menores labores de conservación exijan. Debido a que, sobre el papel, reduciendo el mantenimiento se evitan pérdidas de tiempo y de operatividad de la maquinaria. Factores que, en definitiva, pueden generar volúmenes no tratados lo suficiente como para que puedan cubrir la necesidad de reutilización, obligando, por tanto, a poner en funcionamiento los by-passes hacia el Barbadún. Obviamente, esta búsqueda de un menor mantenimiento se aprobará con la condición “sin equa non” de que siempre se disponga de unas instalaciones correctamente acondicionadas y en perfecto estado para la operación.

El cuarto de los criterios a considerar será la rapidez de actuación (22.5%) del tratamiento seleccionado. En este caso, lo que se busca es que la alternativa elegida retenga el flujo de agua lo menos posible en las instalaciones de regenerado. Esto se debe a que la refinería, en su operación, requerirá de un caudal que aunque en tiempo y volumen sea irregular, será en cualquier caso importante. Por lo tanto, asegurando la posibilidad de suministro más o menos continuo, se da el margen suficiente para que Petronor disponga en todo momento de volúmenes mínimos con los que satisfacer la demanda de las actividades, sin necesidad de recurrir de forma tan ineludible al consumo de agua de la red potable.

Al coste, se le ha atribuido finalmente un 15% del peso. Lo cual responde a que el proyecto sea, en principio, financiado por un organismo público, así que se presupone que no habrá problemas para abordarlo. Además, no será un proyecto demasiado caro ni económicamente inadmisibile. Aun así, siempre se valorarán aquellas alternativas cuyos costes sean más reducidos. Estos se vincularán a la adquisición de maquinaria y pensando a largo plazo, a la operación de la misma. Derivarán, por tanto, de: Compra de equipos, energía necesaria para el funcionamiento, mantenimiento, reposición de elementos, aditivos/sustancias a incorporar...

Por último, la calidad de las aguas (10%) a entregar también se tendrá en cuenta. Hay que considerar, como ya se ha dicho, que la propia refinería consta de una EDARI interna en la que se adecuará la calidad de las aguas que pasen por la misma a la que dicta la norma de vertido. Lo cual significa que la calidad final del agua en el punto de entrega al Dominio Público Hidráulico, dependerá también de la propia refinería y no solo de las características del efluente regenerado.

Aun así, se deberá tener en consideración el efecto post-tratamiento y las activaciones de ciertos patógenos que se tendrán que eliminar con la existencia remanente del producto desinfectante. Para garantizar que la calidad del agua en la refrigeración, es tan buena como en la salida del tratamiento de afino.

Además, ante alternativas semejantes a nivel económico, logístico y operacional, se valorará en última instancia que; parámetros sin relevancia para la reutilización sean lo más favorables posible en el punto de entrega de las aguas regeneradas en cuanto a la asimilación posterior del ecosistema de recepción, que en este caso será medio marino (Mar Cantábrico en el Abra Exterior). [9]

Por lo tanto, las alternativas que se proponen de entre las técnicas definitivas y que, por ende, se llevarán a estudio son las siguientes:

### Alternativa 1: MicroFiltración → Radiación UV → Cloración:

En esta primera opción, se plantea que tras la decantación secundaria, el efluente depurado se someta por orden a; Una microfiltración, seguida por un tratamiento de luz ultravioleta y finalmente una cloración.

Con la Microfiltración, se va a conseguir reducir y adaptar la cantidad de sólidos en suspensión y la turbidez del agua a los parámetros necesarios para la reutilización.

La radiación UV, se encargará de desinfectar y eliminar la mayor parte de los microorganismos. Se plantea después de la filtración para garantizar una correcta transmitancia y radiación que garantice la eficacia del tratamiento.

La cloración final ayudará en el proceso de esterilización y sobre todo, servirá para asegurar una post-desinfección de posibles reactivaciones con el cloro residual libre que quede en el efluente regenerado.

En cuanto a la capacidad de reducción de contaminantes, el filtro será capaz de retener sin problema las partículas físicas en suspensión y aquellas responsables de generar turbidez.

Además, asegurada la correcta irradiación, siempre que se elija un binomio lámpara-longitud de onda adecuado se podrá garantizar que con la luz ultravioleta se logrará una eliminación de microorganismos más que aceptable recurriendo únicamente a un tratamiento físico que no da pie a tratar con especies peligrosas. Aun así, habrá que tener en cuenta que pueda aparecer el fenómeno de la fotorreactivación, que como ya se ha comentado, es difícil de controlar.

El filtro requerirá un mantenimiento periódico basado en ciclos de limpieza, tanto del propio poro, como de la capa de residuos que quede sobre la superficie de la membrana. Esto se hará a través de procesos físicos y/o químicos. De esta forma se preserva la permeabilidad y la tasa de producción y operación de la instalación. [38,49]

El equipo de radiación exige un intensivo programa de mantenimiento de la parte externa de los tubos de luz, para evitar la formación de una capa que dificulte el paso de la luz.

En cuanto a la rapidez de actuación, el conjunto microfiltración-radiación UV presentará muy buenos resultados. Ya que, por un lado, el tamaño de poro de la membrana permitirá que el agua pase a su través con relativa facilidad a bajas presiones de operación. Y por otro lado, como se decía en la explicación del método de desinfección con luz UV, los tiempos de contacto requeridos para la irradiación son menores que en la mayoría de desinfectantes.

A pesar de que para la filtración se requiera una presión de operación relativamente baja, el coste de esta alternativa sí se verá claramente afectado por el alto consumo energético asociado a las lámparas y tubos de luz.

La aportación final de cloro y la amplia gama de contaminantes biológicos que es capaz de eliminar la luz ultravioleta, asegurará una buena calidad de las aguas a entregar a la refinería. De cara, también, al posterior vertido al Dominio Público Hidráulico.

Teniendo en cuenta lo anterior, la puntuación de la alternativa número 1 sería la siguiente:

Criterio	Calificación
Capacidad de reducción de contaminantes	6
Mantenimiento necesario	7
Rapidez de actuación	8.5
Coste	6
Calidad de las aguas	6

Figura 26: Valoración alternativa 1. [Elaboración propia]

### Alternativa 2: MicroFiltración → APA + Radiación UV → Cloración:

La segunda alternativa contaría, también por orden, con: Una microfiltración para reducir los contaminantes físicos. Una esterilización a base de ácido peracético y radiación ultravioleta. Y un proceso de cloración que complemente la desinfección y asegure la calidad de las aguas desde la salida de la planta hasta la reutilización final.

Para la aptitud a la hora de reducir contaminantes, el proceso de membrana propuesto es el mismo de la primera alternativa. Por lo que será capaz de eliminar del flujo de agua las partículas en suspensión y la turbidez.

Además, en este caso, se añade el APA para garantizar de forma aún más clara una correcta y completa eliminación de los contaminantes biológicos. Con el extra del ácido, se evita la incertidumbre de que la radiación falle por defecto de mantenimiento en las lámparas, que no debería, o sobre todo por el citado fenómeno de fotorreactivación.

Con la intención de asegurar el funcionamiento oportuno del proceso de microfiltración se llevará a cabo un mantenimiento de la membrana a base de retrolavado, aireación, vibrado o disoluciones con diferentes reactivos. [38,48]

Como se ha comentado, para evitar la existencia de costras o películas que obstaculicen la irradiación, el exterior de los tubos de luz y las lámparas UV tendrán que limpiarse periódica y obligatoriamente.

La rapidez de tratamiento que se obtendrá con las técnicas propuestas en esta segunda alternativa se verá afectada. Debido a que la dosificación de APA exige unos tiempos de contacto que van entre 30 y 120 minutos, la salida del flujo se vería considerablemente demorada. A pesar de que la radiación y la filtración sean procesos rápidos. [55]

De nuevo, la etapa de filtración no va a exigir grandes costes asociados a la operación, por la baja presión requerida. Sin embargo, el presupuesto que requiere esta alternativa se verá disparado no solo por la radiación y el consumo de energía que esta implica, sino que también por el coste del reactivo químico a añadir y el posible agitador a incorporar en la entrada del tratamiento, para mejorar la velocidad de reacción de este desinfectante.

En lo que a la calidad final del agua a entregar respecta, esta segunda alternativa mejoraría los resultados de la primera. Como es obvio, además de lo que se planteaba en la anterior, en esta opción el añadido del ácido peracético asegura una mayor eliminación de microorganismos, con la contrapartida que supone tratar e incorporar al agua un compuesto químico irritante. Tal y como se comentaba en la descripción de la técnica de combinación APA+UVA, siempre y cuando se aproveche la sinergia entre los dos tratamientos y se anteponga la introducción del reactivo antes que la irradiación con la luz ultravioleta.

Finalmente, planteando de nuevo una aportación final de cloro se asegura una muy buena calidad de las aguas en el punto de entrega a la refinería. Lo cual agradecerá el ecosistema encargado de recibir y asimilar en última instancia las aguas depuradas tras la reutilización.

Considerando todo esto, se procede a valorar la segunda alternativa según los diferentes criterios propuestos:

Criterio	Calificación
Capacidad de reducción de contaminantes	7.5
Mantenimiento necesario	6.5
Rapidez de actuación	5
Coste	5
Calidad de las aguas	7

Figura 27: Valoración alternativa 2. [Elaboración propia]

### Alternativa 3: Ultrafiltración + Cloración

En esta última alternativa, se plantea que tras la decantación secundaria, el efluente depurado se someta primero a una ultrafiltración y después a una cloración.

Con la ultrafiltración, se va a conseguir reducir y eliminar de golpe tanto los parámetros físicos como los biológicos del agua a tratar. Esto es debido a que, como ya se ha visto en las figuras 19 y 20 de los procesos de membrana, las condiciones del filtro (tamaño y forma de los poros) hacen que sea capaz de retener sólidos suspendidos y macromoléculas. Cumpliendo por tanto las funciones de desinfección y de reducción de SST y turbidez.

La cloración final, vuelve a ser imprescindible para ayudar en el proceso de esterilización y sobre todo, para asegurar la posterior desactivación de microorganismos en el proceso de almacenamiento del agua regenerada y su posterior abastecimiento.

En cuanto a la capacidad de reducción de contaminantes, el filtro será capaz de retener en su seno y de forma integrada, las partículas físicas y las bacterias y virus. Hasta el punto de adecuar más que de sobra las aguas que pasen a su través a aquellos valores y estándares de calidad que exige la norma para el uso industrial de refrigeración. Todo esto recurriendo exclusivamente a una separación física de la corriente de entrada en; una corriente depurada y un retenido.

El filtro requerirá un mantenimiento periódico más exhaustivo que el de las dos primeras alternativas, ya que al ser el poro de menor tamaño, la cantidad de partículas que retenga será mayor y el fenómeno del fouling, deposición indeseable de materia sobre una superficie, aparecerá más fácil. Esta limpieza se podrá basar en ciclos de lavado físico y/o químico de los intersticios de la membrana y en la retirada de la capa de residuos retenida en la superficie de la misma. De forma que se preserve la permeabilidad y la tasa de producción y operación de la instalación.

En cuanto a la rapidez de actuación, el hecho de que el tamaño del poro sea más pequeño, ralentizará un poco el proceso de filtrado propiamente dicho, aun aplicando presiones de operación superiores a las necesarias en la técnica de microfiltración. Pero por otro lado, al no exigir un tratamiento de desinfección complementario, los tiempos de contacto ahorrados en esta alternativa, la convierten en la que menos tiempo retiene la corriente de agua en el proceso de regenerado.

A pesar de que para la ultrafiltración se requiera una presión de operación que puede llegar a ser hasta 10 veces superior a la necesaria en la microfiltración, el coste de esta alternativa se verá reducido dado que todo el proceso se integra en una sola instalación sin ser necesario utilizar aditivos, reactivos o desinfectantes complementarios.

La aportación final de cloro y el hecho de que solo sean capaces de atravesar el filtro iones monovalentes y divalentes que en principio no causarán contaminación, asegurará una muy buena calidad de las aguas a entregar a la refinería. De cara, también, al posterior vertido al Dominio Público Hidráulico.

Teniendo presente todo esto, se presenta la valoración de la tercera alternativa:

Criterio	Calificación
Capacidad de reducción de contaminantes	7.5
Mantenimiento necesario	6
Rapidez de actuación	7.5
Coste	8
Calidad de las aguas	7

Figura 28: Valoración alternativa 3. [Elaboración propia]

Por tanto, considerando todo lo anterior y sabiendo que la evaluación según el valor técnico ponderado sigue esta expresión: [52]

$$VTP(alternativa_i) = \frac{\sum_{j=1}^n p_j x_{ij}}{x_{max} \sum_{j=1}^n p_j}$$

Se conforma a continuación una tabla para representar los resultados que arroja cada alternativa empleando este método de valoración:

<u>Crterios</u>	<u>Peso (%)</u>	<u>Alternativa 1</u>	<u>Alternativa 2</u>	<u>Alternativa 3</u>
1. Capacidad de reducción de contaminantes	30	6	7.5	7.5
2. Mantenimiento necesario	22.5	7	6.5	6
3. Rapidez de actuación	22.5	8.5	5	7.5
4. Coste	15	6	5	8
5. Calidad de las aguas	10	6	7	7
<b>Suma ponderada</b>		678.75	628.75	718.75
<b>Valor ponderado</b>		0.68	0.63	0.72

Figura 29: Valores suma y valor ponderado para cada alternativa. [Elaboración propia]

Según el Valor Técnico Ponderado, la alternativa más adecuada sería la tercera, seguida por la primera y finalmente la segunda.

Recurriendo ahora a la suma ponderada por rangos y sabiendo que la fórmula a utilizar es: [52]

$$q_i = \sum_{j=1}^n \left( \frac{r_{ij}}{p_j} \right)$$

Se plantea una nueva tabla con todas las alternativas y el resultado de las mismas:

<u>Crterios</u>	<u>Peso (%)</u>	<u>Alternativa 1</u>	<u>Alternativa 2</u>	<u>Alternativa 3</u>
1. Capacidad de reducción de contaminantes	30	3	1	1
2. Mantenimiento necesario	22.5	1	2	3
3. Rapidez de actuación	22.5	1	3	2
4. Coste	15	2	3	1
5. Calidad de las aguas	10	3	1	1
<b>Rango ponderado</b>		0.6222	0.555	0.422

Figura 30: Rango ponderado para cada alternativa. [Elaboración propia]

Reparando en los resultados ofrecidos por el método de la suma ponderada por rangos, la mejor solución al proyecto sería la planteada en la alternativa 3, seguida por la 2 y en último lugar la 1.

Por tanto, a través de ambos métodos multicriterio se ha obtenido la misma solución en cuanto a cuál de los diseños planteados es el idóneo. Es por esto que la alternativa a desarrollar será la tercera de las presentadas.

Es decir, aquella en la cual el tratamiento para obtener el agua regenerada sea: UltraFiltración + Cloración.

## 6 Descripción del proyecto

Una vez concluido el proceso de selección, hay que profundizar en todos los detalles necesarios para definir de forma concreta la alternativa a llevar a cabo. Dentro de este apartado se abordarán las diferentes fases que conforman el proyecto, que serán: bombeo, filtración, cloración y almacenamiento para entrega de las aguas.

Antes de comenzar con la descripción de las diferentes etapas, y a modo introductorio, se va a hacer un pequeño resumen que sintetice de forma somera las actuaciones a realizar sobre el agua depurada en base a las características generales de la solución adoptada.

Para ello se partirá de la premisa de que, en el tratamiento de acondicionado del agua depurada a reutilizar, se han localizado diferentes necesidades. Estas se abordarán con el planteamiento de un proceso de filtrado y otro de desinfección, de forma que se adapten, respectivamente, las características físicas y biológicas del efluente de la EDAR, a las exigidas por el RD 1620/2007 en el reuso de refrigeración.

Por lo tanto, a la salida de la decantación secundaria el agua se conducirá hasta las instalaciones del proceso de ultrafiltración. Con este tratamiento se conseguirá, de forma integrada, por un lado desinfectar y por otro, eliminar la presencia de sólidos en suspensión y turbidez de la corriente de agua.

Tras esta etapa de ultrafiltración, se hará pasar al fluido por la cámara de cloración que ya dispone la depuradora. De esta forma, además de incorporar una desinfección auxiliar extra, se aporta al agua un remanente que evite futuras contaminaciones posteriores a la esterilización realizada mediante el proceso de membrana.

Además de los sistemas y equipos que permitan la adecuación del agua, la Dirección de Explotación, después de las obras, tendrá que considerar, aquellos utilizados para el muestreo de los parámetros obtenidos. Tales como medidores a tiempo real, de forma que se asegure un correcto estado del fluido regenerado en todo momento y en diferentes puntos de la instalación. De esta forma, en caso de que existan problemas de calidad se localizará si la incidencia se está produciendo en el propio tratamiento o en la etapa de conducción o almacenamiento.

El proyecto se llevará a cabo teniendo en cuenta posibles escenarios futuros, como es la ampliación prevista para la actual EDAR de Muskiz. Por lo que las instalaciones de regenerado se proyectarán con cierto margen a la hora de asumir los diferentes parámetros de diseño. [56]

Teniendo en cuenta esto, los posibles y ligeros sobredimensionamientos estarán justificados. Debido a que el caudal a tratar pueda, previsiblemente, aumentar a corto/medio plazo.

En cuanto a la ubicación de los diferentes tratamientos y antes de entrar en temas más específicos, hay que aclarar lo siguiente:

La superficie libre disponible para ubicar el grosso de las nuevas instalaciones del tratamiento terciario, los módulos de ultrafiltración, y del tanque de almacenamiento está muy limitada debido al actual planteamiento de urbanización que tiene el complejo de depuración de Muskiz, el cual está previsto respetar y mantener.

Es por esto que, aprovechando los huecos, el equipo de filtrado se dispondrá en la zona sur-sureste de la EDAR, mientras que el tanque de almacenamiento se colocará en la zona apartada y ajardinada de la zona nor-noreste del solar. Este planteamiento de disposición de las diferentes instalaciones se presenta en la siguiente figura:



Figura 31: Croquis del emplazamiento para el proceso de membrana (rojo) y el tanque de almacenamiento (verde). [57]

La parcela roja tiene 40 metros de largo por 10 de ancho, superficie que, tras consultar diferentes catálogos, se prevé suficiente para alojar la maquinaria y equipos necesarios para materializar el proceso de membrana, teniendo en cuenta el caudal de diseño que se va a manejar [58,59]

La zona que contendrá el tanque de almacenamiento permitía alojar, por ejemplo, hasta un vaso circular de 29 metros de radio y 660 metros cuadrados, que jugando con la profundidad requerida, supondría una capacidad más que reseñable.

## 6.1 Bombeo

### 6.1.1 Introducción

El efluente producto de la decantación secundaria carecerá de la cota y presión necesarias como para que el fluido circule por gravedad por las diferentes instalaciones del tratamiento de afino propuesto.

### 6.1.2 Objeto

La instalación de un equipo de bombeo al finalizar la última fase del tratamiento biológico, decantación secundaria, se hace necesario porque permitirá aportar al agua la presión suficiente como para que el efluente regenerado alcance sin problemas la ubicación final deseada, que es el tanque de almacenamiento. Venciendo la oposición que presentan los procesos de ultrafiltración y cloración, además de las pérdidas de carga asociadas a las conducciones y los equipos que las conformen.

De esta forma se simplifica la línea de procesos y se evita la disposición de impulsores de flujo durante el tratamiento de afino, propiamente dicho.

### 6.1.3 Parámetros de diseño

A la hora de decidir los equipos requeridos para cubrir la necesidad de bombeo, hay que reparar en ciertas variables que son fundamentales en el proceso de dimensionado.

Los datos a considerar, a priori, más destacables son:

- El caudal de bombeo.
- La presión o altura manométrica de la impulsión: Para lo cual habrá que reparar, además de en la altura geométrica a salvar, en las pérdidas de carga asociadas a las tuberías y a los distintos elementos y puntos singulares de la instalación. Como por ejemplo: Válvulas, compuertas, codos, ensanchamientos o estrechamientos de sección, embocaduras, bifurcaciones, empalmes... [60]
- El tiempo de funcionamiento de la instalación.
- La velocidad del fluido.
- Lugar de colocación de la bomba. [61]

Además, también se deberán tener en cuenta ciertas recomendaciones para la construcción y diseño de los equipos e instalaciones:

Todos los compartimentos deberán ser accesibles y bien iluminados y aireados, para permitir extraer o introducir equipos en caso de avería o sustitución.

Previo a la cámara de bombeo se instalará una arqueta con una válvula de compuerta que permita el cierre completo de la instalación. Para facilitar posibles operaciones de mantenimiento.

El número mínimo de bombas a instalar será de dos, dejando siempre, al menos una de ellas, en reserva. Todas estarán en condiciones de poder entrar en operación en cualquier momento.

Deberán cumplir con la normativa de seguridad vigente en España para equipos instalados en locales húmedos, y con las Directivas y Normas UNE que apliquen a este tema. [62]

#### *6.1.4 Tipos de bombas*

Entre los aparatos de impulsión empleados habitualmente, hay que destacar tres modelos:

- Tornillos de Arquímedes
- Bombas sumergibles de hélice
- Bombas sumergibles centrífugas

Hoy en día, de los tres tipos de aparatos para empuje de aguas, el que mayor protagonismo tiene es el último de los citados.

A continuación, para tratar de entender un poco los pros y los contras que cada uno de los diferentes modelos puede aportar a la necesidad que hay que cubrir en el proyecto del tratamiento de afino en Muskiz, se aportará una pequeña explicación.

Esta se hará con la intención de justificar y elegir aquel que mejor se ajuste a las condiciones de bombeo requeridas para la aplicación concreta de: ultrafiltración, cloración y almacenamiento.

- Tornillos de Arquímedes

Su funcionamiento se basa en el principio físico enunciado por el científico del mismo nombre.

Es una máquina gravimétrica fundamentada en un tornillo sin fin de forma helicoidal que se hace girar dentro de un cilindro hueco, situado en un plano inclinado y generalmente acanalado, que permite elevar el agua por debajo del eje de giro. [63]

La capacidad de esta técnica depende de una serie de variables constructivas, pero puede elevar hasta 10 metros, caudales de  $7 \text{ m}^3/\text{s}$ . Haciendo que después estos circulen por gravedad.

La inclinación del tornillo suele ser de entre  $30$  y  $38^\circ$ . Aumentando la pérdida de caudal y el rendimiento mecánico a medida que lo hace la pendiente del cilindro-canal.

Por la necesidad de inclinación, ocupan grandes espacios. Además, no aportan energía de presión al fluido. Solo energía potencial por el salto de altura geométrico. [64,65]

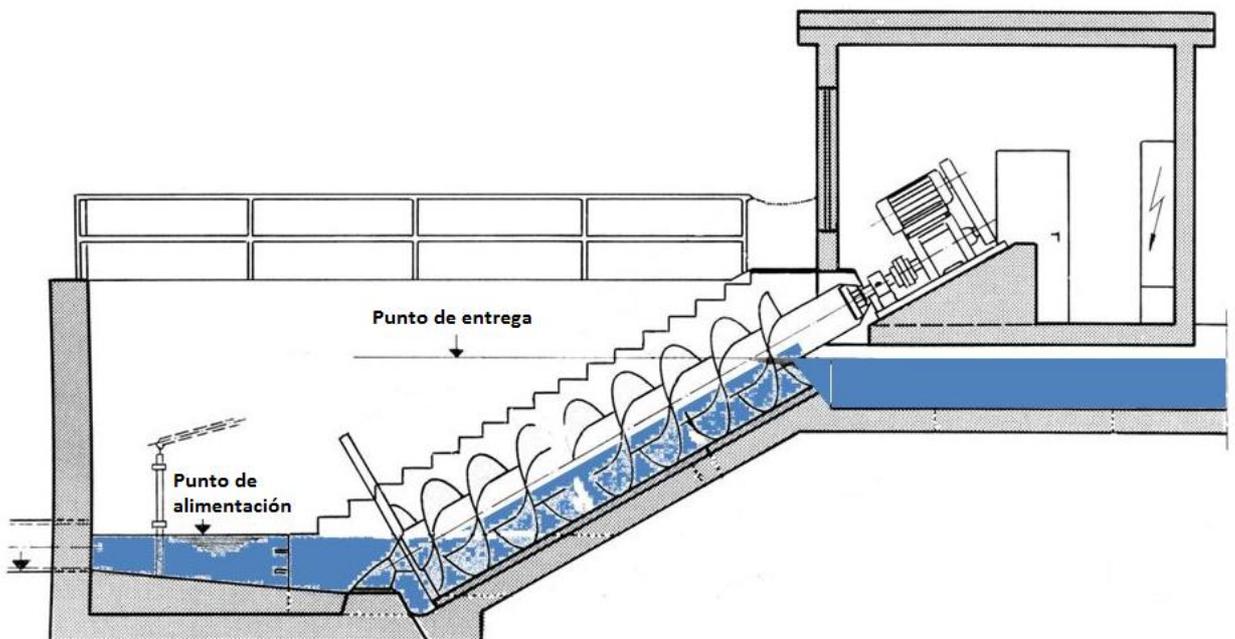


Figura 32: Esquema de funcionamiento del tornillo de Arquímedes. [66]

- **Bombas sumergibles de hélice**

Son bombas que se emplean para la impulsión de grandes caudales a alturas no superiores a los 12 metros.

Contrapunto del anterior tipo de elevadores, la posición vertical de estos equipos, permite reducir de forma reseñable la superficie necesaria para la instalación de las bombas sumergibles de hélice.

El hecho de que el motor eléctrico que proporciona el movimiento a la hélice impulsora se encuentre sumergido, no es un problema. Ya que se sitúa dentro de un compartimento totalmente estanco que garantiza el aislamiento.

Un flujo no uniforme o turbulento podría afectar de forma negativa al rendimiento y la integridad de la bomba. Esto no supondría un problema en el proyecto a cubrir, porque los vertederos de la decantación secundaria y el planteamiento posterior de un posible pozo de bombeo asegurarían una aportación continua y en régimen estacionario del agua a bombear. [65]

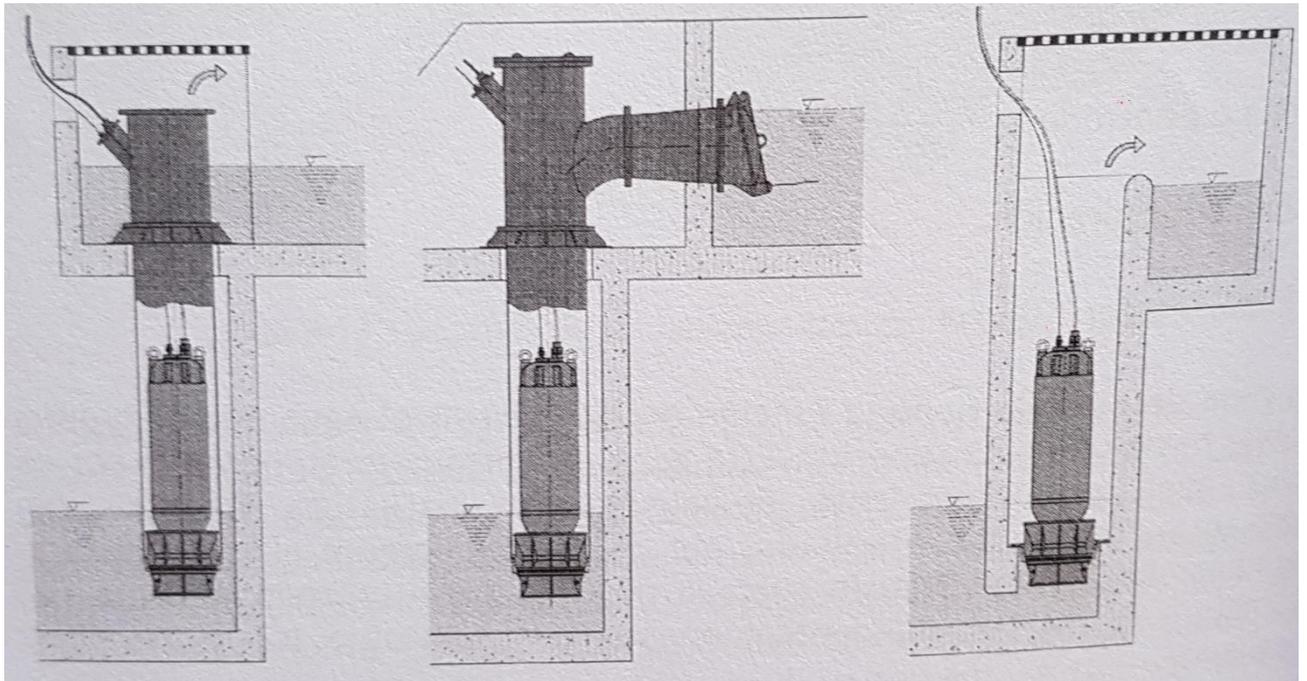


Figura 33: Diferentes vistas y disposiciones de una bomba sumergible de hélice. [65]

- **Bombas sumergibles centrífugas.**

Este tipo de bombas se instalan, por lo general, para trabajar sumergidas en pozos, ya sean convencionales, prefabricados o fosas sépticas. Aunque no presentan ningún problema en caso de que tengan que instalarse y trabajar en seco.

Se emplean con magníficos resultados en el bombeo de aguas residuales urbanas o industriales. Y cabe destacar, la amplia versatilidad que presentan, pudiendo usarse en grandes instalaciones o en plantas piloto y/o pequeños equipos compactos e incluso transportables.

Se pueden disponer en horizontal o vertical, favoreciendo la instalación en lugares con espacio reducido. En cualquier caso, una vez más y como ocurría con las bombas sumergibles de hélice, el motor está perfectamente aislado de la parte hidráulica.

Requiere una llegada uniforme y no turbulenta del agua a impulsar, lo cual se lograría a través de un pozo de bombeo dispuesto después de los decantadores secundarios. Este debería garantizar, mediante una correcta geometría, la no existencia de zonas muertas que acumulen sedimento o que dificulten la fluencia del agua hacia el equipo de impulsión. [65]

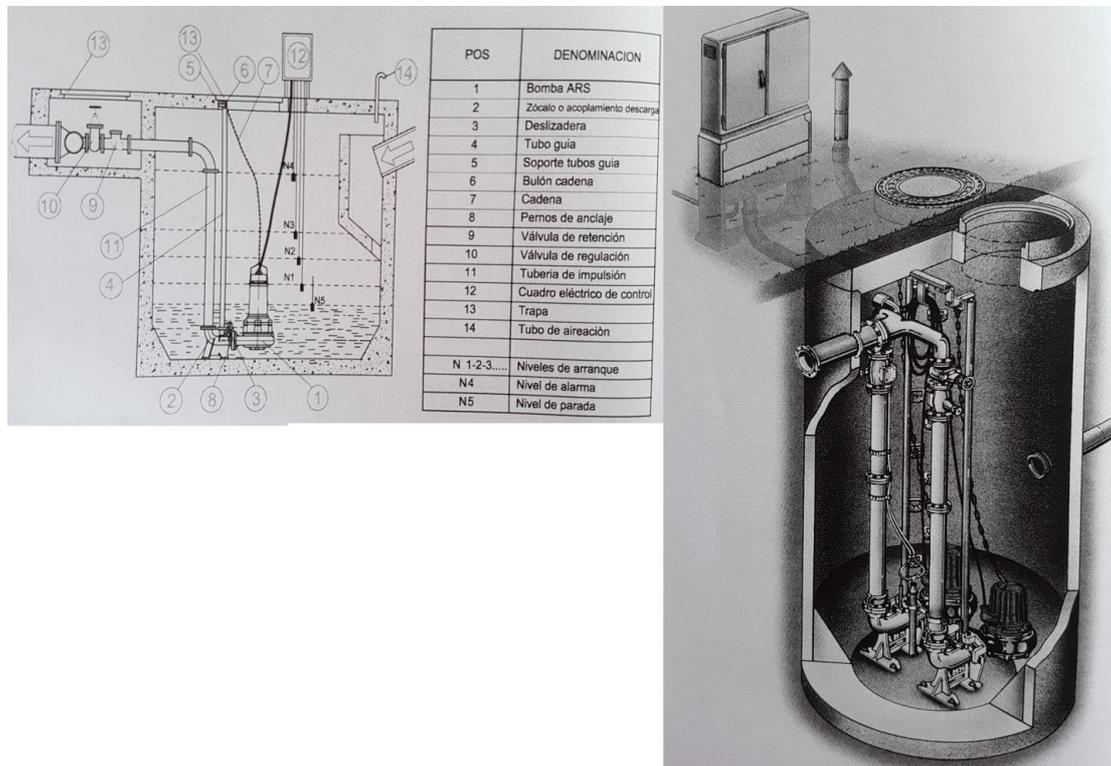


Figura 34: Instalación típica de bomba sumergible en pozo prefabricado. [65]

### 6.1.5 Solución adoptada

En la filtración por membranas, los equipos de bombeo que se emplean captan el agua a tratar de pozos o tanques de toma y la envían hasta las unidades de tratamiento.

Por tanto, de entre los tipos de bombas que se han mencionado, se tendrán que emplear para la captación aquellas que son sumergibles.

Al utilizar bastidores o módulos, como será el caso, la impulsión requerirá cierta presión. Según los valores típicos para las pantallas de ultrafiltración, tendrá que ser de entre 1 y 10 bares.

Los modelos de alta presión más extendidos, que cumplen con las condiciones para estas aplicaciones son; las de tipo centrífuga en instalaciones de caudales considerables y las de desplazamiento positivo para las de menor envergadura.

Teniendo en cuenta todo esto se ha decidido instalar bombas sumergibles centrífugas.

Para el bombeo de agua depurada a regenerar, los impulsores serán de la gama ABS Serie XFP y modelo 100G CB1. La elección se ha basado en los cálculos del apartado 3.3: “Bombeo del tratamiento terciario” del anejo número 1: “Dimensionamiento del tratamiento terciario”.

Estas bombas tendrán la capacidad de impulsar, aproximadamente, entre 28 y 41 L/s. Se colocarán 2 impulsores trabajando a tiempo continuo más uno en reserva dentro del pozo de bombeo. Una cuarta bomba se tendrá desmontada y guardada en almacén.

### 6.1.6 Diseño

El funcionamiento de la bomba es posible gracias a un motor trifásico, categoría Premium Efficiency IE3, de dos polos con rotor en jaula de ardilla y protección IP68 que funcionará a 400 V y con una frecuencia de corriente eléctrica de 50 Hz.

El motor será totalmente sumergible por ir encapsulado y ser estanco a la presión del agua, debido a su aislamiento de Clase H. Además, forma junto con la sección de la bomba una unidad modular robusta y compacta.

Se utilizarán impulsores Contrablock porque el agua a impulsar no tendrá gran cantidad de sólidos, al tratarse del bombeo de un fluido que ha atravesado una etapa de depuración con el consiguiente tratamiento físico que conlleva, culminado por la decantación secundaria.

Como se comentaba entre las características de las bombas sumergibles centrífugas es importante garantizar una entrada de agua a aspiración que sea constante y uniforme, evitando turbulencias, entradas de aire o vórtices. Tampoco se permitirá que las bombas trabajen en vacío.

Para todo esto será vital un correcto diseño del pozo de bombeo. Tendrá que disponer de sensores para determinar el nivel de agua y de una correcta geometría y distribución del espacio que garantice la adecuada fluencia del agua hacia la zona de aspiración y evite los depósitos de partículas en suspensión.



Figura 35: Vistas de un pozo de bombeo. [67,68]

## 6.2 Filtración y desinfección

### 6.2.1 Introducción

El término de filtración, dentro del argot de tratamiento de aguas, se suele entender como un proceso de depuración utilizado para reducir, generalmente, los contaminantes físicos del agua.

En los últimos años, jugando con el tamaño de poro, se han logrado desarrollar equipos de filtración que no solo retienen los sólidos que pueda haber en el agua sino que también parte o la totalidad de los contaminantes de origen biológico.

### 6.2.2 Objeto

La finalidad de este proceso es reducir el exceso de sólidos en suspensión y la turbidez que presenta el agua depurada en la EDAR de Muskiz. Ya que la calidad del fluido saliente obliga a que se tenga que someter a un proceso de filtrado para que se pueda reutilizar en las torres de refrigeración de la refinería de Petronor.

Además, empleando membranas con poros muy finos se logrará esterilizar el agua separando de la corriente clarificada los microorganismos y bacterias causantes de la Legionella spp, la Escherichia Coli y la presencia de Nemátodos Intestinales.

De esta forma se optimiza el posterior tratamiento de desinfección auxiliar dado que la calidad del agua llegará a cloración siendo ya muy aceptable.

### 6.2.3 Solución adoptada

Como ya se ha podido extraer de diferentes puntos de la redacción de este documento y como se concluyó en la selección de alternativas, los filtros tradicionales y comúnmente más usados, como son los de arena, no tenían cabida en este proyecto.

La razón es que estos no se ajustan a los requerimientos de descontaminación que exige el proceso de filtración necesario para cubrir el tratamiento de afino, por tener dichos equipos un paso demasiado grande.

Finalmente, los filtros considerados fueron los que funcionan a mayor presión (procesos de membrana): Microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa.

Por motivos de compatibilidad y de adecuación a los parámetros a reducir fue finalmente la membrana de ultrafiltración la que se decidió aplicar en este proyecto.

Como ya se explicó en el estudio de alternativas, esta membrana tiene el tamaño perfecto y la capacidad de retener de forma integrada los sólidos en suspensión y la turbidez del agua además de los patógenos y microorganismos biológicos que también hay que eliminar.

Todo esto en un espacio bastante reducido gracias a los equipos modulares que hoy en día se pueden encontrar en el mercado.

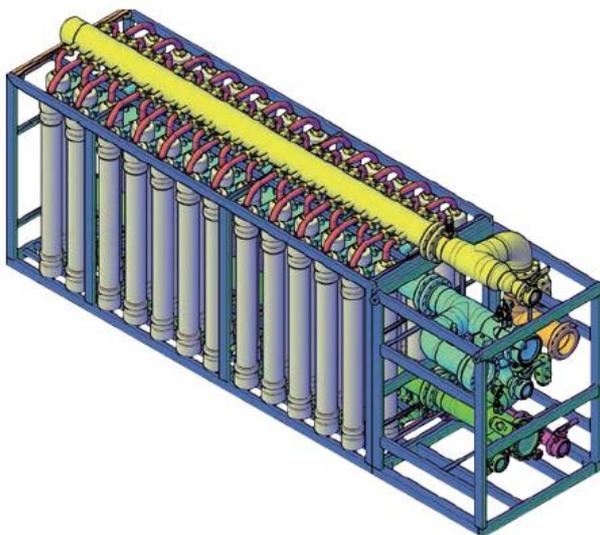
#### 6.2.4 Diseño del equipo

El equipo de ultrafiltración que se va a disponer es una instalación basada en tecnología de membranas de fibra hueca.

El material de las fibras a utilizar será Polivinildeno Hidrofílico (H-PVDF) de doble pared. Gracias a la naturaleza hidrofílica de este material, se logra reducir la tendencia al ensuciamiento orgánico que es característico de otros materiales más hidrófobos como el PoliPropileno, el Poliestireno o las Polieter Sulfonas.

Estas membranas se dispondrán, por módulos (tubos), en diferentes bastidores que en conjunto formarán un equipo integrado de planta rectangular.

Estas divisiones en forma de tubo, interconectadas entre sí y con las conducciones externas a través de tuberías, afinarán la calidad del afluente depurado haciéndolo pasar a su través.



Fluytec UF Skid FSUP-50.

Figura 36: Equipo de ultrafiltración Fluytec. [58]

Para ello el fluido llegará desde el pozo de bombeo en tuberías de diámetro 250 mm. El propio equipo de ultrafiltración recibirá el agua en tuberías de ese mismo diámetro y las irá subdividiendo para hacerlas pasar por los distintos módulos de membrana.

Esta entrada del afluente a tratar en cada tubo filtrante, se realizará mediante una válvula motorizada que colabora en la ramificación y separación del caudal en las diferentes tuberías.

Una vez haya atravesado el agua estos filtros, se recoge nuevamente en tuberías con diámetros crecientes y se dirige a la salida de la instalación, donde todo el caudal tratado confluye en una tubería de 250 mm. Que servirá para conducir al agua hasta la etapa de cloración.

El equipo de ultrafiltración que se va a instalar en la EDAR de Muskiz, ha sido diseñado para poder tratar caudales de hasta  $275 \text{ m}^3/\text{h}$ , mucho más que los 130 que recibe la EDAR a día de hoy. La instalación de filtrado constará de 50 módulos que ocuparán en planta unas dimensiones de ancho y largo igual a 1,9 y 7,4 metros respectivamente. La altura total será de 3,1 metros.

El principio de funcionamiento del equipo, como se comentaba en la descripción de los sistemas de membrana dentro del apartado de selección de alternativas, se basará en la retención o exclusión física de las diferentes partículas en los billones de poros que tienen las fibras huecas a lo largo de su espigado cuerpo con forma de mechón.

La principal ventaja de este sistema es que aunque la velocidad de filtrado sea relativamente baja, la disposición en paralelo de los diferentes módulos ocupa poco espacio y permite aumentar exponencialmente la cantidad de fluido a tratar. Además, es uno de los sistemas de membrana que mejores resultados presenta porque la naturaleza irregular de la forma de los poros facilita la retención y sobre todo el lavado de los mismos.

La instalación se dispondrá en superficie y a pesar de que pueda trabajar a la intemperie, porque los materiales que la conforman (que pueden verse en el apartado 4.4 del Anejo: "Dimensionamiento del tratamiento terciario") o bien son resistentes a la lluvia y al desgaste de un ambiente expositivo húmedo y cercano a la costa o están protegidos por carcasas estancas cuando hay elementos electrónicos o pasos de corriente, se protegerá introduciéndola en una nave prefabricada hecha de panel sándwich y chapa de unos 12 metros de largo por 5 metros de ancho y 4,5 de alto. Con una puerta de 3 por 3 metros.

### 6.2.5 Funcionamiento

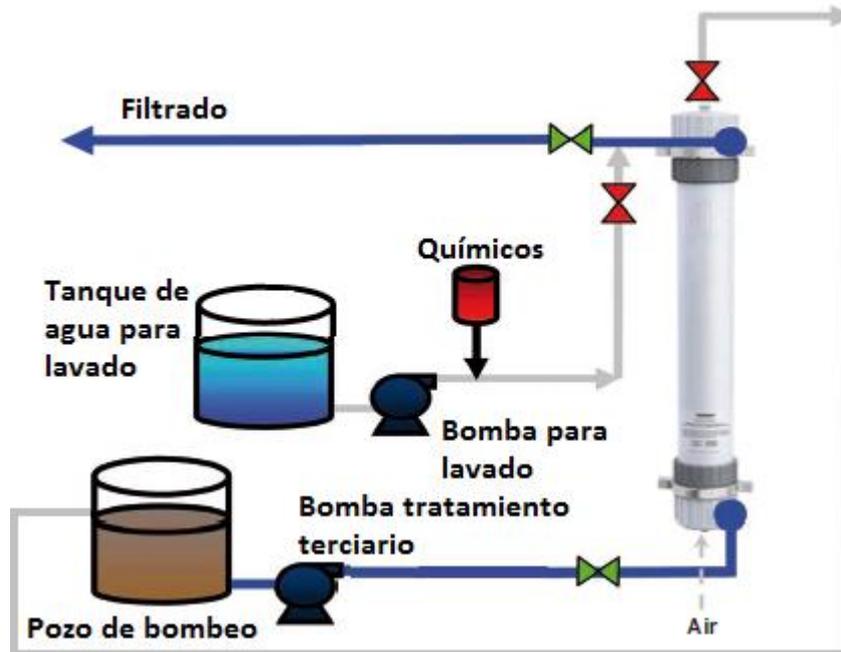


Figura 37: Esquema de flujo de la instalación de Ultrafiltración. [Elaboración propia]

El agua procedente de los decantadores secundarios es conducida hasta el pozo de bombeo. Desde este punto y gracias a las bombas del tratamiento terciario, el fluido a tratar adquiere la presión suficiente como para llegar hasta la entrada del equipo de ultrafiltración.

Una vez allí se divide el caudal entre los diferentes módulos y el agua comienza a fluir a través de las membranas de fibra hueca. Que es donde se produce la retención de las partículas físicas y los microorganismos responsables de la contaminación biológica del agua.

A continuación el agua clarificada es recogida por las diferentes boquillas a la salida de los tubos y se conduce hasta la tubería principal de salida.

Esta, posteriormente empalma con la conducción que discurre en dirección a la cámara de cloración, donde continúa el tratamiento de afino con la etapa de post-desinfección/desinfección auxiliar.

Mientras la línea azul representa el funcionamiento y la operación normal de filtrado de la instalación, la línea gris representa la etapa de lavado. La cual entrará en funcionamiento cuando el controlador lógico programable integrado en el equipo, detecta dificultad de funcionamiento por la obstrucción de filtros.

### 6.2.6 Lavado de los filtros

El proceso de lavado se realizará combinando un flujo de agua que atraviese los filtros en cualquiera de las dos direcciones, contralavado o lavado hacia adelante, y una inyección de aire en el sentido del flujo de alimentación del agua a tratar.

En el lavado por agua la alternancia en el tipo de ciclo, que dependerá de la dirección del flujo, y la duración y frecuencia de los lavados vendrá definida de forma automática por la inteligencia implantada en el equipo de ultrafiltración. Según el fabricante lo normal es que esta operación se realice cada, más o menos, 20 o 60 minutos y dure entre 40 y 120 segundos cada ciclo.

Como se puede observar en la figura anterior, el agua para lavado se obtendrá de un depósito de 75 metros cúbicos, diseñado para tal efecto, que se llenará a través de la red de agua corriente. Una vez bombeada, y aprovechando la turbulencia, se adicionarán diferentes químicos, según sea necesario, que faciliten la limpieza de las membranas atravesando por completo los diferentes módulos en la dirección que corresponda. Después el agua de lavado, que habrá arrastrado consigo las diferentes partículas retenida en los poros, se reconducirá hasta el pozo de bombeo donde retorne al flujo de afino del tratamiento terciario formando parte del agua a regenerar.

Para el lavado con aire, que se realizará una vez por día, los sopladores impulsarán un chorro que facilite el desprendimiento y posterior retirada de la torta además del arrastre de partículas. Este proceso permitirá mejorar de forma notable la capacidad de retención y, en definitiva, la eficacia del proceso de membrana.

Todo esto se puede analizar con mayor detalle en los anejos de “Dimensionamiento del tratamiento terciario” y “Cálculo de la línea de presión del tratamiento terciario” pero a continuación se recogen las principales características de cada tipo de lavado:

Lavado por agua:

- Se bombearán 3,8 L/s con una altura de 30 metros para la dirección de contralavado
- Se bombearán 0,95 L/s con una altura aproximada de 18 metros
- Consumo máximo horario de agua 1,36 metros cúbicos

Lavado por aire:

- Inyección de  $110 \text{ m}^3/\text{h}$  de aire a 0,5 bares durante 3 minutos aproximadamente

### 6.2.7 Características de agua filtrada

Los procesos de membrana pueden llegar a proporcionar al agua calidades de un nivel altísimo. En función del tipo de equipo utilizado, en cuanto a tamaño de poro, material de construcción y módulo elegido, el afluente a tratar tendrá que llegar con unas condiciones concretas que estén dentro de unos márgenes en cuanto a parámetros de contaminación física, química y biológica como pueden ser los sólidos en suspensión, la turbidez, el pH, la demanda química de oxígeno... (Datos que se puede ver en detalle en el apartado “4.3 Condiciones de funcionamiento” del Anejo de Dimensionamiento)

De no cumplir con estos, pueden ser necesarios pretratamientos anteriores al propio proceso de membrana.

Como se indica en la figura 10 al inicio del apartado 5 “Selección de alternativas” de este mismo documento, habrá que garantizar que en la entrega de las aguas a la refinería, para el reuso de refrigeración industrial, el agua debe tener:

- Menos de 1 huevo de nematodo intestinal por cada 10 litros de muestra
- Ausencia total de unidades formadoras de colonias de E.Coli por cada 100 mililitros
- Menos de 5 mg/L de sólidos en suspensión
- Menos de 1UNT en turbidez de la muestra
- Ausencia total de UFC de Legionella spp por cada litro de muestra

La ultrafiltración se ha dispuesto para que se encargue de reducir todos estos parámetros hasta adaptarlos a las condiciones impuestas por la normativa de reutilización.

Las características del agua a la salida de cualquier proceso de ultrafiltración, cumplirán con esta premisa dado que el tamaño de poro solo permitirá el paso de agua y de iones divalentes y monovalentes (sales), reteniendo las macromoléculas, los virus y las bacterias y partículas sólidas.

Aun así, el fabricante ofrece con mayor concreción algunas de las características a observar del agua a la salida de la ultrafiltración:

- Turbidez  $\leq 0,1$  UNT
- Porcentaje de recuperación de sólidos de 90-95% por lo que pasaría de haber 12mg/L (como puede verse en la figura 9 de este documento) a quedar como mucho 1 mg/L

No obstante, la postdesinfección vía cloración garantizará un extra de confianza a nivel de esterilización de los parámetros biológicos del efluente regenerado.

Además, hay que realizar un seguimiento en el control y evaluación de la calidad de las aguas del tratamiento terciario de la EDAR de Muskiz, tal y como impone el RD 1620/2007 de reutilización.

Para ello se tomarán muestras con asiduidad en diferentes puntos de la instalación siguiendo, a rajatabla, los Anexos IB de frecuencias mínimas para el análisis y el Anexo IC de evaluación de la calidad de las aguas regeneradas.

El hecho de que la toma de muestras se haga en diferentes puntos permitirá, como ya se ha dicho, detectar la localización de posibles incidencias y ver en qué etapa se puede estar perdiendo calidad en las aguas.

Las frecuencias de muestreo y los métodos de análisis propuestos por el RD de reutilización en los citados Anexo IB y IC son los siguientes:

<u>Parámetro a analizar</u>	<u>Frecuencia mínima</u>	<u>Técnica de referencia</u>
1. Nematodos intestinales	Semanal	Método Bailinger modificado por Bouhoum & Schwartzbrod (1996)
2. Escherichia Coli	3 veces por semana	Recuento de Bacterias Escherichia Coli $\beta$ - Glucuronidasa positiva
3. Sólidos en suspensión	Diaria	Gravimetría con filtro de fibra de vidrio
4. Turbidez	Diaria	Nefelometría
5. Legionella spp	3 veces por semana	Norma ISO 11731 parte 1: 1988 Calidad del Agua. Detección y enumeración de Legionella

Figura 38: Frecuencias y métodos de muestreo de contaminantes para reuso de refrigeración. [69,70]

## 6.3 Post-desinfección y desinfección de seguridad mediante cloración

### 6.3.1 Introducción

En el tratamiento terciario planteado para la regeneración de las aguas tratadas en la EDAR de Muskiz, se mantendrá la actual propuesta de cloración. En este caso, más que como el principal método de esterilización, servirá como un sistema auxiliar y complementario al tratamiento previo de ultrafiltración que se acaba de explicar en el apartado anterior.

### 6.3.2 Objeto

Esta etapa tiene como finalidad garantizar y colaborar en una buena calidad biológica final de las aguas en la entrega, para la reutilización de las mismas en torres de refrigeración.

Además, proporcionará la capacidad de eliminar posibles reactivaciones de cepas de microorganismos contaminantes en las etapas de distribución y almacenamiento, gracias al cloro residual libre que quede remanente en el agua.

### 6.3.3 Métodos de desinfección mediante cloro

La desinfección y, sobre todo, postdesinfección del agua mediante la utilización de cloro es un método muy habitual y extendido, por lo que se entiende y justifica su mantenimiento en la actual depuradora de Muskiz.

Como ya se ha dicho en diferentes puntos de este documento, la habitualidad de este tipo de tratamientos es debido a los largos plazos de eficacia y la remanencia que ofrecen además de que tienen asociados bajos costes en cuanto a la implantación, operación y mantenimiento.

En la práctica, la dosificación del químico activo se puede hacer a través del cloro puro o de diferentes derivados que lo contengan en su formulación.

Actualmente, en la cloración de la depuradora de Muskiz se emplea cloro gas que, almacenado en botellas de 100 kg, se adiciona a través de una instalación con la capacidad de dosificar 10kg/h de ese elemento. Lo hace contando con dos unidades, de las cuales una se encuentra en reserva de la otra. [22]

En este caso, se ha decidido analizar y replantear si esa forma de cloro era la idónea para utilizarse en este proyecto. Por lo tanto, se contemplarán como opciones: El cloro puro o cloro gas, el cloro en forma de hipoclorito sódico (NaClO) y las pastillas de hipoclorito cálcico (Ca(ClO)<sub>2</sub>).

- Cloro gas:

Este método tradicional de cloración suele ser complicado y peligroso, por lo que requiere la implantación de sistemas para la neutralización de fugas como extractores de aire contaminado o la separación en salas independientes del cloro y el resto del equipo.

Aunque en Muskiz sean medidas ya aplicadas, el hecho de reducir riesgos justificaría el desmantelamiento de estos extractores. Los cuales, además, suponen gastos en mantenimiento y no se usan salvo en accidentes y fugas de remota posibilidad.

- Hipoclorito sódico ( $\text{NaClO}$ ):

Este derivado se suele utilizar en riquezas que rondan el 13-18% en Cloro. Es de uso habitual en estos últimos años, sobre todo en depuradoras pequeñas. Principalmente debido a su fácil instalación, basada en una bomba dosificadora que aspira del depósito el hipoclorito e inyecta la disolución de forma directa en el agua a tratar. [71]

- Hipoclorito cálcico ( $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ):

Debido a su elevado coste solo se utiliza para usos domésticos como pozos, piscinas, etc

#### *6.3.4 Solución adoptada*

Se ha optado por una cloración mediante hipoclorito de sodio, ya que es la más recomendable teniendo en cuenta este tipo de instalación y el tamaño que tiene la misma.

De esta forma el personal de explotación de la planta verá su peligro por exposición a fuga ampliamente reducido y la dirección de la planta se ahorrará, como se ha comentado, las operaciones de mantenimiento de los sensores y equipos de neutralización de la contaminación en el almacén y la zona de dosificación.

A nivel tecnológico no supondrá grandes cambios ni inversiones en infraestructura ya que al igual que en el tratamiento actual la instalación constará de un depósito de almacenamiento del  $\text{NaClO}$  que será inyectado, mediante bombas de impulsión, en la actual cámara de cloración.

### 6.3.5 Diseño y dosificación

Como ya se ha dicho, la idea es mantener la cámara de contacto ya construida en la EDAR de Muskiz.

Este tanque de cloración es un canal en forma de laberinto cuyas características principales, que se recogen junto a otras en los apartados 5.2 y 5.3 del Anejo: “Dimensionamiento del tratamiento terciario”, son las siguientes:

Volumen útil	200 m <sup>3</sup>
Tiempo de retención a caudal medio	1 hora
Diámetro	10 m
Lámina de agua	2,55 m
Profundidad de la cámara	3,8 m

Figura 39: Características tanque de cloración EDAR Muskiz. [72]

El canal es abierto y está construido en hormigón. Tiene planta circular con un volumen total de 298,5 metros cúbicos, de los cuales 98,5 los ocupan los resguardos y las paredes que dan forma al laberinto espiral de la cámara de contacto.

El agua circulará por el canal durante aproximadamente 1 hora, cumpliendo el requisito y la recomendación de 20-30 minutos mínimos de retención. Además, se demuestra que la capacidad de 200 m<sup>3</sup> es suficiente, y sobra, como para dar respuesta al caudal de 130 m<sup>3</sup>/h que se ha de tratar, considerando el citado tiempo de contacto. Aunque existe un by-pass a la entrada que conecta con la salida al río Barbadún

La dosis de cloro a aplicar se ha establecido en 2,5 mg por litro de agua a regenerar, de forma que se cubran con creces las posibles necesidades de esterilización en las etapas de distribución y almacenamiento.

Teniendo en cuenta que el caudal a tratar es de 130 m<sup>3</sup>/h y que la planta, y por ende el tratamiento de cloración, trabajará 24 horas al día, en la operación normal se requerirán 7,8 kg de Cloro activo diario. Esto supone 47 litros de la disolución de hipoclorito sódico al 15% de riqueza, que se dispondrá almacenado para dosificar mediante las bombas que ya existen en la cloración.

Para situar el depósito, se podrá aprovechar el espacio que ocupa la actual instalación de cloro. Las dimensiones del tanque de almacenamiento, con base circular de diámetro 1200 milímetros y altura total de 3,150 metros, permitirán contar con 3000 litros de NaClO. Capacidad suficiente como para cubrir un plazo de más o menos 2 meses, evitando así su evaporación.

### 6.3.6 *Funcionamiento*

Tras concluir el filtrado del agua, el efluente clarificado se dirigirá a la cámara de contacto.

Una vez allí, la disolución de NaClO se inyectará, desde el nuevo depósito, al inicio del canal de cloración gracias a las bombas dosificadoras Verderflex Dura 5 que ya tiene instaladas la depuradora en la base del depósito de cloro. Se utilizará una bomba con capacidad para suministrar 4L/h de hipoclorito de sodio, existiendo otra igual en reserva.

Tras mezclar el reactivo con el agua, el fluido circulará durante aproximadamente una hora por el canal laberíntico garantizando el tiempo de retención y contacto necesario para la correcta desinfección de seguridad.

Una vez finalizado el tratamiento, el agua se conducirá mediante un último tramo de tubería hasta el tanque de almacenamiento, para su posterior reutilización.

## 6.4 Depósito de almacenamiento del agua tratada

### 6.4.1 Introducción

Una vez finalizado el tratamiento terciario, el agua será almacenada hasta su posterior reutilización en Petronor.

Las condiciones de volumen y demanda de la refinería, que se detallan en el apartado 6.1 del Anejo de Dimensionamiento de tratamiento terciario, justifican y casi obligan a la introducción de un depósito en la superficie del solar del complejo de depuración de Muskiz

### 6.4.2 Objeto

La demanda de agua en las diferentes torres de refrigeración de la refinería de Petroleos del Norte está condicionada por diferentes factores que hacen que la utilización no sea inmediata ni regular en el tiempo.

Es por esto que se ha proyectado un depósito capaz de almacenar el efluente de agua durante aproximadamente 12 horas, con la intención de amortiguar los caudales necesarios para la reutilización.

### 6.4.3 Diseño

El depósito proyectado será de base circular y tanto el techo como el suelo y el cuerpo, se realizarán mediante paneles prefabricados de acero inoxidable soldados entre sí. Tendrá una capacidad aproximada de 1570 metros cúbicos, siendo sus dimensiones 20 metros de diámetro por 5 metros de altura.

En el hipotético y remoto caso de que el tanque se llene por completo, se pondrían en funcionamiento los by-passes para verter el agua al río Barbadún. Aunque teniendo en cuenta la gran capacidad del mismo y las necesidades del recurso que tiene la refinería no será una operación habitual, ni mucho menos.

## 7 Obra civil

La obra civil necesaria que se ha de realizar no requiere de actuación especial ninguna. Se dará prioridad al uso de elementos prefabricados con la intención de lograr una rápida puesta en servicio y una reducción de los tiempos de construcción del proyecto.

La obra comenzará con la formación de la explanada sobre la cual se dispondrán los distintos equipos. Se logrará, realizando un desbroce, limpieza y afianzamiento del terreno con tala del arbolado y la maleza de la zona.

Para el equipo de ultrafiltración teniendo en cuenta, como ya se dijo, que la práctica totalidad de la parcela de la EDAR de Muskiz está urbanizada de forma plana, a excepción de la zona donde está dispuesto el edificio de la obra de entrada que queda a una cota inferior, no será necesario acometer grandes operaciones de movimientos de tierra. Una vez esté el terreno en condiciones, hay que disponer un refuerzo y apoyo firme en forma de losa inferior de hormigón armado. Esta se colocará para soportar y sostener justo después el propio equipo de ultrafiltración más la nave prefabricada que se ha proyectado. Se resolverá con un hormigonado “in situ”, compuesto por 10 cm de espesor de hormigón de limpieza H10 seguido por una capa de 40 cm de hormigón H25 armado con acero B500S.

Paralelamente y de igual manera, se preparará la explanada sobre la cual, acto seguido, se va a comenzar a montar en superficie el depósito prefabricado del agua regenerada. (Se ha comprobado que la línea de alta tensión que pasa por encima queda fuera de la zona de afección del depósito tanto en las tareas de montaje y/o mantenimiento, como en su etapa de operación)

Por las elevadas cargas que se transmitirán al terreno, va a ser necesario disponer una losa de hormigón armado hecha in situ. Ésta tendrá 21 metros de diámetro, con tacón perimetral para evitar los movimientos relativos depósito-loso. Se realizará con una capa de 50 cm de un hormigón armado HA-25 con barras de acero B400-S. Por debajo se colocarán 10 cm de un hormigón de limpieza seguidos de una capa de grava de 15 centímetros.

El siguiente paso a realizar serán las excavaciones para la ejecución del depósito de aguas de lavado, el pozo de bombeo, la arqueta de salida de la decantación secundaria y los tramos soterrados de las diferentes tuberías. Todo ello se excavará principalmente en suelos.

La excavación del depósito para agua de lavado se ha proyectado, en principio, con taludes de 1/3 (H/V) en caso de tocar roca y 1/1 (H/V) en suelos, dejando cierta holgura para poder introducir el vaso rectangular. Una vez creado el hueco y preparada la superficie de contacto se coloca cuidadosamente el depósito encima de una solera fina prefabricada (10 cm), comprobando que quede bien nivelado.

Acto seguido se comenzará a llenar lentamente y se irá comprobando su posición y renivelando en caso de ser necesario.

Después habrá que rellenar la zona de excavación que ha quedado hueca tras la colocación del vaso con material de cantera, mediante arena o gravilla respetando los canales de tuberías y cableado.

El modus operandi a seguir con el pozo de bombeo y la arqueta de válvulas de salida del secundario es muy similar.

Por un lado para el pozo de bombeo, se dismantelará la arqueta actual y se reexcavará sobre el hueco que quede, otro con taludes 1/1. En el fondo se colocará una presolera prefabricada de unos 10 cm y se procederá a ensamblar y colocar el cubo contenedor. Dispuesto el pozo de bombeo, se rellenará el espacio que queda entre la excavación y el pozo de bombeo a base de material de cantera, teniendo siempre en cuenta el paso de tuberías y cableado de las bombas.

Por otro lado, y teniendo en cuenta que no se requerirá solera por la inexistencia de cargas o de necesidad de calidad en el hormigón del cubo contenedor, se ejecutará de la misma forma la excavación y posterior colocación del armazón prefabricado de hormigón de la arqueta de válvulas, proyectada para el control de la circulación de caudales de salida del secundario hacia el equipo de ultrafiltración.

Además es necesario realizar una importante red de colectores, construidos en acero, que conformen la línea del tratamiento terciario conectando las diferentes instalaciones. Habrá tramos que circulen en superficie y otros, como la parte final de la conexión entre el equipo de ultrafiltración y la cámara de cloración o el tramo que conecta esta última con el depósito, que discurrirán enterrados. Estos últimos se colocarán en zanja entibada con una cota de -1,50 metros respecto a la superficie y se apoyarán sobre una cama y refuerzo de

grava. El resto de la zanja se rellenará con las tierras propias previamente retiradas, realizando un acabado bien compactado.

En aquellos lugares en los que haya que levantar el asfalto de la actual urbanización, habrá que llevar a cabo una nueva disposición del mismo garantizando la uniformidad en la transmisión de esfuerzos pero teniendo en cuenta que el tráfico rodado que se espera es mínimo y ligero. Por lo que no exigirá grandes capacidades portantes ni paquetes de firmes de demasiada calidad. Se empleará la capa de firmes actualmente dispuesta T1 E2 124 con un parche bituminoso compuesto por una capa intermedia de 6 cm de AC Bin D y una de rodadura de 4 cm de AC16 surf S.

Estos escombros y el resto de material a desechar se llevarán a un vertedero del barrio de Putxeta en Abanto. Entre ida y vuelta el recorrido de los camiones será de 10 km aproximadamente.

## 8 Planificación de la obra

Para ayudar en la definición y concretar el alcance y la repercusión real del proyecto, se ha elaborado una planificación de las tareas a llevar a cabo en la obra.

Esas actividades que se han de desarrollar para materializar el proyecto las llevarán a cabo tres diferentes cuadrillas, integradas por profesionales competentes y preparados para las mismas. Podrán trabajar simultáneamente en determinadas tareas (marcadas en rojo) o cada una en una parte del proyecto.

Hay ciertas actividades que para que puedan comenzar a realizarse requieren que otras estén previamente finalizadas.

Además, existirá un equipo ajeno que hará un seguimiento continuo y en paralelo de determinados aspectos de las diferentes etapas y tareas de la obra.

Finalmente, y antes de dar por finalizado el proyecto, se procederá a un breve periodo de prueba de las instalaciones para garantizar que todo funciona según lo previsto.

Para que resulte todo más visual, se presenta un diagrama de Gantt de la planificación. Donde se muestra de forma clara las actuaciones a llevar a cabo, los tiempos empleados para las mismas y el orden de ejecución que se ha de llevar.



## 9 Resumen del Presupuesto

El presupuesto total, destacado por capítulos, es el siguiente:

<b>1. Preparación del terreno</b>	788,04 €
<b>2. Cimentaciones “in situ”</b>	35.907,6088 €
<b>3. Conducciones y válvulas</b>	29.725,3973 €
<b>4. Depósito de aguas regeneradas</b>	841.177,648 €
<b>5. Etapa de lavado</b>	25.801,96 €
<b>6. Etapa filtración</b>	114.219,4 €
<b>7. Edificio Ultrafiltración</b>	21.200 €
<b>8. Cloración y control de calidad</b>	7.321 €
<b><u>PRESUPUESTO EJECUCIÓN MATERIAL DE LA OBRA</u></b>	<b>1.076.141,05 €</b>

Si a esto se le suma el PEM derivado del Estudio de Seguridad y Salud, que es de 10.266,37 €, El Presupuesto de Ejecución Material total del proyecto es:

<b><u>TOTAL PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL DEL PROYECTO</u></b>	<b>1.086.407,42 €</b>
--	-----------------------

El Presupuesto de Ejecución Material total asciende a la cantidad de; **UN MILLÓN OCHENTA Y SEIS MIL CUATROCIENTOS SIETE EUROS CON CUARENTA Y DOS CÉNTIMOS.**

<b>Presupuesto de Ejecución Material</b>	1.086.407,42 €
<b>Gastos Generales (13%)</b>	141.232,965 €
<b>Beneficio Industrial (6%)</b>	65.184,4454 €
Presupuesto de Licitación sin IVA	1.292.824,83 €
<b>IVA de la cantidad anterior (21%)</b>	271.493,215 €
<b><u>TOTAL PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN POR CONTRATA DEL PROYECTO</u></b>	1.564.318,05 €

El Presupuesto de Ejecución por Contrata del proyecto “Ampliación de la EDAR de Muskiz (Bizkaia) para la reutilización industrial del agua tratada” asciende a la cantidad de; **UN MILLÓN QUINIENTOS SESENTA Y CUATRO MIL TRESCIENTOS DIECIOCHO EUROS CON CINCO CÉNTIMOS.**

## 10 Conclusiones

Las principales conclusiones obtenidas mediante la realización de este proyecto son las siguientes:

- ✓ El concepto de reutilización de aguas tiene una importancia vital para evitar el agotamiento de recursos y a la vez, minorar la contaminación por vertido a cauce natural. Debido al alto consumo que conlleva es especialmente importante plantear dicha reutilización para uso industrial.
- ✓ Los procesos de membrana son tecnologías a tener en cuenta en la depuración de aguas, en detrimento de otras más tradicionales, por integrar en un único equipo de dimensiones reducidas tratamientos físicos y biológicos. Además, garantizan un alto rendimiento bajo dispares condiciones del agua de alimentación y un mantenimiento bastante sencillo y mecánico.
- ✓ Es inevitable el uso de una mínima cloración para asegurar la calidad bacteriológica marcada por la legislación para la reutilización del agua en la industria.

## 11 Normativa

El proyecto de ampliación de la EDAR de Muskiz deberá cumplir y respetar la normativa vigente para este tipo de instalaciones y el marco que la rodea. Lo hará en el ámbito Europeo, Nacional, Autonómico y Local. Por lo tanto se recoge la reglamentación considerada explícita o implícitamente para la realización de este trabajo:

### Directivas Europeas:

- Directiva 92/43/CEE del 21 de mayo de 1992, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y la flora silvestres.
- Directiva 2009/147/CE del 30 de noviembre de 2009, relativa a la conservación de las aves silvestres.
- Directiva 2000/60/CE del 23 de octubre del 2000, por la que se establece un marco comunitario en el ámbito de la política de aguas.
- Directiva 91/271/CEE del 21 de mayo, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- Directiva 2006/42/CE del 17 de mayo de 2006, relativa a las máquinas.
- Directiva 2004/108/CE de 15 de diciembre de 2004, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros en materia de compatibilidad electromagnética.
- Directiva 2006/95/CE de 12 de diciembre de 2006, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre el material eléctrico destinado a utilizarse con determinados límites de tensión.

### Normativa Nacional:

- Ley 42/2007, de 13 de diciembre, Incorpora al ordenamiento jurídico español la Directiva 92/43/CEE de Hábitats y la Directiva 2009/147/CE de Aves de la Unión Europea.
- Ley 41/2010, de 29 de diciembre, de protección del medio marino crea y regula la Red de Áreas Marinas Protegidas de España, de la que podrán formar parte las Zonas Especiales de Conservación y las Zonas de Especial Protección para las Aves, de la Red Natura 2000.
- Real Decreto Legislativo 1/2001 del 20 de Julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas. (última modificación 07/03/2018)
- Real Decreto 8549/1986 del 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico.

- Real Decreto 1620/2007 del 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas.
- Orden SCO/778/2009 del 17 de marzo, sobre métodos alternativos para el análisis microbiológico del agua para consumo humano. (Cuyos métodos son extrapolables a la medición de parámetros de aguas residuales y regeneradas)
- Real Decreto 865/2003 del 4 de julio, por el que se establecen los criterios higiénico-sanitarios para la prevención y control de la Legionelosis.
- Real Decreto 907/2007 del 6 de Julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Planificación Hidrológica.
- Ley 22/1988 del 28 de julio, de Costas (última modificación 11/12/2015)
- Real Decreto 509/1996 del 15 de marzo de desarrollo del RD-ley 11/1995, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.
- Orden ARM/1312/2009 del 20 de mayo, por la que se regulan los sistemas para realizar el control efectivo de los volúmenes de agua utilizados por los aprovechamientos de agua del dominio público hidráulico, de los retornos al citado dominio público hidráulico y de los vertidos al mismo.
- Ley 20/2009 del 4 de diciembre, de prevención y control ambiental de las actividades.
- Ley 16/1986 del 25 de abril, de desarrollo de actuaciones para la promoción y mejora de los sistemas de eliminación y tratamiento de residuos líquidos.
- Real Decreto 1341/2007 del 11 de octubre, sobre la gestión de la calidad de las aguas de baño.
- Real Decreto 1247/2008 del 18 de julio, por el cual se aprueba la Instrucción de Hormigón Estructural, EHE-08.

#### Normativa País Vasco:

- DECRETO 215/2012, de 16 de octubre, por el que se designan Zonas Especiales de Conservación catorce ríos y estuarios de la región biogeográfica atlántica y se aprueban sus medidas de conservación.

### Normativa aparte (UNE, ASTM, Guías, Instrucciones técnicas..)

- Guía técnica para la prevención y control de la Legionelosis
- Norma UNE 100030:2017. Prevención y control de la proliferación y diseminación de Legionella en instalaciones.
- Norma UNE-EN 340 EPIS.
- Norma UNE-EN 1508:1999, Para depósitos “Abastecimiento de agua. Requisitos para sistemas y componentes para el almacenamiento de agua”.
- Norma UNE EN 752- 4:1997.
- Norma UNE-EN 809/AC: 2002. Bombas y grupos motobombas para líquidos. Requisitos comunes de seguridad.
- Norma UNE-EN ISO 12100-1:2003. Seguridad de las máquinas. Conceptos básicos, principios generales para el diseño. Parte 1: Terminología básica, metodología.
- Norma UNE-EN ISO 12100-2:2003. Seguridad de las máquinas. Conceptos básicos, principios generales para el diseño. Parte 2: Principios técnicos.
- Norma UNE-EN 60034. Máquinas eléctricas rotativas. Características asignadas y características de funcionamiento.
- UNE-EN 61.000-6. Compatibilidad electromagnética (CEM). Parte 6: Normas genéricas.
- UNE-EN 12050. Plantas elevadoras de aguas residuales para edificios e instalaciones. Principios de construcción y ensayo.
- ITC MIE APQ-3: Almacenamiento Cloro.
- ITC MIE-APQ-6: Almacenamiento de líquidos corrosivos.
- Normativa UNE-EN ISO/IEC 17025 para los sistemas de control de los análisis y muestreos rutinarios.
- Norma ISO 11731 parte 1. Detección y enumeración de Legionella.
- Código API 650 sobre Tanques de Almacenamiento.
- NTP 494: Soldadura eléctrica al arco: Normas de seguridad.
- Normas UNE 80 serie 300 de hormigón en masa o armado.
- ASTM C465: Especificaciones sobre aditivos en hormigón.
- Normas UNE serie 36 sobre materiales siderúrgicos.
- MV-102 de acero para hormigón armado.
- Norma UNE 7278 de inspección de chapas por ultrasonidos.
- Normas UNE sobre válvulas.

### Ordenanzas municipales:

- El Ayuntamiento de Muskiz no cuenta con normativa municipal aplicable al marco del proyecto objeto de estudio.

Además de todo esto habrá que considerar lo recogido, directa e indirectamente, en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares y en el Estudio de Seguridad y Salud del proyecto, a pesar de que no se haya citado en este apartado, por tener un alcance más específico.

## 12 Bibliografía

- [1] Forociudad, información y foros de todas las localidades de España. “Demografía de Muskiz (Vizcaya)”. <<https://www.forociudad.com/vizcaya/muskiz/habitantes.html>> [Consulta: 2 de febrero de 2018]
- [2] Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Biodiversidad, Especies Protegidas, Red Natura 2000. “Barbadungo Itsasadarra/Ría del Barbadún” SiteCode: ES2130003, Type:B. Update date: Julio 2016. <[http://www.mapama.gob.es/es/biodiversidad/temas/espacios-protegidos/es2130003\\_tcm30-203591.pdf](http://www.mapama.gob.es/es/biodiversidad/temas/espacios-protegidos/es2130003_tcm30-203591.pdf)> [Consulta: 2 de Febrero de 2018]
- [3] Agencia Vasca del agua. Visor de mapas de URA <<http://www.uragentzia.euskadi.eus/appcont/gisura/>> [Consulta: 2 de febrero de 2018]
- [4] Archivo Greenpeace Spain. “Petronor, maestros en burlar la ley de costas” Enero 2011. <<http://archivo-es.greenpeace.org/espana/es/Blog/petronor-maestros-en-burlar-la-ley-de-costas/blog/32377/>> [Consulta: 3 de febrero de 2018]
- [5] Wikipedia, enciclopedia de contenido libre. “Muskiz” <<https://es.wikipedia.org/wiki/Musques>> [Consulta: 2 de febrero de 2018]
- [6] Petronor. “Historia” <<http://petronor.eus/es/sobre-petronor/historia/>> [Consulta: 3 febrero de 2018]
- [7] Leonardo J. “Petronor, un estudio histórico-sociológico de la influencia de la refinera en los municipios de su entorno”. DeustoDigital, 2014.
- [8] Bizkaiko Foru Aldundia/Diputación Foral de Bizkaia. “Barbadún” <[http://www.bizkaia.eus/home2/Temas/DetalleTema.asp?Tem\\_Codigo=2629&idioma=CA&dpto\\_biz=2&codpath\\_biz=2|347|2550|2629](http://www.bizkaia.eus/home2/Temas/DetalleTema.asp?Tem_Codigo=2629&idioma=CA&dpto_biz=2&codpath_biz=2|347|2550|2629)> [Consulta: 3 de febrero de 2018]

- [9] Petronor. “Manual de gestión del agua” [http://petronor.eus/wp-content/uploads/2015/05/Manual\\_gestion\\_agua.pdf](http://petronor.eus/wp-content/uploads/2015/05/Manual_gestion_agua.pdf) [Consulta: 4 de febrero de 2018]
- [10] Extracto de un libro del Instituto Geológico y Minero de España. Ministerio de Economía, Industria y Competitividad. “Reutilización de las Aguas Residuales” [http://aguas.igme.es/igme/publica/libro33/pdf/lib33/cap\\_2\\_a.pdf](http://aguas.igme.es/igme/publica/libro33/pdf/lib33/cap_2_a.pdf) [Consulta: 7 de febrero de 2018]
- [11] Interempresas. “¿A qué usos se destinan las aguas residuales?” <http://www.interempresas.net/Quimica/Articulos/100020-A-que-usos-se-destina-la-reutilizacion-de-aguas-residuales.html> [Consulta: 7 de febrero de 2018]
- [12] Información EDAR Muskiz <http://wikimapia.org/16782266/es/E-D-A-R-Muskiz> [Consulta: 11 de febrero de 2018]
- [13] IAgua Data. EDAR Muskiz <https://www.iagua.es/data/infraestructuras/edar/muskiz> [Consulta: 11 de febrero de 2018]
- [14] GeoEuskadi, Infraestructura de datos espaciales. “Visor mapas GeoEuskadi” <http://www.geo.euskadi.eus/s69-bisorea/es/x72aGeoEuskadiWAR/index.jsp> [Consulta: 11 de febrero de 2018]
- [15] Muskiz Udala. “Incidencia en la playa de La Arena (Muskiz – Zierbena)” [http://www.muskiz.org/es-ES/Noticias/Paginas/IncidenciaenlaplayadeLaArena\(MuskizyZierbena\).aspx](http://www.muskiz.org/es-ES/Noticias/Paginas/IncidenciaenlaplayadeLaArena(MuskizyZierbena).aspx) [Consulta: 17 de febrero de 2018]
- [16] Blogspot, Haixeder. “Playa La Arena: Mil historias que contar (capítulo I)” Febrero 2013 <http://haixeder.blogspot.com/2013/02/playa-la-arena-mil-historias-que-contar.html> [Consulta: 4 de febrero de 2018]
- [17] Petronor. Notas de prensa. “Excelente, la calidad del agua de la playa de Muskiz y Zierbena” Agosto 2017 <http://petronor.eus/es/2017/08/excelente-la-calidad-del-agua-de-la-playa-de-muskiz-y-zierbena/> [Consulta: 4 de febrero de 2018]
- [18] Gazteluberri, Petronor. “Una carrera de relevos, una nueva etapa”. <https://es.slideshare.net/Petronor/gazteluberri-78> [Consulta: 17 de febrero de 2018]

- [19] Bizkaiko Foru Aldundia/Diputación Foral de Bizkaia. Departamento de Obras Públicas y Transportes. “Mapa de carreteras de Bizkaia”  [<http://www.bizkaia.eus/home2/Archivos/DPTO6/Temas/Pdf/mapa\\_bizkaia\\_2015.pdf?hash=6f72de6ebe6d1910d94e960ebd3373e0&idioma=CA>](http://www.bizkaia.eus/home2/Archivos/DPTO6/Temas/Pdf/mapa_bizkaia_2015.pdf?hash=6f72de6ebe6d1910d94e960ebd3373e0&idioma=CA) [Consulta: 18 de febrero de 2018]
- [20] Arenas & Asociados. Catálogo de proyectos. “Viaducto de La Arena”.  [<www.arenasing.com/proyectos/puentes-viarios/viaducto-de-la-arena>](http://www.arenasing.com/proyectos/puentes-viarios/viaducto-de-la-arena) [Consulta: 11 de febrero de 2018]
- [21] Bizkaiko Foru Aldundia/Diputación Foral de Bizkaia. “Distribución Cartográfica”  [<http://apps.bizkaia.net/GRIT/ml\\_GRIT\\_Marcos.jsp?IDIOMA=C>](http://apps.bizkaia.net/GRIT/ml_GRIT_Marcos.jsp?IDIOMA=C) [Consulta: 11 de febrero de 2018]
- [22] Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia, Dirección de Explotación EDAR Muskiz. “Datos medios de las calidades de agua del año 2017”. Contacto vía correo electrónico: Urko Sagasti Bilbao
- [23] Última modificación 12 de septiembre del 2015 del RD-ley 11/1995 de tratamiento de las aguas residuales urbanas. (Normativa de vertido)  [<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1996-7159>](https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1996-7159) [Consulta: 16 de mayo de 2018]
- [24] Anexo IA del Real Decreto de 1620/2007 de reutilización de las aguas depuradas.  [<https://www.boe.es/boe/dias/2007/12/08/pdfs/A50639-50661.pdf>](https://www.boe.es/boe/dias/2007/12/08/pdfs/A50639-50661.pdf) [Consulta: 21 de febrero de 2018]
- [25] Ríos-Tobón S, Agudelo-Cadavid RM, Gutiérrez-Builes LA. Patógenos e indicadores microbiológicos de calidad del agua para consumo humano. Rev. Fac. Nac. Salud Pública, 2017; 35(2): 236-247. DOI: 10.17533/udea.rfnsp.v35n2a08  [<http://www.scielo.org.co/pdf/rfnsp/v35n2/0120-386X-rfnsp-35-02-00236.pdf>](http://www.scielo.org.co/pdf/rfnsp/v35n2/0120-386X-rfnsp-35-02-00236.pdf) [Consulta: 21 de febrero de 2018]
- [26] Álvarez A. Morales F., Hurtado N. “Procedimiento para el diseño de una planta de tratamiento de efluentes industriales”. Universidad Simón Bolívar. Coordinación de Ingeniería Química. Octubre 2009.  [<http://159.90.80.55/tesis/000145003.pdf>](http://159.90.80.55/tesis/000145003.pdf) [Consulta: 23 de febrero de 2018]
- [27] Osorio Robles Francisco, Torres Rojo Juan Carlos, Sánchez Bas Mercedes y Colaboradores. “Tratamiento de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes contaminantes”. Junio 2011. [Consulta: 23 de febrero de 2018]

- [28] Simulaciones y proyectos, knowledge from simulation. “Evaluación del tiempo de contacto efectivo en tanques de cloración mediante simulación numérica CFD (parte I). [<https://www.simulacionesyproyectos.com/category/blog-simulacion/entrada-del-blog-relativa-a-industria/>](https://www.simulacionesyproyectos.com/category/blog-simulacion/entrada-del-blog-relativa-a-industria/) [Consulta: 23 de febrero de 2018]
- [29] Topozono, Ingeniería medioambiental para la Desinfección definitiva y ecológica del Aire y del Agua. “Tratamiento agro-ecológico con ozono para agua de riego” <http://www.topozono.com/MegaArchivos/Tratamiento%20Agro-ECologico%20con%20OZONO%20para%20Agua%20de%20Riego.pdf> [Consulta: 3 marzo de 2018]
- [30] Salveco Proyectos SL, Formación y creación de Ozono. “Generadores de Ozono”. <http://www.salvecoproyectos.com/ozono.htm> [Consulta: 3 de marzo de 2018]
- [31] Wikipedia, enciclopedia de contenido libre. “[Espectrofotometría](https://es.wikipedia.org/wiki/Espectrofotometr%C3%ADa)” <https://es.wikipedia.org/wiki/Espectrofotometr%C3%ADa> [Consulta: 4 marzo de 2018]
- [32] United States Environmental Protection Agency. “Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Desinfección con luz ultravioleta”. Septiembre 1999 <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/cs-99-064.pdf> [Consulta: 8 de marzo de 2018]
- [33] Wikipedia, enciclopedia de contenido libre. “[Fotorreactivación](https://es.wikipedia.org/wiki/Fotorreactivaci%C3%B3n)” <https://es.wikipedia.org/wiki/Fotorreactivaci%C3%B3n> [Consulta: 11 de marzo de 2018]
- [34] Aguas Industriales, Gestión de aguas industriales. “Tratamientos de agua para Bodegas: Desinfección mediante radiación Ultravioleta en Bodegas” <http://aguasindustriales.es/tratamientos-de-aguas-para-bodegas-desinfeccion-mediante-radiacion-ultravioleta-en-bodegas/> [Consulta: 8 de marzo de 2018]
- [35] Valencia Montero V, Acero Plazas V. “Comparación de ácido láctico, ácido peroxiacético e hipoclorito de sodio en la desinfección de canales bovinas en un frigorífico de Bogotá, Colombia”. Rev Med Vet. 2013;(26):13-23. <http://www.scielo.org.co/pdf/rmv/n26/n26a02.pdf> [Consulta: 16 de marzo de 2018]
- [36] Solvay, asking more from chemistry. “Aplicaciones. Agua Potable, Aguas Residuales y Ríos.” <https://www.peroxidos.com.br/es/aplicacoes/agua-para-consumo-humano/index.html> [Consulta: 17 de marzo de 2018]

- [37] Diario Expansión. “Listado empresa de Industria Textil” <http://www.expansion.com/empresas-de/industria-textil/vizcaya/> [Consulta: 17 de marzo de 2018]
- [38] Pérez Fernández D. Alejandro. “Optimización de parámetros de operación en procesos de ultrafiltración para eliminación de materia orgánica en la regeneración de aguas de proceso de una industria papelera”. TFM UPV, Septiembre 2017.  
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/89492/P%C3%89REZ%20-%20Optimizaci%C3%B3n%20de%20par%C3%A1metros%20de%20operaci%C3%B3n%20en%20proceso%20de%20ultrafiltraci%C3%B3n%20para%20la%20eliminaci%C3%B3n....pdf?sequence=1> [Consulta: 17 de marzo de 2018]
- [39] Artículo de investigación, Departamento de Zoología de la Universidad de Sevilla. “Determinan nuevos nematodos presentes en aguas depuradas” <https://investigacion.us.es/noticias/389> [Consulta: 25 de marzo de 2018]
- [40] Grupo OX, made in Spain. “Control y prevención de la Legionella”. <http://grupoox.com/legionela.php> [Consulta: 25 de marzo de 2018]
- [41] Fundación para el Conocimiento madri+d. “Tratamiento electroquímico de aguas residuales” <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2010/09/17/131491> [Consulta: 28 de marzo de 2018]
- [42] Ortiz Uribe Inmaculada, Mosquera- Corral Anuska, Lema Rodicio Juan, Esplugas Santiago. “Advanced Technologies for Water Treatment and Reuse” Agosto 2015.
- [43] Porex Filtration Group. “Membranas tubulares en las tecnologías y sistemas industriales de filtración de aguas residuales”. <http://www.porexfiltration.com/espanol/centro-de-aprendizaje/tecnologia/tmf-industriales-aguas-residuales/> [Consulta: 11 de abril de 2018]
- [44] Instituto de Tecnologías Rurales A.C. “Filtración por membranas de fibras huecas” <https://www.aqualimpia.mx/pages/tecnologia> [Consulta: 14 de abril de 2018]
- [45] Ecotec, grupo TECSA. “Módulos de Membranas MBR” <http://www.ecotec.es/modulos-de-membrana-mbr.php> [Consulta: 14 de abril de 2018]
- [46] LinkedIn, Núñez Casanovas Alejandro. “Ósmosis Inversa con sistema de membrana en espiral” <https://es.linkedin.com/pulse/%C3%B3smosis-inversa-alejandro-nu%C3%B1ez-casanovas> [Consulta: 20 de abril de 2018]

- [47] Cordorchem Envitech, Smart ideas for wastewater & air treatment. “Tratamiento de aguas residuales: tipos de membranas de filtración y posibles configuraciones” [<https://blog.condorchem.com/tratamiento-de-aguas-residuales-tipos-de-membranas-de-filtracion-y-posibles-configuraciones/>](https://blog.condorchem.com/tratamiento-de-aguas-residuales-tipos-de-membranas-de-filtracion-y-posibles-configuraciones/) [Consulta: 8 de abril de 2018]
- [48] D. Vázquez R., Edgardo. “Estudio de Biorreactor de Membrana para el Tratamiento de Aguas Residuales Urbanas” TFM UA, Julio 2015  [<https://iuaca.ua.es/es/master-agua/documentos/-gestadm/trabajos-fin-de-master/tfm09/tfm09-edgardo-vasquez-rodriguez.pdf>](https://iuaca.ua.es/es/master-agua/documentos/-gestadm/trabajos-fin-de-master/tfm09/tfm09-edgardo-vasquez-rodriguez.pdf) [Consulta: 9 de abril de 2018]
- [49] Huerta Ochoa Sergio. Planta Piloto de Fermentaciones, Departamento de Biotecnología. “Procesos de Membrana” UAM-Iztapalapa.  [<http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/sho/Procesos\\_de\\_Membrana.pdf >](http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/sho/Procesos_de_Membrana.pdf) [Consulta: 11 de abril de 2018]
- [50] Instituto de Tecnologías Rurales A.C. “Filtración por membranas de fibras huecas”  [<https://www.aqualimpia.mx/pages/tecnologia>](https://www.aqualimpia.mx/pages/tecnologia) [Consulta: 20 de abril de 2018]
- [51] Van der Bruggen, B., Vandecasteele, C., Van Gestel, T., Doyen, W., Leysen, R., 2003. A review of pressure-driven membrane processes in wastewater treatment and drinking water production. Environ. Prog. Sustain. 22, 46-56.  [<https://doi.org/10.1002/ep.670220116>](https://doi.org/10.1002/ep.670220116) [Consulta: 27 de abril de 2018]
- [52] Apuntes Ingeniería Civil EHU 17-18 de la asignatura Proyectos de Ingeniería. Adaptados del libro “Oficina Técnica” de Alonso, J.M., Aperribay, V., Martín, I., Jiménez, T., Bilbao. 2000
- [53] Oxidine, Water Technology. “Reducción de sólidos”  [<http://www.oxidine.net/productos/reduccion-de-solidos/>](http://www.oxidine.net/productos/reduccion-de-solidos/) [Consulta: 5 de mayo de 2018]
- [54] Blog de la empresa: Aguas del Mare Nostrum, Valencia. Tema : “Eliminación de la turbidez del agua. Tratamientos del agua”.  [<http://blog.amnsl.com/2010/06/eliminacion-de-la-turbidez-del-agua.html>](http://blog.amnsl.com/2010/06/eliminacion-de-la-turbidez-del-agua.html) [Consulta: 16 de mayo de 2018]
- [55] Winkler Ltda Detergentes. “Desiperox, Ácido Peracético”  [<http://winklerltda.cl/detergentesv2/wp-content/uploads/2017/05/ft-DESIPEROX-15.pdf>](http://winklerltda.cl/detergentesv2/wp-content/uploads/2017/05/ft-DESIPEROX-15.pdf) [Consulta: 25 de mayo de 2018]

- [56] Euskadi.eus. Información, trámites y servicios del Gobierno Vasco. Plataforma contratación pública en Euskadi. “Redacción del proyecto, ejecución de obra y explotación de la ampliación de la estación depuradora de aguas residuales de Muskiz” [http://www.contratacion.euskadi.eus/w32-1084/es/contenidos/anuncio\\_contratacion/expjaso11013/es\\_doc/es\\_arch\\_expjaso11013.html?ruta=/w32-1081/es/v79aWar/comunJSP/v79aHome.jsp](http://www.contratacion.euskadi.eus/w32-1084/es/contenidos/anuncio_contratacion/expjaso11013/es_doc/es_arch_expjaso11013.html?ruta=/w32-1081/es/v79aWar/comunJSP/v79aHome.jsp) [Consulta: 10 de junio de 2018]
- [57] Google Earth Pro. [Consulta: 12 de junio de 2018]
- [58] Fluytec filtration technologies. Catálogo de productos: “UltraFiltration Standard Systems” [http://www.fluytec.com/pdf/ultrafiltracion\(esp\).pdf](http://www.fluytec.com/pdf/ultrafiltracion(esp).pdf) [Consulta: 11 de junio de 2018]
- [59] Culligan Water. Catálogo de productos industriales: “Ultrafiltración” [http://www.culligan.es/wp-content/uploads/CL\\_Catalogo\\_Ultrafiltracion\\_2012.pdf](http://www.culligan.es/wp-content/uploads/CL_Catalogo_Ultrafiltracion_2012.pdf) [Consulta: 11 de junio de 2018]
- [60] Apuntes Escuela Universitaria de Ingeniería Agrícola de Ciudad Real. “Pérdidas de carga localizadas o accidentales” [https://previa.uclm.es/area/ing\\_rural/Trans\\_hidr/Tema8.PDF](https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Trans_hidr/Tema8.PDF) [Consulta: 14 de junio de 2018]
- [61] Aula Virtual Universidad de Granada. “Diseño del sistema de tuberías y cálculo de las bombas” <http://www.ugr.es/~aulavirtualpfcig/descargas/documentos/BOMBAS%20Y%20TUBERIAS.pdf> [Consulta: 14 de junio de 2018]
- [62] Camacho García A., Abellán Gómez J., Palacios López J.C. (2010) “Guía para la aplicación del R.D 1620/2007 por el que se establece el Régimen Jurídico de la Reutilización de las Aguas Depuradas” Centro de publicaciones del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino
- [63] Wikipedia, enciclopedia de contenido libre. “Tornillo de Arquímedes” <https://es.wikipedia.org/wiki/Musques> [Consulta: 16 de junio de 2018]
- [64] Universidad de Salamanca. Departamento de Ingeniería Mecánica. “Transportadores por roca, tornillo de Arquímedes” <http://dim.usal.es/areaim/guia%20P.%20/roscas%20helicodales.htm> [Consulta: 16 de junio de 2018]

- [65] Segura Cobo, José Carlos. “Maquinaria para tratamiento y depuración de aguas”, Bellisco Ediciones 2009.
- [66] SlidePlayer. United Nations Industrial Development Organization. “Introduction to the treatment of tannery effluents” [<http://slideplayer.com/slide/3453785/>](http://slideplayer.com/slide/3453785/) [Consulta: 16 de junio de 2018]
- [67] Hideco, Equipos y Tratamientos del Agua. “Instalaciones de bombeo”  [<https://www.hideco.es/proyectos/72/desbaste-tamizado-y-bombeo-de-agua-residual/1/4>](https://www.hideco.es/proyectos/72/desbaste-tamizado-y-bombeo-de-agua-residual/1/4) [Consulta: 30 de junio de 2018]
- [68] Techisal, Tecnologías Hidráulicas Salmantinas. “Estación de bombeo de aguas residuales en Alba de Tormes”  [<http://www.techisal.com/servicios/obras-de-saneamiento/estacion-de-bombeo-de-aguas-residuales-en-alba-de-tormes/>](http://www.techisal.com/servicios/obras-de-saneamiento/estacion-de-bombeo-de-aguas-residuales-en-alba-de-tormes/) [Consulta: 30 de junio de 2018]
- [69] Anexo IB del Real Decreto de 1620/2007 de reutilización de las aguas depuradas.  [<https://www.boe.es/boe/dias/2007/12/08/pdfs/A50639-50661.pdf>](https://www.boe.es/boe/dias/2007/12/08/pdfs/A50639-50661.pdf) [Consulta: 30 de junio de 2018]
- [70] Anexo IC del Real Decreto de 1620/2007 de reutilización de las aguas depuradas.  [<https://www.boe.es/boe/dias/2007/12/08/pdfs/A50639-50661.pdf>](https://www.boe.es/boe/dias/2007/12/08/pdfs/A50639-50661.pdf) [Consulta: 30 de junio de 2018]
- [71] Waterluxe. “Hipoclorito sódico”  [<https://waterluxe-osmosis.es/hipoclorito-sodico/>](https://waterluxe-osmosis.es/hipoclorito-sodico/) [Consulta: 6 de julio de 2018]
- [72] Bilbao Bizkaia Ur Patzuergoa. Memoria Técnica EDAR de Muskiz año 2010
- [73] Sulzer. “Bombas Sumergibles para Aguas Residuales Gama ABS XFP 80C a 210G”  [<https://www.sulzer.com/-/media/files/products/pumps/submersible-pumps/product-information/submersible-heavy-duty-pumps/submersible-sewage-pump-type-abs-xfp/technical-data-sheets/xfp\\_80c\\_201g\\_tds.ashx?la=es-es>](https://www.sulzer.com/-/media/files/products/pumps/submersible-pumps/product-information/submersible-heavy-duty-pumps/submersible-sewage-pump-type-abs-xfp/technical-data-sheets/xfp_80c_201g_tds.ashx?la=es-es) [Consulta: 27 junio de 2018]
- [74] Universidad de Salamanca, Centro de investigación y Desarrollo tecnológico del agua (CIDTA). “Aguas residuales. Composición”  [<http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas\\_Residuales\\_composicion.pdf>](http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf) [Consulta: 2 de julio de 2018]

[75] Plomysan, Informe técnico. “Ventajas diferenciales del PP respecto al PVC-U”

<http://pre.pt/eurotubo/pdf/Produtos/Tubo%20e%20Acess.%20Corrugados/Catalogo/Catalogo%20Plomysan.pdf> [Consulta: 2 de julio de 2018]

[76] Centro Canario del Agua. “Cálculo del índice de ensuciamiento de las membranas”

[http://fcc.a.es/documentos/05\\_documentos\\_por\\_temas/Estandares%20de%20calidad%20de%20las%20aguas%20Calculos%20de%20indices%20de%20calidad/Calculo%20SDI.pdf](http://fcc.a.es/documentos/05_documentos_por_temas/Estandares%20de%20calidad%20de%20las%20aguas%20Calculos%20de%20indices%20de%20calidad/Calculo%20SDI.pdf) [Consulta: 3 de julio de 2018]

[77] Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, Área de Química General. “Cambios físicos y químicos”

<https://es.scribd.com/doc/52703120/Laboratorio-de-Quimica-Separacion-Por-Metodos-Fisicos> [Consulta: 3 de julio de 2018]

[78] PATEC GRUPO DE EMPRESAS. “Naves prefabricadas, precios en función de características”

<https://www.patec.org/naves-prefabricadas-precios.php> [Consulta: 10 de julio de 2018]

[79] ZENIT, water solutions. “Bombas sumergibles para drenaje y elevación en instalaciones civiles e industriales. Serie Grey, catalogo”

<http://www.zenit.com/Zenit/media/Docs/es/Catalogues/Zenit-Grey-Series-catalogo-bombas-sumergibles.pdf> [Consulta: 3 de julio de 2018]

[80] Ayuntamiento de Torremolinos, Aguas de Torremolinos. “Cortes programados 25/06/2018”

<http://www.aguasdetorremolinos.es/ESP/738.asp> [Consulta: 25 de junio de 2018]

[81] Aigües de Mataró. “Cortes de suministro”

<https://www.aiguesmataro.com/es/cortes-de-suministro> [Consulta: 25 de junio de 2018]

[82] Periódico el Comercio. Asturias, Siero y centro. “Corte de agua que no afectará al suministro”

<http://www.elcomercio.es/asturias/siero-centro/corte-agua-afectara-20180623001559-ntvo.html> [Consulta: 25 de junio de 2018]

[83] Aguas de Albacete. “Cortes programados de agua en la red de distribución”

<http://www.aguasdealbacete.com/ESP/736.asp> [Consulta: 25 de junio de 2018]

[84] Aquavall, Aguas Valladolid. “Cortes e incidencias”

<http://aquavall.es/category/cortes/> [Consulta: 25 de junio de 2018]

- [85] Aerzen, expect performance. “Positive displacement blowers, Delta blower generation 5 E.Design, Catalogo”  
<<https://www.aerzen.com/es/producto/equipos-soplantes-delta-blower-generation-5.html>> [Consulta: 4 de julio de 2018]
- [86] BIOTanks, depósitos y sistemas de depuración. “Catálogo de tanques 2017”  
<<https://biotanks.es/wp-content/uploads/2016/12/catalogo-biotanks-2017.pdf>> [Consulta: 6 de julio de 2017]
- [87] Lenntech BV, tratamiento y purificación del agua. “Desinfectantes hipoclorito de sodio”  
<<https://www.lenntech.es/procesos/desinfeccion/quimica/desinfectantes-hipoclorito-de-sodio.htm>> [Consulta: 6 de julio de 2018]
- [88] Eugenio Vico P. “Diseño y construcción de un depósito para el almacenamiento de agua potable”. PFG Universidad de Cantabria. Julio de 2017  
<<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/12150/399754.pdf?sequence=1>> [Consulta: 8 de julio de 2018]
- [89] Iberdrola Distribución Eléctrica. “Seguridad en las obras con proximidad de líneas eléctricas”  
<[https://www.fenercom.com/pages/pdf/formacion/14-06-03\\_Jornada%20sobre%20localizaci%C3%B3n%20de%20infraestructuras%20de%20suministros%20energ%C3%A1ticos%20y%20seguridad%20en%20obras/5-SEGURIDAD-EN-LAS-OBRAS-CON-PROXIMIDAD-DE-LINEAS-ELECTRICAS-IBERDROLA-fenercom-2014](https://www.fenercom.com/pages/pdf/formacion/14-06-03_Jornada%20sobre%20localizaci%C3%B3n%20de%20infraestructuras%20de%20suministros%20energ%C3%A1ticos%20y%20seguridad%20en%20obras/5-SEGURIDAD-EN-LAS-OBRAS-CON-PROXIMIDAD-DE-LINEAS-ELECTRICAS-IBERDROLA-fenercom-2014)> [Consulta: 8 de julio de 2018]
- [90] Agüera Soriano, Jose. “Mecánica de Fluidos Incompresibles y Turbomáquinas Hidráulicas” Editorial Ciencia 3, 2002.
- [91] Apuntes Ingeniería Civil EHU 12-13 de la asignatura “Mecánica de Fluidos e Hidráulica”, Pedro Arriaga Bayo.
- [92] Apuntes Ingeniería Civil EHU 13-14 de la asignatura “Gestión de Recursos Hidráulicos e Instalaciones”, Eneko Madrazo Uribeetxebarria.
- [93] VERMACERO C.A, vendedora de materiales de Acero. “Tabla de tubería de acero al carbono”  
<<https://www.vemacero.com/Tablas/A53MP.pdf>> [Consulta: 18 de junio de 2018]
- [94] COTAINSA, SA, comercialización y suministros de Tubo y accesorios de acero. “Catálogo tubos”  
<<http://www.cotainsa.com/catalogo.pdf>> [Consulta: 18 de junio de 2018]

**[95]** SlideShare. “Valores típicos de coeficientes de rugosidad”  
<<https://es.slideshare.net/cosmeacr/coeficientes-de-rugosidad-haestad>>

[Consulta: 19 de junio de 2018]

**[96]** Escuela de Ingeniería de Atioquía. Mecánica de Fluidos y Recursos Hidráulicos “Unidades de la viscosidad”  
<<http://fluidos.eia.edu.co/fluidos/propiedades/viscosidad/unidadesvis.html>>

[Consulta: 21 de junio de 2016]

**[97]** Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. Proyecto de Adecuación de la Estación Depuradora de Aguas Residuales en Bullas, Murcia. “Anejo N°2- Cálculos hidráulicos. Línea piezométrica”  
<[http://www.carm.es/web/PDescarga?IDCONTENIDO=1618&PARAM=%3FidDocumento%3Dworkspace%3A%2F%2FSpacesStore%2Fcacb0d49-17e2-46d9-946c-](http://www.carm.es/web/PDescarga?IDCONTENIDO=1618&PARAM=%3FidDocumento%3Dworkspace%3A%2F%2FSpacesStore%2Fcacb0d49-17e2-46d9-946c-1564a907155d%2F1.0%26fechaVersion%3D01102014111938%26descargar%3Dtrue)

[1564a907155d%2F1.0%26fechaVersion%3D01102014111938%26descargar%3Dtrue](http://www.carm.es/web/PDescarga?IDCONTENIDO=1618&PARAM=%3FidDocumento%3Dworkspace%3A%2F%2FSpacesStore%2Fcacb0d49-17e2-46d9-946c-1564a907155d%2F1.0%26fechaVersion%3D01102014111938%26descargar%3Dtrue)> [Consulta: 24 de junio de 2018]

**[98]** Universidad de Castilla-La Mancha, Cátedra de Ingeniería Rural. “Pérdidas de carga localizadas o accidentales”  
<[https://previa.uclm.es/area/ing\\_rural/Trans\\_hidr/Tema8.PDF](https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Trans_hidr/Tema8.PDF)> [Consulta: 24 de junio de 2018]

**[99]** Sitio para las materias de Raúl Mtz. Estrada. “Diagrama de Moody”  
<<https://raulsmtz.files.wordpress.com/2011/03/moody.jpg>> [Consulta: 27 de junio de 2018]

**[100]** Euskadi.eus, Gobierno Vasco. “Base de Precios de Edificación y Urbanización” <<http://www.euskadieuprecios.com/>> [Consulta: 15 de julio de 2018]

## 1.2 ANEJO 1: DIMENSIONAMIENTO DEL TRATAMIENTO TERCIARIO

---

## ÍNDICE ANEJO DIMENSIONAMIENTO

---

1	Introducción y definición del caudal de entrada .....	101
2	Inicio de tratamiento terciario.....	101
3	Etapa de bombeo .....	102
3.1	Parámetros iniciales.....	102
3.2	Dimensiones del pozo de bombeo .....	102
3.3	Elección de la bomba.....	103
3.4	Funcionamiento de las bombas.....	104
4	Ultrafiltración .....	105
4.1	Introducción .....	105
4.2	Parámetros de partida.....	105
4.3	Condiciones de funcionamiento .....	106
4.4	Instalación y equipo .....	108
4.5	Lavado del filtro.....	112
5	Postdesinfección de seguridad mediante Cloración.....	117
5.1	Descripción de la cámara de cloración.....	117
5.2	Parámetros de partida.....	118
5.3	Características .....	118
5.4	Almacenamiento del hipoclorito sódico .....	119
5.5	Conclusiones de la cloración.....	119
6	Depósito de almacenamiento .....	120
6.1	Introducción .....	120
6.2	Tipo y diseño del tanque de almacenamiento .....	121

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Rangos de uso de los modelos de bombas ABS. [73].....	103
Figura 2: Parámetros iniciales del agua a la entrada del tratamiento terciario. [Elaboración propia].....	105
Figura 3: Exigencias para el agua de alimentación del proceso de filtrado. [Elaboración propia].....	106
Figura 4: Equipo de ultrafiltración Fluytec. [58].....	109
Figura 5: Parámetros de operación del equipo de ultrafiltración. [58].....	110
Figura 6: Rango de uso de las bombas Zenit Serie Grey APG. [79].....	113
Figura 7: Especificaciones de los modelos de la Gama Zenit Serie Grey APG. [79].....	114
Figura 8: Dimensiones y pesos modelo elegido. [79].....	115

## 1 Introducción y definición del caudal de entrada

Por la elevada necesidad y el limitado tamaño de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de Muskiz, el tratamiento de regeneración de las aguas previamente depuradas se planteará para la totalidad del caudal que actualmente se trata.

Como ya se ha dicho el volumen medio que se recibe y trata diariamente en el complejo de Muskiz es de 3102 metros cúbicos. Lo cual supone un caudal de  $129,4 \approx 130 \text{ m}^3/h$ .

Esto no será suficiente para satisfacer el volumen de 9.998,19 metros cúbicos diarios que se consumen en el uso de refrigeración en la refinería de Petronor, según los datos aportados por el Técnico de Calidad y Medio Ambiente de dicha empresa. Pero, aun así, permitirán contribuir al objetivo de reducir vertidos en la playa de la Arena y minorar el consumo de agua corriente que la refinería tiene.

En definitiva, y no contando con datos de caudales punta o caudales máximos, el dimensionamiento se hará contando con  $130 \text{ m}^3/h$  como caudal de diseño.

Aunque se diseñará con margen, de cara a amortiguar los caudales punta no considerados y sobre todo futuras ampliaciones que ya se atisban.

## 2 Inicio de tratamiento terciario

Desde el vertedero de la decantación secundaria se interceptará y conducirá el agua clarificada hasta un pozo de bombeo situado entre medias y a escasos metros de ambos decantadores. Previo paso por una arqueta de control de circulación de caudales.

### 3 Etapa de bombeo

Se plantea la instalación de un pozo de bombeo que eleve la cota de agua a la salida de los decantadores, de forma que no sea necesario incluir impulsiones posteriores en ningún punto del proceso ni recorrido que el agua seguirá hasta su ubicación final (tanque de almacenamiento en régimen de normal operación o vertido al Barbadun en caso de caudal excesivo o labores de mantenimiento no compatibles con el ciclo lógico)

Se ha tomado como referencia bibliográfica el libro de “Maquinaria para tratamiento y depuración de aguas” de José Carlos Segura Cobo. [65]

#### 3.1 Parámetros iniciales

Se recomienda tomar tiempos de retención inferiores a 60 minutos en el pozo. Para este caso:

- Tiempo de retención ( $t_R$ ): 5 minutos = 300 segundos
- Caudal a considerar ( $Q_{MAX}$ ) =  $130 \text{ m}^3/h = 36,15 \text{ l/s}$

#### 3.2 Dimensiones del pozo de bombeo

Para el pozo de bombeo se aprovechará la superficie que actualmente ocupa la arqueta de derivación de las aguas clarificadas desde la decantación secundaria hasta la balsa de cloración.

Para cumplir con las recomendaciones se colocará una pequeña arqueta de 2x2x1,5 (an. x la x pr.) a continuación de la que actualmente se usa para las aguas de salida del tratamiento biológico. Esta contará con una válvula de compuerta que permita cerrar el paso del agua desde la decantación secundaria hasta el pozo de bombeo para posibles labores de mantenimiento.

Por lo tanto, teniendo en cuenta el tiempo de retención y el caudal que se ha de bombear se puede calcular, de forma sencilla, la capacidad necesaria que tiene que tener el pozo de bombeo:

- Volumen a bombear ( $V$ ):  $V = Q_{MAX} * t_R = 36,15 \text{ l/s} * 300 \text{ s} = 10845 \text{ l} \approx 11 \text{ m}^3$
- Altura ( $h$ ) del pozo: Aprovechando la planta de la arqueta, que tiene 3 metros de ancho por 3,5 de largo:

$$h = \frac{11}{3,5 * 3} = 1,048 \approx 1,05 \text{ metros}$$

Bastaría con que el pozo tuviese una profundidad de tan solo un metro y cinco centímetros, pero se sobredimensionará hasta los 2 metros.

De forma que tendrá una capacidad para  $V = 3 * 3,5 * 2 = 21 \text{ m}^3$

### 3.3 Elección de la bomba

Las bombas que serán instaladas deben satisfacer las siguientes características:

- Nivel máximo de sumergencia: 20 metros
- Caudal a elevar: 36,15 L/s
- Altura a suministrar al fluido: La altura será de 25 metros. Se ha obtenido a través del Anejo: “Cálculo de la línea de presión del tratamiento terciario”, concretamente en el apartado 8.2.

Finalmente, tras sondear las diferentes opciones, se ha decidido instalar bombas sumergibles de la gama ABS. Las condiciones de utilización de los diferentes modelos se representan en la siguiente figura:

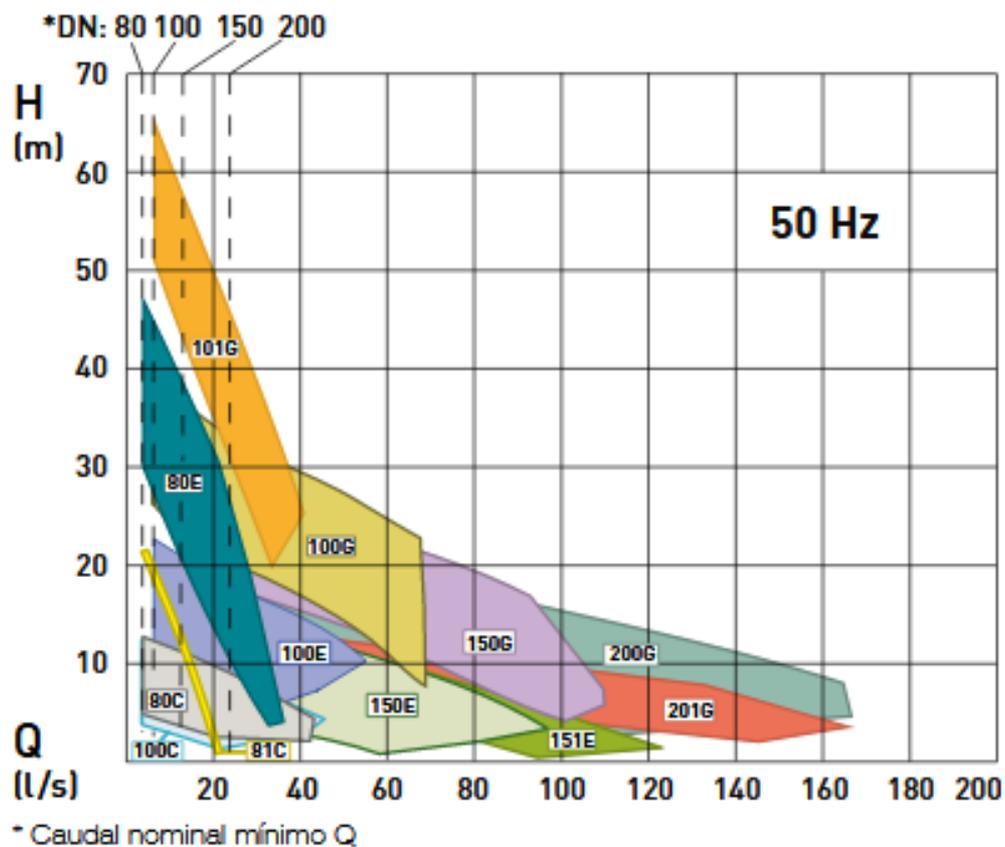


Figura 1: Rangos de uso de los modelos de bombas ABS. [73]

Las características del tipo de bomba seleccionada son:

- Marca: ABS
- Modelo: Serie XFP 101G CB1. 1 PE 185/2 -G- 50 (según nomenclatura oficial de la empresa distribuidora)
- Potencia: 20 kW
- Frecuencia: 50 Hz
- Revoluciones: 2900
- Tensión nominal: 400 V
- Caudal: de 28 a 41 L/s
- Peso: 360 kg/unidad
- Número de unidades:  $N = \frac{36,11 L/s}{34,5 L/s} = 1,047$  unidades serían necesarias (suponiendo que siempre se pueda bombear, como poco el término medio)

Por lo tanto, el pozo de bombeo constará de 2 impulsores más uno de repuesto para cubrir posibles averías u operaciones de mantenimiento, haciendo un total de 3 bombas colocadas. También se dispondrá de una cuarta bomba desmontada y guardada fuera del pozo para una posible rápida instalación.

### 3.4 Funcionamiento de las bombas

El bombeo funcionará regularmente con dos bombas que serían capaces de impulsar prácticamente el doble del flujo que a día de hoy circula en condiciones medias/normales de operación.

Aunque, sobre el papel, con una sola bomba en plenitud de facultades hubiese sido suficiente, se ha dimensionado de esta manera para poder amortiguar los caudales punta, que la Dirección de Explotación no ha podido suministrar. De igual manera, con el paso del tiempo los equipos van viendo como su rendimiento se reduce, por lo que está justificado el margen de seguridad que se propone.

Además se cubrirán horizontes futuros sin necesidad de plantear cambios a posteriori, por ampliaciones venideras de caudal tratado.

## 4 Ultrafiltración

### 4.1 Introducción

Después de que el efluente que sale de la decantación secundaria sea conducido hasta el pozo de bombeo, es impulsado desde allí a la entrada del proceso de membrana.

Es en esta instalación donde los filtros que integran los diferentes bastidores y módulos se encargarán de reducir tanto la cantidad de sólidos en suspensión, con la consiguiente turbidez, presente en el flujo de agua como los diferentes microorganismos contaminantes citados en distintos puntos de la memoria descriptiva de este mismo proyecto. (Escherichia Coli, Nemátodos intestinales y Legionella spp)

Una de las ventajas que proporcionan estos equipos es la facilidad para entrar en operación, ya que son instalaciones prefabricadas.

Por lo tanto, solo habrá que reparar en los parámetros de partida del agua a tratar y buscar en el mercado un modelo que se ajuste a estas condiciones del flujo de entrada. De forma que se pueda asegurar un correcto funcionamiento de los equipos sin que exista posibilidad de daños.

### 4.2 Parámetros de partida

A continuación se recogen las características del efluente depurado que se conducirá a la instalación de ultrafiltración, en el inicio del tratamiento terciario de la EDAR de Muskiz.

Las características del agua a filtrar son:

Sólidos en suspensión totales (mg/L)	12
Demanda química de oxígeno - DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	40
Demanda biológica de oxígeno al quinto día - DBO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	4
Nitratos – N-NH <sub>3</sub> (mg N/L)	2,3
Fosfatos – P-PO <sub>4</sub> (mg P/L)	1,3

Figura 2: Parámetros iniciales del agua a la entrada del tratamiento terciario.

[Elaboración propia]

### 4.3 Condiciones de funcionamiento

Una vez consultados diferentes catálogos de empresas distribuidoras de los equipos de ultrafiltración y teniendo en cuenta aquellas que ofertan productos que satisfacen, sobre todo y por capacidad, el caudal a tratar, hay que reparar en las condiciones de trabajo de la instalación.

Estas condiciones están ligadas a los parámetros físicos, biológicos y químicos del agua a filtrar y dependerán en gran medida del material con el que se hayan hecho las membranas, el módulo utilizado y el tamaño del poro de las mismas.

Los parámetros de utilización de los bastidores que se van a utilizar en este proyecto, cuya información ha sido suministrada por la empresa “Fluytec”, son los siguientes:

Requerimientos del agua de alimentación		
	Típico en uso	Máximo permitido
Turbidez (UNT)	<50	300
Sólidos en suspensión totales -SST- (mg/L)	<50	100
Carbono orgánico total	<10	40
Demanda química de oxígeno -DQO- (mgO <sub>2</sub> /L)		60
Presencia de Cloro (mg/L)	0,5	200
Aceites/Grasas (mg/L)	0	<2
pH	6-9	2-11
Temperatura (°C)	25	40

Figura 3: Exigencias para el agua de alimentación del proceso de filtrado.  
[Elaboración propia]

Conocida la calidad del agua que requiere la instalación a la entrada de la filtración para una correcta operación, es momento de decidir si hay que plantear pretratamientos o si las condiciones del agua a la salida de la decantación secundaria cumplen con los estándares mínimos exigidos por las especificaciones de los equipos de ultrafiltración. Con esto se decidirá si se puede o no derivar el efluente depurado directamente a estos equipos de membrana desde el pozo de bombeo.

Además, y también en base a esto, hay que decidir la ruta del fluido y determinar en qué orden se someterá al agua a cada uno de los procesos que integran el tratamiento de afino.

En primer lugar, y en lo que a los factores físicos respecta, la cantidad de sólidos en suspensión que contiene el agua depurada (12 mg/L) es claramente inferior al valor típico de operación de la instalación de ultrafiltración (50 mg/L). Aunque no se disponga del dato de turbidez, considerando la estrecha relación que existe entre los sólidos en suspensión y la turbidez en el agua, se puede asimilar que ésta también será inferior al valor típico admitido a la entrada del tratamiento.

Así pues, no será necesario disponer pretratamientos físicos antes del proceso de membrana.

Analizando los parámetros microbiológicos/orgánicos, se puede ver que la Demanda Química de Oxígeno del agua (40 mgO<sub>2</sub>/L) está por debajo de los 60 mgO<sub>2</sub>/L de máxima que se aceptan para el normal funcionamiento de la instalación. Al igual que antes la Dirección de Explotación de la EDAR de Muskiz no tiene los datos del Carbono Orgánico Total del agua depurada, por no ser uno de los parámetros a controlar, al menos directamente, según la normativa de vertido. Aun así se va a suponer que cumpliendo con la DQO también se cumplirá con el COT.

Por consiguiente, tampoco se requerirá la disposición de pretratamientos de esterilización antes de la ultrafiltración.

La limitación en la presencia de Cloro ha llevado a determinar que en el orden de aplicación de los tratamientos, la ultrafiltración se disponga antes que la cloración. De esta forma, las membranas no se verán afectadas por dosis de cloro que puedan dañar, sobre todo a largo plazo, los polímeros que las conforman.

Por otro lado, el rango tan amplio de pH que admite la instalación para el agua de alimentación, implica que no sea necesario agregar ningún tipo de proceso de estabilización química para aumentarlo o disminuirlo, y más aún, teniendo en cuenta que las aguas residuales urbanas suelen tener un pH próximo al neutro. [74]

Debido a los diferentes procesos de flotación y desengrasado que se llevan a cabo en el pretratamiento y tratamiento secundario, los aceites y las grasas tras la decantación del proceso biológico se van a considerar por debajo de los 2 mg/L límite.

Por último, el efluente a tratar en el tratamiento de afino se considerará que está a temperatura ambiente. En ningún caso por encima de los 25°C, y mucho menos de los 40, que dicta el catálogo del producto.

#### 4.4 Instalación y equipo

El equipo de ultrafiltración que se va a instalar en el tratamiento terciario de la EDAR de Muskiz será el FSUP-50 de la empresa “Fluytec, filtration technologies”.

Está conformado por 50 módulos de ultrafiltración diseñados con la capacidad de asimilar y tratar caudales de hasta  $275 \text{ m}^3/\text{h}$ . Alcance más que de sobra para hacer frente a los  $130 \text{ m}^3/\text{h}$  que se depuran actualmente en el complejo de Muskiz y a futuras ampliaciones o picos no contemplados en régimen de normal operación.

Tiene un PLC (Controlador lógico programable) programado en fábrica y un panel de control HMI (Interfaz hombre-máquina) lo cual facilita enormemente el uso y proporciona un funcionamiento simple y altamente automatizado. Para que con el seguimiento de ciertos parámetros se controle de forma sencilla el buen funcionamiento del equipo.

El diseño modular permite una distribución y gestión inteligente y flexible del espacio. No solo en la disposición de la instalación para su etapa de explotación, sino que también en el transporte de la misma hasta la ubicación final. De hecho, los módulos están especialmente diseñados para encajar en contenedores de envío ISO que pueden llegar fácilmente al Superpuerto de Bilbao y de ahí a la EDAR de Muskiz, situada a escasos kilómetros del dique de carga y descarga.

El tiempo de instalación, la dificultad para el inicio de la operación y los costes vinculados al proceso de construcción son mínimos. Gracias, en gran medida, a la naturaleza prefabricada del instrumental necesario que hace que el montaje se reduzca a poco más que la interconexión de los diferentes elementos.

La entrega se realiza de forma rápida y acompañada por los manuales de operación y mantenimiento de la maquinaria.

Las válvulas se accionan de forma neumática.

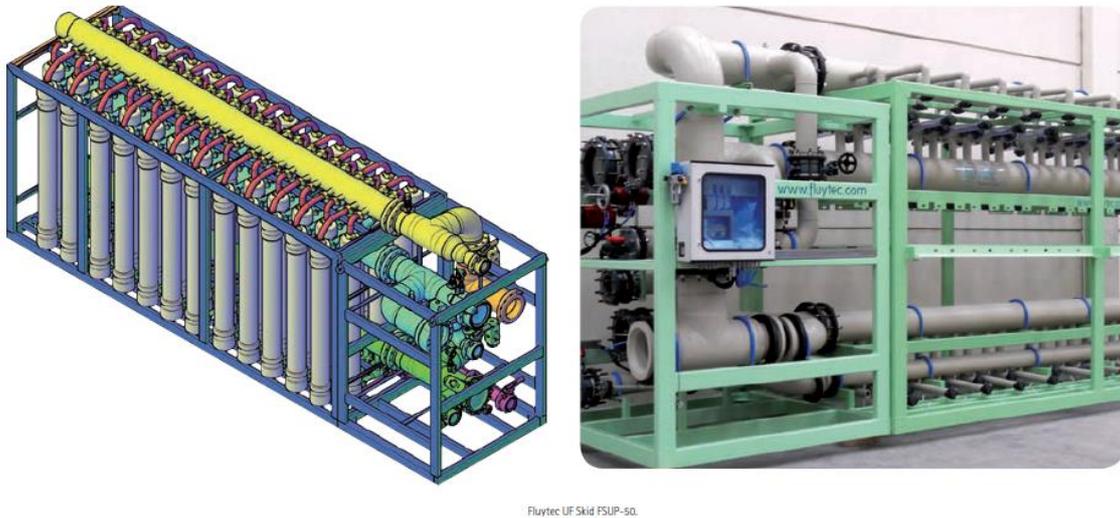


Figura 4: Equipo de ultrafiltración Fluytec. [58]

En cuanto a los materiales utilizados:

- El marco soldado será de acero al carbono pintado y granallado.
- Las tuberías podrán ser de policloruro de vinilo no plastificado (PVC-U) o de Polipropileno. En este caso se ha preferido instalar polipropileno, porque presenta mejores características:
  - Mayor resistencia a la abrasión, lo cual es interesante teniendo en cuenta que circulará agua con un contenido “notable” de sólidos en suspensión
  - Mayor resistencia química
  - Mayor resistencia al impacto
  - Menor densidad. Lo que conlleva menores pesos con la consiguiente facilidad de manejo e instalación
  - Ecológico y de fácil reciclaje
  - Mayor crecimiento en cuanto a inversiones
  - Larga vida útil por menor abrasión (más de 100 años) [75]
- Las bridas estarán hechas en acero carbono DIN, para soldar.
- Las válvulas estarán hechas por moldes de hierro recubiertos de plástico

Se dispondrán una serie de medidores en distintos puntos de la instalación para conocer diferentes parámetros: Caudal de entrada en el punto de alimentación, presión del fluido a la entrada del equipo y en la salida del agua ya filtrada y turbidez del efluente filtrado.

Los parámetros de operación del equipo son los siguientes:

Diámetro nominal de los poros	Sobre los 0,03 $\mu\text{m}$ (0,001-0,1 $\mu\text{m}$ )
Índice de ensuciamiento de las membranas (SDI)	$\leq 2,5$
Turbidez tras filtrado	$\leq 0,1$ UNT
Porcentaje de recuperación de sustancias	90 - 95%
Temperatura de operación	De 1 a 40 $^{\circ}\text{C}$
Presión máxima de alimentación	6 bar
Presión máxima tras membrana (caída de presión máxima en el funcionamiento normal)	2,10 bar
Presión máxima contralavado	2,5 bar
Estimación de consumo de energía	$< 0,1 \text{ kWh}/\text{m}^3$
Voltaje de entrada	400 VAC/3/50 Hz

Figura 5: Parámetros de operación del equipo de Ultrafiltración. [58]

El índice de ensuciamiento de las membranas (SDI) es un procedimiento sencillo desarrollado para estimar el grado de bloqueo de las membranas por las partículas coloidales. Un SDI menor o igual que 5 será aceptable por lo que un índice de 2,5 será muy satisfactorio y de nuevo confirma que no es necesario agregar procesos previos. [76]

El porcentaje de recuperación en la separación realizada expresa la cantidad de materia retenida en la filtración sobre el total de la muestra que atraviesa las membranas. Se obtiene de forma experimental a través de muestras. [77]

La presión máxima de alimentación es aquella por encima de la cual el equipo puede sufrir problemas o roturas por excesiva tensión hidrodinámica.

La presión máxima tras membrana (TMP) es la caída de presión máxima en la operación de funcionamiento normal, que va a ser cuando los poros de la membrana estén bastante colmados.

La presión máxima de contralavado será la caída de presión del fluido en la operación de lavado más desfavorable.

Los caudales de contralavado y lavado hacia adelante serán de 13,6 y 3,4  $\text{m}^3/\text{h}$  respectivamente. El bombeo, tal y como se ha obtenido en el Anejo: "cálculo de la línea de presión del tratamiento terciario", se ha calculado para el ciclo de condiciones más extremas.

Las dimensiones estimadas del sistema, propiamente dicho, serán: 1,9 metros de ancho por 7,4 metros de largo y 3,1 metros de alto.

Los diámetros nominales en el interior de la instalación, que se empalmarán con las conducciones proyectadas entre los diferentes puntos del tratamiento, son:

- Tubería de entrada de la alimentación: 250 mm
- Tubería de salida del agua producto: 250 mm
- Tubería de entrada al contralavado: 250 mm
- Tubería de salida del contralavado: 250 mm
- Tubería de entrada del lavado hacia adelante: 150 mm
- Tubería de salida del lavado hacia adelante (empalma con la de salida del contralavado): 250 mm

Resulta interesante, para disminuir las pérdidas de carga, que las tuberías del equipo de filtración tengan el mismo diámetro (250 mm) que las de las conducciones que conectan el pozo de bombeo con el proceso de membrana o este, a su vez, con el tanque de cloración (línea principal).

Como se puede ver en el Anejo: “Cálculo de la línea de presión del tratamiento terciario”, la necesidad de velocidades mayores ha llevado a dimensionar las conducciones externas de la línea de lavado con diámetros inferiores (100 mm) a los de la línea de tratamiento principal.

Los diferentes equipos que, en definitiva, integran la instalación al completo irán dentro de una nave prefabricada de 5 metros de ancho 12 de largo y 4,5 de altura en los pilares. La cubierta se materializará a través de un panel sándwich de 30 mm de espesor y la fachada será de chapa simple.

Con esto se evita que los materiales, a pesar de tener alta resistencia a ambientes expositivos agresivos y húmedos, estén a la intemperie y se asume que esta simple protección será suficiente.

La cubierta tendrá una pendiente del 20% para garantizar una correcta evacuación de las aguas y se dispondrá de una puerta en el testero delantero (dirección nor-noroeste) de 3 por 3 metros, para que se tenga espacio suficiente en la introducción de equipos de cierta envergadura. [78]

## 4.5 Lavado del filtro

### 4.5.1 Diseño del lavado de filtros

Una vez se ha alcanzado la capacidad límite del filtro hay que proceder a realizar el lavado de la membrana, previa retirada de la torta de superficie que se mezclará con el fango biológico y se transportará en camión a la EDAR de Galindo. Este lavado de los intersticios del filtro puede llevarse a cabo mediante la circulación de agua o combinando circulación de agua más aire.

Para el lavado de las membranas de ultrafiltración del tratamiento terciario de la EDAR de Muskiz se va a plantear un lavado combinado de agua y aire, en el cual el aire se encargará de separar y disgregar las partículas facilitando el posterior arrastre del agua, que será quien se encargue de transportar dichas partículas. De esta forma se optimiza el proceso de lavado reduciéndose el tiempo necesario para los diferentes ciclos, lo cual implica menores trabas para el proceso de operación.

En el lavado con agua la circulación se hará en ambos sentidos. El sentido del flujo en el filtrado (lavado hacia adelante) y en el sentido contrario a la filtración (contralavado)

La aireación, muy utilizada en membranas de fibra hueca, se hará en el mismo sentido de flujo que la corriente de alimento.

Las operaciones de lavado con agua se realizarán más o menos cada 20 o 60 minutos. En función de lo que dictaminen las variables monitorizadas, que pondrán en relieve la necesidad de periodicidad de los ciclos de lavado.

Cada uno de ellos durará entre 40 y 120 segundos y junto al agua se podrán dosificar diferentes químicos que se tendrán almacenados dentro del propio equipo de ultrafiltración. Se dispondrá de un hidróxido que elimine la materia orgánica acumulada por incremento de pH, como el hidróxido de sodio (NaOH). Un ácido para facilitar la limpieza de sustancias con naturaleza inorgánica, como el ácido cítrico que es más barato y suave que el ácido clorhídrico (HCL). Y finalmente un desinfectante que aplicado en bajas concentraciones, por debajo de las máximas admisibles, evite el crecimiento de microorganismos en la membrana, como es el hipoclorito de sodio (NaClO).

Se alternarán de forma automática, según las necesidades detectadas por el controlador lógico del equipo, ciclos de contralavado y lavado hacia adelante. Consumiendo en el peor de los casos  $1,36 \text{ m}^3/\text{h}$ .

El lavado por aire se realizará mediante soplores una única vez al día.

Las concentraciones y tipos de químicos a dosificar en los diferentes lavados por agua y el caudal y tiempo de aplicación del chorro de aire son muy variables, y se determinarán de forma automática a través de la inteligencia instalada en el propio equipo.

En cualquier caso, habrá que asegurar una plena disposición y reposición de los reactivos y una alimentación continua de aire y electricidad en los sopladores.

#### 4.5.2 Dimensionamiento del bombeo de agua para lavado

Para el dimensionamiento de las bombas encargadas de la inyección del agua utilizada para el lavado, se tendrá en consideración el caudal de agua necesario para los diferentes ciclos y las pérdidas de carga calculadas en el apartado 10.6 del Anejo: "Cálculo de la línea de presión del tratamiento terciario". Dichas pérdidas de carga tendrán un valor total, para el caso más desfavorable, de 28,23 metros (desde tanque de lavado hasta pozo de bombeo en ciclo de contralavado). Por lo que se buscará un impulsor que suministre al fluido unos 30 metros de altura.

Se ha decidido instalar bombas sumergibles centrífugas de la marca Zenit. De entre la amplia gama de modelos había que buscar aquellos que fuesen capaces de impulsar como poco, caudales de 3,8 L/s a la citada altura de 30 metros.

Finalmente, por las condiciones de partida, la gama más recomendada es la APG de la Serie Grey. Por dotar al fluido de elevada altura manométrica y estar recomendada para aguas claras, como será el caso. La curva de rangos de usos es la siguiente:

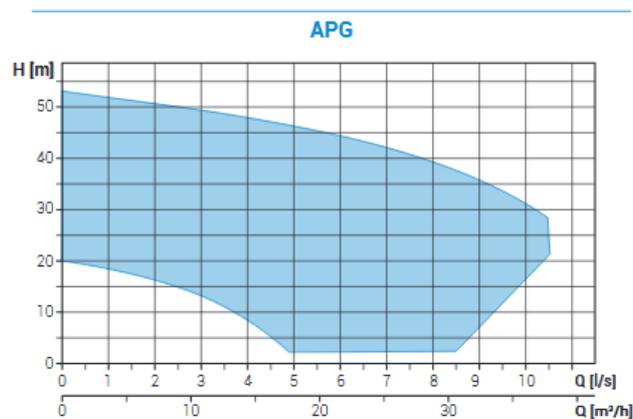
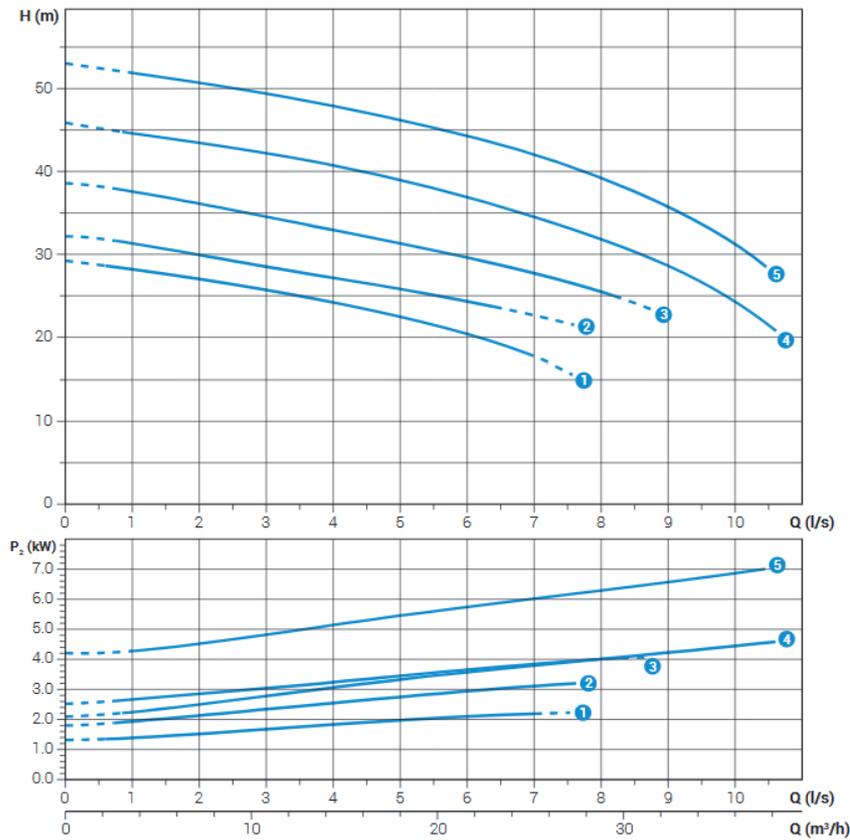


Figura 6: Rango de uso de las bombas Zenit Serie Grey APG. [79]

De entre esta gama, y reparando de nuevo en el caudal y la altura a bombear, se ha obtenido a partir del catálogo, el modelo exacto a incorporar al proyecto del tratamiento terciario de la EDAR de Muskiz.

**Performances**

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	0	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600
	0	3.6	7.2	10.8	14.4	18	21.6	25.2	28.8	32.4	36
1 APG 300/2/G50H C0ET5	29.2	28.2	27.0	25.6	24.1	22.5	20.4	17.6			
2 APG 400/2/G50H D0ET5	32.2	31.4	29.9	28.5	27.2	25.9	24.4				
3 APG 550/2/G50H D0FT5	38.6	37.6	36.1	34.5	32.9	31.3	29.6	27.7	25.4		
4 APG 750/2/G50H A0FT5	45.8	44.5	43.5	42.2	40.7	38.9	36.8	34.5	31.8	28.6	24.2
5 APG 1000/2/G50H A0FT5	53.0	51.8	50.7	49.4	48.0	46.3	44.3	42.0	39.2	35.8	31.2



**Technical data**

	V	Phases	P1 (kW)	P2 (kW)	A	Rpm	Start	Cable	Ø	Free passage
1 APG 300/2/G50H C0ET5	400	3	2.76	2.2	4.62	2900	Dir	4G1.5+3x1	DN32 - G2"	8 mm
2 APG 400/2/G50H D0ET5	400	3	3.68	3.0	6.36	2900	Dir	4G1.5+3x1	DN32 - G2"	8 mm
3 APG 550/2/G50H D0FT5	400	3	4.66	4.0	7.73	2900	Dir	4G1.5+3x1	DN32 - G2"	8 mm
4 APG 750/2/G50H A0FT5	400	3	6.32	5.5	10.8	2900	Dir	4G1.5+3x1	DN32 - G2"	10 mm
5 APG 1000/2/G50H A0FT5	400	3	8.51	7.5	13.7	2900	Dir	4G1.5+3x1	DN32 - G2"	10 mm

Figura 7: Especificaciones de los modelos de la gama Zenit Serie Grey APG.

[79]

Por lo tanto, el modelo elegido es el APG550/2/G50H D0FT5. Cuyas características son las siguientes:

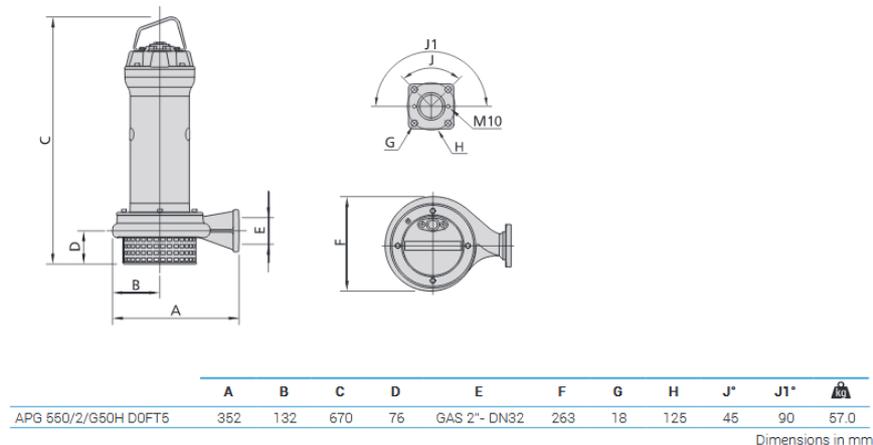
- Marca: Zenit
- Modelo: Serie Grey APG (Alta Prevalenza) APG550/2/G50H D0FT5
- Potencia: 4 kW como máximo
- Frecuencia: 50 Hz
- Revoluciones: 2900
- Tensión nominal: 400 V
- Peso por unidad: 57,0 kg/unidad
- Caudal: de 0 a 10,5 L/s
- Número de unidades:  $N = \frac{3,8 \text{ L/s}}{5,25 \text{ L/s}} = 0,724$  unidades serían necesarias (suponiendo que siempre se pueda bombear, al menos, el término medio)

Por lo tanto, el depósito de aguas de lavado constará de 1 impulsor más uno de repuesto para cubrir posibles averías u operaciones de mantenimiento, haciendo un total de 2 bombas colocadas.

Al igual que en el bombeo del tratamiento terciario, se contará con una bomba de reserva desmontada y guardada para una posible rápida instalación.

Otra de las razones para la elección de esta bomba ha sido su tamaño compacto que facilita la disposición en el depósito o tanque para el lavado:

Overall dimensions and weights



Packaging dimension



Figura 8: Dimensiones y pesos modelo elegido. [79]

#### 4.5.3 Dimensionamiento del tanque de almacenamiento de agua para lavado

El depósito que almacenará el agua para lavado tendrá un volumen de  $75 \text{ m}^3$  y se llenará mediante empalme directo con agua potable de la red del Consorcio, por lo que tendrían cabida diferentes tipos de material desde hormigón hasta poliéster reforzado con fibra de vidrio, que finalmente será el material que forme el vaso. Esta capacidad será suficiente para satisfacer los  $66 \text{ m}^3$  que se han tomado como obligatorios en cuanto a necesidad de embalse.

Para el cálculo de esos 66 metros cúbicos se ha obtenido primero el volumen de agua que se consumirá como máximo para el lavado de filtros. Esto correspondería al supuesto de contralavados de 120 segundos cada 20 minutos, es decir, ciclos abundantes y largos del lavado más caudaloso. De esta forma se consumirían 1,36 metros cúbicos por hora.

Después, consultando la hemeroteca, se han obtenido las duraciones típicas de los cortes de agua en diferentes comunidades autónomas de España y de entre todas se ha tomado 48 horas como la incidencia más duradera en el suministro. Por tanto, multiplicando 48 horas por los 1,36 metros cúbicos por hora se ha obtenido un resultado de  $65,28 \approx 66$  metros cúbicos. [80-84]

Con esto se consigue que aun existiendo cortes en el suministro de la red de agua corriente, teniendo en cuenta que no por ello dejarán de entrar aguas residuales a la EDAR, el complejo de depuración y regeneración de Muskiz puede seguir en funcionamiento durante al menos 2 días. Tiempo presumiblemente suficiente como para que se resuelva la incidencia.

#### 4.5.4 Dimensionamiento del bombeo de aire para lavado

Se instalarán sopladores de la marca Aerzen, los de la gama Delta Blower Generation 5 de la serie de sopladores de desplazamiento positivo.

El modelo GM 4S G5-E, podrá suministrar un caudal de aire de  $342 \text{ m}^3/\text{h}$  a una presión máxima de 1 bar. Lo cual supera los  $110 \text{ m}^3/\text{h}$  y los 0,5 bares necesarios para el lavado por aire de 3 minutos que requiere el modelo FSUP-50 de ultrafiltración de Fluytec. [85]

Se colocará uno para funcionamiento continuo y otro de repuesto, como siempre, para cubrir posibles averías u operaciones de mantenimiento.

La elección se ha basado en su ajustado consumo eléctrico (15 kW) y presión sonora (70 dB). Además genera bajas emisiones y es libre de aceite. Trabaja bajo condiciones de ambientes difíciles y es muy robusto y duradero, garantizando a la vez una facilidad de mantenimiento y de utilización más que reseñable.

## 5 Postdesinfección de seguridad mediante Cloración

El tratamiento terciario contará con un proceso de postdesinfección y desinfección auxiliar a base de cloro, que se llevará a cabo en la cámara de cloración existente a fecha actual en la depuradora de Muskiz. El objetivo de ésta es garantizar la calidad de las aguas en la entrega, tras las etapas de transporte y almacenamiento, mediante la remanencia del reactivo en su forma residual libre y, además, asegurar los estándares de calidad microbiológicos complementando la esterilización propuesta a través del proceso de ultrafiltración.

Se ha optado por cambiar la forma del reactivo/químico empleando hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ) en lugar del cloro puro o cloro gas que se utiliza actualmente en la cámara de contacto de la EDAR de Muskiz. Ya que de esta forma se gana en seguridad para el operario en las operaciones de explotación, por el riesgo a posibles fugas del Cloro gas, y se ahorra a largo plazo el dinero desviado para las labores de mantenimiento de los sensores y equipos dispuestos para controlar estos posibles escapes contaminantes.

Además, el bajo coste y la facilidad de instalación han convertido al hipoclorito sódico en la opción actualmente más utilizada en las operaciones de cloración de depuradoras de tamaño pequeño-mediano.

La dosificación, se realizará de forma automática en función del caudal de entrada en el laberinto de clorado.

### 5.1 Descripción de la cámara de cloración

La cámara de cloración es un depósito circular cuyo canal es un laberinto con forma de espiral irregular. El agua llegará a la cabecera del canal donde se procederá a la inyección del  $\text{NaClO}$  mediante una bomba dosificadora instalada en el inicio del recorrido. Además de esta bomba que trabajará de forma continua se dispone de una segunda bomba en reserva.

Una vez aplicada la dosis de cloro, el agua a tratar permanecerá en el laberinto durante un periodo determinado, denominado tiempo de contacto, para que se alcancen los objetivos requeridos.

## 5.2 Parámetros de partida

- Caudal a tratar:  $Q = 130 \text{ m}^3/\text{h}$
- Dosis de cloro:  $D = 2,5 \text{ mg/L}$  de Cloro

El rango típico va de 5 a 20 mg/L. En agua residual sin tratar la dosis puede aumentar hasta los 6-25 mg/L, mientras que en agua con procesos previos de esterilización puede caer a 1-5 mg/L, para evitar la formación de organoclorados. En este caso, debido a que es agua previamente desinfectada pero que tiene una etapa de almacenamiento y distribución pendiente se establecerá una dosis de 2,5 mg/L. [65]

- Riqueza en Cl del NaClO comercial:  $R = 15\%$  [71]
- Número de unidades dosificadoras:  $N = 1 =$  número de líneas
- Tiempo de contacto a caudal medio:  $t = 1 \text{ hora}$  según la Dirección de explotación.

La recomendación para este parámetro es de al menos 20-30 minutos. [65]

## 5.3 Características

- Caudal de diseño de la línea:  $Q = 130 \text{ m}^3/\text{h}$
- Consumo medio de Cl:

$$C_{med} = \frac{Q}{1000} * D * 24 \text{ horas} = \frac{130 \text{ m}^3/\text{h}}{1000} * 2,5 * 24 = 7,8 \text{ kg/día}$$

Teniendo en cuenta la riqueza del 15% se necesitarán 52 kg diarios de NaClO, considerando que se suele vender en disolución acuosa de densidad igual a 1,11 kg/L se requerirán unos 47 litros diarios, es decir, unos 2 L/h.

- Volumen útil de la cámara:  $V = 200 \text{ m}^3$
- Volumen de los resguardos y paredes del laberinto:  $V = 98,5 \text{ m}^3$
- Diámetro de la cámara:  $D = 10 \text{ m}$
- Lámina de agua:  $2,55 \text{ m}$
- Profundidad de la cámara:  $3,8 \text{ m}$

#### 5.4 Almacenamiento del hipoclorito sódico

El tanque que se dispondrá para suministrar el hipoclorito sódico será de la marca BIOTanks. Se colocará un depósito en vertical aprovechando el hueco que deja la actual instalación de cloración en el edificio de entrada de las aguas residuales.

Se va a utilizar, concretamente, la gama especial de almacenamiento de productos químicos. Estos siguen la normativa MIE-APQ-6 de almacenamiento de líquidos corrosivos, en cuanto a materiales, espesores y resistencia química y mecánica del tanque.

Las dimensiones del modelo de depósito a utilizar (DPQ-30), que será de base circular, son las siguientes: diámetro de 1200 milímetros y altura total igual a 3150 milímetros. Lo cual ofrece un volumen útil de 3000 litros.

De esta forma se tendrá reactivo suficiente para unos 64 días. Tiempo perfecto para evitar la evaporación a más largo plazo debido a la inestabilidad que presenta el hipoclorito de sodio aun dentro de este tipo de tanques preparados para contenerlo. [86,87]

Las unidades de dosificación de cloro que tiene actualmente la EDAR de Muskiz, dos bombas verdeflex Dura 5 de 4L/h de caudal, son válidas para inyectar el NaClO según el contacto que se ha hecho con la Dirección de Explotación. Se dispondrá de una en operación y otra en reserva, para cubrir operaciones de mantenimiento o averías.

#### 5.5 Conclusiones de la cloración

La actual cámara de cloración de la EDAR, será suficiente para asimilar y tratar, a base de hipoclorito sódico almacenado dentro de un tanque en la propia planta de Muskiz, el caudal de  $130 \text{ m}^3/\text{h}$  con los 200 metros cúbicos de volumen que puede albergar. Ya que teniendo en cuenta que los tiempos de retención son de una hora, existe un saldo positivo de  $+70 \text{ m}^3/\text{h}$  a tratar, por lo que se asume como suficiente para amortiguar posibles caudales punta y, en principio, futuras ampliaciones de la EDAR de Muskiz. Y más, teniendo en cuenta que el tiempo de contacto se podría reducir, incluso, a la mitad.

Aun así, el By-pass de entrada a la cámara de cloración permite comunicar la entrada de este tratamiento con la salida al río Barbadún, con la intención de desviar caudales no deseados directamente a vertido. (En caso de que el tanque de almacenamiento se encuentre lleno o de estados de caudales inasumibles en la etapa de cloración)

## 6 Depósito de almacenamiento

### 6.1 Introducción

Tras el proceso de desinfección, el agua tratada será almacenada hasta su posterior reutilización en la refinería de Petronor.

A la hora de calcular la capacidad con la que dimensionar el tanque, antes era conveniente conocer el volumen requerido por la refinería para el uso principal de refrigeración, para hacer una primera aproximación.

En caso de que el caudal tratado en Muskiz fuese mayor que el necesario para atender este reuso industrial, la calidad dotada al efluente regenerado en la depuradora permitiría cubrir muchos otros usos de la refinería que exigían estándares de calidad más bajos. Ejemplo de esto sería el agua de planta o de limpieza o, la extinción de incendios.

Según datos del último ejercicio (año 2017) proporcionados por el Técnico de Calidad y Medio Ambiente de Petronor, la planta consume anualmente 6.885.529 metros cúbicos. Teniendo en cuenta que el 53% de eso se utiliza para el uso de refrigeración, cambiando las unidades se concluye que para satisfacer ese reuso se van a requerir casi 10.000 metros cúbicos diarios de agua regenerada.

Esto es bastante más de los 3102 metros cúbicos diarios que a fecha de hoy se tratan en la depuradora de Muskiz. Es por ello que hay que tratar de dimensionar un depósito grande que permita embalsar buena parte del efluente regenerado con la intención de amortiguar las irregulares demandas de la refinería, reduciendo el consumo de agua corriente que esta requiere.

Las perspectivas de futuras ampliaciones, justifican aún más el establecimiento de este tanque de almacenamiento. Ya que el escenario idílico sería que, a través de ese aumento de caudal a tratar, la refinería cubriese todas las necesidades de flujo que no requieran calidades de agua potable con el efluente regenerado en Muskiz.

La negativa por parte de Petronor a disponer un depósito para este uso en sus instalaciones, junto a la necesidad perentoria de contar con un dispositivo de embalse, ha obligado a la colocación de uno en la parcela del complejo de depuración.

El suministro directo no era viable porque al ser un uso que conlleva demanda irregular exigiría en muchos momentos de baja o nula necesidad de agua en la refinería, hacer uso de los by-passes y por tanto, verter el fluido regenerado al Barbadún. Opción que hacía perder sentido al proyecto

## 6.2 Tipo y diseño del tanque de almacenamiento

### 6.2.1 Introducción

El agua regenerada está sujeta a cambios de calidad en el almacenaje. Esto se produce como consecuencia de la formación bacteriana de nuevo crecimiento, y las concentraciones de nutrientes disueltos y materia orgánica residual.

Estos cambios de calidad se pueden traducir en alteraciones físicas, químicas, biológicas u organolépticas del agua embalsada.

La degradación de la calidad del agua depende en gran medida del tipo de sistema de almacenamiento.

En cualquier caso, para mantener la calidad de las aguas embalsadas siempre se aconsejan una serie de medidas básicas a incorporar en este proyecto que son: aireación, recirculación, retirada de sedimentos, filtración, cloración.

### 6.2.2 Tipos de depósito

Obviando las características geométricas del tanque que se pueda proyectar, que tendrá infinitas soluciones, existen dos tipos de depósitos atendiendo a su característica principal. Los depósitos abiertos y los cerrados.

Los depósitos abiertos tienen mayor riesgo de deterioro de las aguas que los cerrados, ya que se agudizan los problemas derivados de olores, crecimiento de las algas y fitoplancton, así como el aumento de la turbidez y el color. Además es más fácil que experimenten aportes externos que supongan un aumento de la materia orgánica y, por ello, la turbidez. Asimismo, la fauna natural y los agentes del entorno pueden ser causa de aumento de todo tipo de microorganismos patógenos.

La disposición de un tanque cerrado, solamente será contraproducente en cuanto a la cantidad de oxígeno disuelto en el agua. Al no estar en contacto con el exterior la aireación se hace más complicada y la cantidad de oxígeno en el agua tiende a disminuir notablemente.

A nivel general, sea cual sea el tipo de depósito a utilizar, hay que prestar atención al tiempo de almacenamiento del agua. Este parámetro es inversamente proporcional a la calidad del agua embalsada. A mayor tiempo de almacenamiento peor calidad y mayor degradación. [62]

### 6.2.3 Solución y diseño

La elevada calidad que se exige al efluente regenerado para su reutilización como agua de refrigeración en la refinería de Petronor, implica que el sistema de almacenamiento a proyectar sea de tipo cerrado.

El hecho de que sea cubierto y aislado del exterior, reduce casi a cero la posibilidad de que se alteren parámetros fundamentales como la presencia de sólidos en suspensión y la consiguiente turbidez o la proliferación de microorganismos patógenos. En un sistema abierto, estas características serían muy difíciles de controlar debido a factores de impacto que juegan un papel muy importante como el viento y el arrastre de partículas que implica o el medio de transmisión microbiológico que supone la fauna.

En cuanto a la capacidad y teniendo en cuenta, como ya se ha dicho, que el volumen que consume la refinería es muy grande y mayor al tratado actualmente en la EDAR, se buscará el máximo aprovechamiento del espacio disponible en la zona ajardinada de la esquina nor-noroeste de la parcela que ocupa el complejo de depuración de Muskiz.

Se proyectará un depósito en superficie, para minimizar costes y porque existe espacio suficiente, de base circular ya que estructural y económicamente estos ofrecen mayores ventajas por el mejor rendimiento geométrico y mecánico que presentan en comparación con los de base rectangular. [88]

Las dimensiones del mismo serán de 20 metros de diámetro y 5 metros de altura. Siendo 4,75 la cota máxima de funcionamiento de la lámina de agua a partir de la cual entrarían en funcionamiento los by-passes hacia el Barbadún.

$$V_{\text{depósito}} = Ab * h = \pi r^2 * h = \pi 10,5^2 * 5 = 1570,796 \text{ m}^3$$

La capacidad del depósito será de unos 1570 metros cúbicos.

Por lo que, teniendo en cuenta que diariamente se tratan 3102 metros cúbicos, podrá acumular todo el agua tratada durante aproximadamente doce horas.

El hecho de no hacerlo aún más grande se debe, principalmente, a dos condicionantes:

- La existencia de una línea de alta tensión que atraviesa por encima la zona donde se va a ubicar el depósito. De forma que, sobre todo en la fase de construcción y debido a la maquinaria, una excesiva altura de depósito pueda conllevar a superposiciones de la zona de alcance con la zona de prohibición. Lo cual puede traer grandes problemas tecnológicos y administrativos, a nivel de permisos. [89]
- La necesidad de una muy buena capacidad portante del terreno. Ya que las cargas que transmite el depósito tienen que ser soportables por el medio que lo sostenga. Proyectando un tanque demasiado grande no se podrá asegurar dicha capacidad portante, por la naturaleza suelta de los suelos de alrededor. De ahí que se haya buscado un diseño que ocupe suficiente área en base como para que las cargas estén bien repartidas.
- Criterio económico. Habiendo planteado el depósito con 1570 metros cúbicos se asume que es capacidad suficiente como para que Petornor, haciendo una gestión lógica e inteligente pueda utilizar eficientemente la totalidad del volumen que se trata en Muskiz para cubrir sus necesidades de consumo de agua regenerada, sin necesidad de recurrir a tanques mayores que disparen el coste de inversión.

La estructura del depósito se realizará mediante paneles prefabricados de acero inoxidable ASTM A 240 Tp. 304L soldados entre sí por soldadura eléctrica. De forma que se garantice una mejor calidad del agua que con otros sistemas como el hormigón.

Se intentará que los paneles sean lo más grande posible, para así abaratar el coste de soldadura, por ello los paneles que formen el techo y el cuerpo del depósito tendrán unas dimensiones de 8x2,5 metros.

Los espesores de los paneles en el techo y el suelo serán de 10 milímetros. El cuerpo del depósito constará de dos niveles (alcanzando así los 5 metros de altura total). El nivel inferior, donde la presión hidrostática producida por el agua es mayor, el espesor será de 10 milímetros, mientras que en el superior será de 6 mm, siendo este el espesor mínimo permitido según la norma API 650.

Esto se traducirá, según fabricantes, en 215 metros de soldadura y 8,80318 metros cúbicos de acero. Que a densidad 7800 kg por metro cúbico, hacen un total de 68664,804 kilogramos.

En la base del depósito, para cumplir la función de soporte del tanque y de reparto de las cargas, se va a disponer una losa de hormigón armado de diámetro 21 metros con tacón perimetral. Por las características y la importancia de este elemento, la técnica empleada será la de hormigonado in situ.

## 1.3 ANEJO 2: CÁLCULO DE LA LÍNEA DE PRESIÓN DEL TRATAMIENTO

---

## ÍNDICE ANEJO LÍNEA DE PRESIÓN

---

1	Introducción .....	129
2	Datos de partida .....	129
3	Elección de tuberías .....	131
4	Datos de las tuberías.....	133
5	Pérdidas de carga en la línea. ....	134
5.1	Pérdidas de carga por el propio conducto .....	134
5.2	Pérdidas de carga localizadas .....	135
5.3	Pérdidas de carga en compartimentos .....	135
6	Cálculo de pérdidas de carga en las conducciones .....	136
6.1	Pérdidas de carga tubería: Decantador secundario – proceso de membrana.....	136
6.2	Pérdidas de carga tubería: Proceso de membrana – balsa de cloración .....	137
6.3	Pérdidas de carga tubería: Balsa de cloración – tanque de almacenamiento.....	138
6.4	Resumen de las pérdidas de carga en las conducciones del tratamiento terciario .....	139
7.1	Módulos de ultrafiltración .....	140
7.2	Cámara de cloración .....	140
8	Cálculo de la altura de presión en el tratamiento terciario.....	141
8.1	Elección del recorrido más desfavorable .....	141
8.2	Pérdidas en el recorrido más desfavorable .....	141
9	Consideraciones generales .....	142
10	Pérdidas de carga en el circuito de recirculación de aguas de lavado ..	142
10.1	Introducción .....	142
10.2	Datos a considerar .....	142
10.3	Pérdidas de carga tubería: Depósito lavado – Entrada equipo ultrafiltración (dirección contralavado).....	144

10.4 Pérdidas de carga tubería: Depósito lavado – Entrada equipo ultrafiltración (dirección lavado hacia adelante).....	146
10.5 Pérdidas de carga tubería: Salida equipo ultrafiltración – Pozo de bombeo.....	148
10.6 Pérdidas de carga totales en el ciclo de lavado.....	150
11 Información extra y aclarativa .....	151

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Velocidades recomendadas para fluidos en tuberías. [61].....	130
Figura 2: Materiales y características para tuberías. [61].....	131
Figura 3: Tabla de pérdidas de presión en las tuberías del tratamiento terciario. [Elaboración propia].....	139
Figura 4: Esquema ensanchamiento gradual. [98].....	145
Figura 5: Esquema ensanchamiento brusco. [98].....	149
Figura 6: Representación de las conducciones e instalaciones del tratamiento terciario de Muskiz. [Elaboración propia].....	151
Figura 7: Diagrama de Moody. [99].....	152

## 1 Introducción

Tal y como se ha comentado, para el tratamiento de regenerado del efluente de depuración de la EDAR de Muskiz, se va a necesitar una impulsión que permita que el fluido atraviese toda la instalación y llegue hasta el depósito de almacenamiento. Para ello, es necesario que mantenga una presión suficiente en cada punto, lo cual se conseguirá a través de un bombeo situado inmediatamente después de la decantación secundaria.

Para el correcto dimensionamiento de los equipos y, en general, de la instalación de impulsión es necesario determinar previamente la línea piezométrica a lo largo de todo el recorrido. De tal forma que se sepa cuál es la presión a suministrar al flujo para que este supere la diferencia de cotas entre el punto inicial y final, más la suma de las pérdidas de carga localizadas y de las propias tuberías e instalaciones que integran el tratamiento.

Este cálculo no solo afectará a la elección de equipos, como bombas o tuberías, sino que también influirá en las cotas de la lámina base de las instalaciones.

Por tanto, condicionará la posición geométrica de las estructuras a añadir. Que serán el equipo de ultrafiltración y el tanque de almacenamiento, ya que la cámara de cloración actual no se modificará.

## 2 Datos de partida

Para la realización de este Anejo de cálculos hidráulicos, se han utilizado y consultado recomendaciones e indicaciones de diferente bibliografía:

- ✓ “Mecánica de fluidos incompresibles y turbomáquinas hidráulicas” de José Agüera Soriano. [90]
- ✓ Apuntes de la asignatura “Mecánica de Fluidos e Hidráulica” de la EHU/UPV. De Pedro Arriaga Bayo. [91]
- ✓ Apuntes de la asignatura “Gestión de Recursos Hidráulicos” de la EHU/UPV. De Eneko Madrazo Uribeetxebarria. [91]
- ✓ Apuntes de la Universidad de Granada sobre “Diseño del sistema de tuberías y Cálculo de bombas”. [61]

En cuanto a los datos iniciales fundamentales, se considerará el caudal medio proporcionado por la Dirección de Explotación de la actual EDAR de Muskiz a través del funcionariado del Consorcio de Aguas Bilbao Bizkaia. La información de la que disponen dice que actualmente se tratan 3102 metros cúbicos de agua residual al día.

Teniendo en cuenta que en posteriores contactos no ha sido posible determinar la cantidad de horas diarias de operación de la depuradora se va a suponer, como suele ser en este tipo de instalaciones, que trabaja 24 horas al día.

Por lo que el caudal para el cálculo y dimensionamiento del tratamiento de regenerado, pasado a unidades más manejables y representativas, es de  $129,25 \text{ m}^3/h$ . Es decir, unos 130 metros cúbicos por hora.

Aunque tal y como se ha comentado en la memoria descriptiva de este mismo proyecto, existen planes de ampliar la depuradora a corto-medio plazo, por lo que ciertos sobredimensionamientos estarían más que justificados.

En cuanto a la velocidad del fluido, que vendrá determinada por el caudal y la sección de la conducción elegida, la experiencia aconseja estar dentro de una determinada horquilla que varía según que fuente se consulte.

De forma genérica se considera que la velocidad mínima tiene que ser del orden de 0,6 metros por segundo para evitar; Por un lado, que se produzca decantación de partículas sólidas que estén en suspensión y que conlleven cierto riesgo de obstrucción con el paso del tiempo y por otro, la elección de diámetros innecesariamente mayores a los requeridos, que se traducirá en un sobrecoste a todos los niveles.

Por el contrario, velocidades excesivas conducen a mayores pérdidas de carga, golpes de ariete más fuertes y erosiones y ruidos en las tuberías. Aun así, a mayores diámetros, mayores velocidades se podrán soportar en las conducciones sin que aparezcan estos fenómenos contraproducentes. Por lo que las velocidades máximas aconsejadas pueden ir desde los 0,6 metros por segundo en tuberías de 50 milímetros de diámetro, hasta los 3 metros por segundo en conducciones de 2.500 milímetros de diámetro. [89]

Como resumen, y teniendo en cuenta los diferentes puntos de una conducción se puede reparar en la siguiente tabla, aplicable al agua residual depurada que se hará circular por el tratamiento terciario (líquido poco viscoso):

Fluido	Tipo de Flujo	Velocidad	
		ft/s	m/s
Líquidos poco viscosos	Flujo por gravedad	0.5 – 1	0.15 – 0.30
	Entrada de bomba	1 – 3	0.3 – 0.9
	Salida de bomba	4 – 10	1.2 – 3
	Línea de Conducción	4 – 8	1.2 – 2.4

Figura 1: Velocidades recomendadas para fluidos en tuberías. [61]

### 3 Elección de tuberías

Para la elección del tipo de tubería hay que partir escogiendo un material adecuado.

Este tendrá que responder a las exigencias mecánicas de la presión interior, a los posibles ataques por la naturaleza química y biológica del agua y presentar diámetros comerciales que sean capaces de transportar los caudales de diseño a velocidades adecuadas.

En el caso de la depuradora objeto de proyecto, el volumen de agua que circula por las conducciones es elevado si se compara con las tuberías habituales y de uso cotidiano. Es por eso que la mayoría de polímeros que se suelen utilizar en estas tareas comunes, quedarán descartados para esta aplicación.

Además, teniendo en cuenta la referencia actual de las tuberías de la fase de depuración del complejo de la EDAR de Muskiz, los materiales metálicos pueden ser la mejor de las soluciones.

Sobre todo teniendo en cuenta que las presiones exigidas por el proceso de membrana requerirán materiales con buenas capacidades mecánicas.

MATERIAL	DIÁMETROS (mm)	INCONVENIENTES	VENTAJAS	MATERIAL	DIÁMETROS (mm)	INCONVENIENTES	VENTAJAS
<b>HORMIGÓN</b>	En masa: 300-400 Armado sin camisa: 500-2000 (ovoidal) 500-3000 (circular)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ataques químicos de aguas residuales transportadas.</li> <li>Vertidos a altas temperaturas son perjudiciales.</li> <li>Elevado peso tubos: instalación más difícil y mayor nº de uniones.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se fabrican a medida.</li> <li>Son económicas.</li> </ul>	<b>PLÁSTICOS</b>	PVC-U: entre 110 y 1000 mm PVC-U estructurado: hasta 1500 mm PE: hasta 2000 mm	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prestaciones mecánicas menores que las de hormigón y metálicos.</li> <li>Alto coef. dilatación térmica: sus caract. mecánicas disminuyen con la T° (Resist. a 50° se reduce al 60%).</li> <li>Envejecimiento (50 años de vida útil); propiedades mecánicas (E y <math>\sigma</math> a tracción) disminuyen con el t°. Dimensionar para valores a 50 años: a corto plazo sobredimensionados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ligeros.</li> <li>Económicos.</li> <li>Resist. a ataques químicos.</li> <li>Baja rugosidad.</li> <li>Flexibles.</li> <li>Buen comportamiento bajo heladas.</li> <li>No favorecen desarrollo hongos y algas.</li> <li>Para mejorar propiedades mecánicas frente a cargas exteriores: aligeramientos en su pared, tubos de pared estructurada que aumentan la resistencia al aplastamiento con menos material.</li> </ul>
<b>FIBROCEMENTO</b>	Se han usado mucho pero hoy día está prohibida su comercialización y utilización. (Orden 7/12/2001).						
<b>GRES</b>	Circular: 100-1400 Ovoidal: 200-900	<ul style="list-style-type: none"> <li>Frágil ante impactos puntuales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alta resist. agresividad química y abrasión mecánica y soportan T° extremas (-10 a 70 °C): adecuadas para A.R.I.</li> <li>No se corroe por acciones bioquímicas: adecuadas para R. separativa.</li> <li>Bajo coeficiente de dilatación térmica y baja rugosidad hidráulica: permite altas velocidades de circulación.</li> </ul>	<b>POLIÉSTER REFORZADO DE FIBRA DE VIDRIO</b>	200-2500	<ul style="list-style-type: none"> <li>Coste económico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se fabrican a medida adaptándose a las necesidades de cada proyecto.</li> <li>Muy flexibles.</li> <li>Muy resistentes a la corrosión y la abrasión.</li> <li>Gran capacidad hidráulica.</li> <li>Muy impermeables.</li> <li>Añirte una amplia gama de pH.</li> <li>Garantizados hasta temperaturas de 35° y pH de 1 a 10.</li> </ul>
<b>FUNDICIÓN DÚCTIL</b>	80-1200	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sensibles a la corrosión por ácidos y al ataque del SH<sub>2</sub>: proteger mediante revestimientos interiores y exteriores</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alta resistencia a la presión interior.</li> <li>Buena estanqueidad.</li> <li>Lisas</li> </ul>				

Figura 2: Materiales y características para tuberías. [61]

Como se puede ver en la figura 2, las tuberías de fundiciones dúctiles presentan una gama de diámetros muy variada. Por lo que se puede asegurar que se encontrará el tamaño requerido para transportar sin problema el caudal de diseño.

Además, la alta resistencia a la presión, la buena estanqueidad y la menor pérdida de carga que presentaría por su baja rugosidad hacen de este tipo de materiales una opción muy recomendable.

Por todo esto, las tuberías con las que se cubrirá el abastecimiento y el transporte de agua a través del tratamiento de afino y hasta el tanque de almacenamiento serán de acero inoxidable sin recubrimiento.

Para la definición final de estos elementos, hay que concretar el diámetro de los mismos. Y para ello, habrá que reparar en las consideraciones iniciales que se citaban en el apartado datos de partida, sobre las velocidades mínimas y máximas permitidas.

Finalmente, los márgenes aproximados de referencia que se han tomado en cuanto a la celeridad del fluido en los conductos han sido de 0,6 metros por segundo, como mínimo, y 2,5 como máximo. (Considerando el tipo y las características de la instalación)

Esto implica que, relacionando los términos anteriores a través de la fórmula que se presenta a continuación y teniendo en cuenta ambos extremos, se puedan calcular los diámetros mínimo y máximo:

$$Q(m^3/s) = V(m/s) * S(m^2)$$

Para la velocidad mínima de 0,6 m/s el diámetro resultado será el mayor de los posibles:

$$Q = V * S \rightarrow S = \frac{130 m^3/h * \frac{1 h}{3600 s}}{0.6 \frac{m}{s}} = 0,060185 m^2 \approx 0,0602 m^2$$

Teniendo en cuenta que se emplearán tuberías de sección circular:

$$S = \frac{\pi * D^2}{4} \rightarrow 0,0602 m^2 = \frac{\pi * D^2}{4} \rightarrow D = 0,276 m \rightarrow 276 mm$$

Por otro lado, considerando la velocidad máxima de 2,5 m/s se calcula de la misma manera el menor diámetro posible:

$$Q = V * S \rightarrow S = \frac{130 m^3/h * \frac{1 h}{3600 s}}{2.5 \frac{m}{s}} = 0,01444 m^2 \approx 0,0145 m^2$$

Utilizando tuberías circulares, el diámetro producto será:

$$S = \frac{\pi * D^2}{4} \rightarrow 0,0145 m^2 = \frac{\pi * D^2}{4} \rightarrow D = 0,1358 m \rightarrow 136 mm$$

Teniendo en cuenta que el caudal pueda aumentar con las futuras ampliaciones proyectadas, se tratará de emplear diámetros grandes dentro de la horquilla que va desde los 136 mm a los 276 mm.

Finalmente y tras consultar varios catálogos, se ha decidido que se emplearán tuberías de acero de 250 milímetros de diámetro eficaz o interior, ya que es la medida comercializada que mejor se ajusta a las exigencias del proyecto. [93,94]

#### 4 Datos de las tuberías

Por tanto, las tuberías que se utilizarán tendrán las siguientes características:

- Material: Acero nuevo sin recubrimiento
- Diámetro (D): 250 mm
- Sección:

$$S = \frac{\pi * D^2}{4} \rightarrow S(m^2) = \frac{\pi * 0,250^2}{4} \rightarrow S = 0,0490874 m^2$$

- Aspereza/ coeficiente de rugosidad (e): 0,045. [95]
- Velocidad de la línea:

$$Q = V * S \rightarrow V = \frac{130 m^3/h * \frac{1 h}{3600 s}}{0,0490874 m^2} = 0,736 \frac{m}{s} \approx 0,75 \frac{m}{s}$$

Se corrobora que la velocidad a la que circulará el agua dentro de las conducciones se encuentra entre los valores recomendados, por lo que el diámetro de 250 mm será el definitivo.

Reparando en la fórmula de  $Q = V * S$ , se ve que la velocidad es directamente proporcional al caudal y a la sección de tubería.

Por tanto, el hecho que se comentaba de que futuras ampliaciones traigan consigo aumentos de caudal a tratar, no va a suponer un problema para que las instalaciones del tratamiento terciario asimilen esa crecida. Ya que se ha dispuesto una tubería con un margen de diámetro suficiente, que permitiría asumir un caudal 3,4 veces superior (unos  $440 m^3/h$ ) en condiciones de cumplimiento de las velocidades.

## 5 Pérdidas de carga en la línea.

Tal y como se comentaba en la memoria descriptiva, en el apartado de bombeo de la descripción del proyecto, en las tuberías e instalaciones existen pérdidas de presión del fluido que se conduce. Debido a la fricción y oposición al paso que plantean diferentes elementos y/o equipos dispuestos en la red.

Estas pérdidas de carga se suelen calcular y clasificar por tipos:

### 5.1 Pérdidas de carga por el propio conducto

Estas pérdidas son denominadas pérdidas continuas ya que se producen por el rozamiento entre las paredes de la tubería y el fluido.

Para el cálculo de este tipo de pérdidas de carga se utilizará una de las fórmulas más aceptadas en la hidráulica clásica. La de Darcy-Weisbach, que es la siguiente:

$$h_f = \frac{f * L * V^2}{D * 2g}$$

Siendo:

- f = Factor de fricción de Darcy.
- L = Longitud de la tubería (m).
- V = Velocidad del agua (m/s).
- D = Diámetro de la tubería (m).

A su vez, el factor de fricción de Darcy se calcula como:

$$f = \frac{64}{N^{\circ} \text{ de Reynolds}}$$

El Número de Reynolds puede calcularse de la siguiente manera:

$$N^{\circ} \text{ de Reynolds} = \frac{V * D}{\nu}$$

Donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido. Que en el caso del agua, y suponiendo que la temperatura de la misma va a ser de entre 10 y 20 grados, será  $1,3 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . [96]

Esta fórmula para obtener el factor de fricción solo es válida para flujos laminares, es decir, cuando el Número de Reynolds sea menor a 2000.

Cuando el número de Reynolds sea  $> 4000$ , se determinará a través del ábaco de Moody, tratándolo como situación en régimen turbulento. (Se adjunta al final de este anejo)

## 5.2 Pérdidas de carga localizadas

Las pérdidas de carga localizadas son las que se dan de forma puntual en diferentes zonas concretas del circuito, debido a elementos singulares como pueden ser cambios de dirección mediante codos, embocaduras y desembocaduras, válvulas...

Para el cálculo de la caída de presión debida a este tipo de fenómenos la expresión a utilizar es la siguiente:

$$h_s = k * \frac{V^2}{2g}$$

Donde:

- K = coeficiente adimensional de pérdida de carga característica de cada elemento singular.
- V = velocidad del agua (m/s)

## 5.3 Pérdidas de carga en compartimentos

Para obtener la pérdida de carga en el proceso de membrana y en la cámara de contacto de cloración se ha recurrido, respectivamente, a la empresa suministradora y a ciertas fórmulas hidráulicas.

En el catálogo de la empresa que ofrece los módulos de ultrafiltración, se aporta el dato de la caída de presión debida a la operación.

Para calcular la pérdida en el laberinto/cámara de cloración habría que utilizar la siguiente fórmula:

$$\Delta h = \frac{(Q^2)^{1/3}}{(\mu * L)^2 * 2g}$$

Siendo:

- Q = Caudal
- L = Longitud del vertedero (m)
- $\mu$  = coeficiente del vertedero (vertedero perpendicular al flujo)

A continuación se realiza el cálculo de las pérdidas de carga en el tratamiento terciario para el supuesto más desfavorable.

Que será aquel en el que el agua se conduce hasta el tanque de almacenamiento.

## 6 Cálculo de pérdidas de carga en las conducciones

A continuación se calcula la pérdida de presión que sufre el fluido a lo largo de los diferentes tramos de tubería que conforman el circuito

### 6.1 Pérdidas de carga tubería: Decantador secundario – proceso de membrana

Las pérdidas de carga producidas entre el pozo de bombeo, dispuesto a continuación del decantador secundario, y el inicio del equipo de ultrafiltración son las siguientes:

#### 6.1.1 Datos iniciales

- Tipo de tubería: Acero nuevo sin recubrimiento
- Diámetro de la tubería: 250 mm
- Aspereza: 0,045
- Aspereza relativa (coeficiente de rugosidad/ diámetro):  $\frac{e}{D} = \frac{0,045}{250} = 1,8 * 10^{-4}$
- Longitud de la tubería: 16,5 m
- Caudal transportado:  $130 \text{ m}^3/h$
- Velocidad máxima: 0,75 m/s
- Nº de codos a 90º: 2 largos

#### 6.1.2 Resultado de la pérdida de presión en la conducción

Cálculo del número de Reynolds:

$$N^{\circ} \text{ de Reynolds} = \frac{V * D}{\nu} = \frac{0,75 \text{ m/s} * 0,25 \text{ m}}{1,3 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 144231 \gg 4000$$

⇒ Régimen turbulento (Ábaco de Moody)

Factor de fricción obtenido del diagrama:  $f = 0,0175$

Pérdidas de carga continuas:

$$h_f = \frac{f * L * V^2}{D * 2g} = \frac{0,0175 * 16,5 * 0,75^2}{0,25 * 2 * 9,81} = 0,03312 \text{ m}$$

Pérdidas de carga localizadas:

- Codos largos a 90º ( $K= 0,4$ ) →  $h_{sc} = k * \frac{V^2}{2g} = 0,4 * \frac{0,75^2}{2 * 9,81} = 0,0115 * 2 \text{ codos} = 0,023 \text{ m}$
- Embocadura ( $K= 0,5$ ) →  $h_{se} = k * \frac{V^2}{2g} = 0,5 * \frac{0,75^2}{2 * 9,81} = 0,0145 \text{ m}$
- Desembocadura ( $K= 1$ ) →  $h_{sd} = k * \frac{V^2}{2g} = 1 * \frac{0,75^2}{2 * 9,81} = 0,029 \text{ m}$

Pérdidas de carga totales que se dan en este tramo de tubería:

$$h_{total} = h_f + h_{sc} + h_{se} + h_{sd} = 0,03312 + 0,023 + 0,0145 + 0,029 = 0,1 \text{ m}$$

## 6.2 Pérdidas de carga tubería: Proceso de membrana – balsa de cloración

Tras hacer pasar al agua por la etapa de ultrafiltración, ha de llevarse la totalidad del caudal hasta la cámara de desinfección mediante hipoclorito de sodio. Las pérdidas de carga asociadas a esta etapa son las siguientes:

### 6.2.1 Datos iniciales

- Tipo de tubería: Acero nuevo sin recubrimiento
- Diámetro de la tubería: 250 mm
- Aspereza: 0,045
- Aspereza relativa (coeficiente de rugosidad/ diámetro):  $\frac{e}{D} = \frac{0,045}{250} = 1,8 * 10^{-4}$
- Longitud de la tubería: 66 m
- Caudal transportado:  $130 \text{ m}^3/\text{h}$
- Velocidad máxima: 0,75 m/s
- Nº de codos a 90º: 3 largos y 2 cortos

### 6.2.2 Resultado de la pérdida de presión en la conducción

Cálculo del número de Reynolds:

$$N^{\circ} \text{ de Reynolds} = \frac{V * D}{\nu} = \frac{0,75 \text{ m/s} * 0,25 \text{ m}}{1,3 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 144231 \gg 4000$$

⇒ Régimen turbulento (Ábaco de Moody)

Factor de fricción obtenido del diagrama:  $f = 0,0175$

Pérdidas de carga continuas:

$$h_f = \frac{f * L * V^2}{D * 2g} = \frac{0,0175 * 66 * 0,75^2}{0,25 * 2 * 9,81} = 0,1325 \text{ m}$$

Pérdidas de carga localizadas:

- Codos largos 90º ( $K=0,4$ ) →  $h_{scl} = k * \frac{V^2}{2g} = 0,4 * \frac{0,75^2}{2 * 9,81} = 0,0115 * 3 \text{ codos} = 0,0345 \text{ m}$
- Codos cortos 90º ( $K=0,9$ ) →  $h_{scc} = k * \frac{V^2}{2g} = 0,9 * \frac{0,75^2}{2 * 9,81} = 0,026 * 2 \text{ codos} = 0,052 \text{ m}$
- Embocadura ( $K=0,5$ ) →  $h_{se} = k * \frac{V^2}{2g} = 0,5 * \frac{0,75^2}{2 * 9,81} = 0,0145 \text{ m}$
- Desembocadura ( $K=1$ ) →  $h_{sd} = k * \frac{V^2}{2g} = 1 * \frac{0,75^2}{2 * 9,81} = 0,029 \text{ m}$

Pérdidas de carga totales que se dan en este tramo de tubería:

$$h_{total} = h_f + h_{scl} + h_{scc} + h_{se} + h_{sd} = 0,1325 + 0,0345 + 0,052 + 0,0145 + 0,029 = 0,2625 \text{ m}$$

### 6.3 Pérdidas de carga tubería: Balsa de cloración – tanque de almacenamiento

La última tubería a proyectar será la encargada de cubrir el tramo que va desde la salida de la cámara de cloración, hasta el tanque de almacenamiento del agua ya regenerada. Las pérdidas asociadas a esta última etapa de transporte son las siguientes:

#### 6.3.1 Datos iniciales

- Tipo de tubería: Acero nuevo sin recubrimiento
- Diámetro de la tubería: 250 mm
- Aspereza: 0,045
- Aspereza relativa (coeficiente de rugosidad/ diámetro):  $\frac{e}{D} = \frac{0,045}{250} = 1,8 * 10^{-4}$
- Longitud de la tubería: 77,5 m
- Caudal transportado:  $130 \text{ m}^3/h$
- Velocidad máxima: 0,75 m/s
- Nº de codos a 90º: 3 cortos

#### 6.3.2 Resultado de la pérdida de presión en la conducción

Cálculo del número de Reynolds:

$$N^{\circ} \text{ de Reynolds} = \frac{V * D}{\nu} = \frac{0,75 \text{ m/s} * 0,25 \text{ m}}{1,3 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 144231 \gg 4000$$

⇒ Régimen turbulento (Ábaco de Moody)

Factor de fricción obtenido del diagrama:  $f = 0,0175$

Pérdidas de carga continuas:

$$h_f = \frac{f * L * V^2}{D * 2g} = \frac{0,0175 * 77,5 * 0,75^2}{0,25 * 2 * 9,81} = 0,156 \text{ m}$$

Pérdidas de carga localizadas:

- Codos cortos 90º ( $K=0,9$ ) →  $h_{scc} = k * \frac{v^2}{2g} = 0,9 * \frac{0,75^2}{2 * 9,81} = 0,026 * 3 \text{ codos} = 0,078 \text{ m}$
- Embocadura ( $K=0,5$ ) →  $h_{se} = k * \frac{v^2}{2g} = 0,5 * \frac{0,75^2}{2 * 9,81} = 0,0145 \text{ m}$
- Desembocadura ( $K=1$ ) →  $h_{sd} = k * \frac{v^2}{2g} = 1 * \frac{0,75^2}{2 * 9,81} = 0,029 \text{ m}$

Pérdidas de carga totales que se dan en este tramo de tubería:

$$h_{total} = h_f + h_{scc} + h_{se} + h_{sd} = 0,156 + 0,078 + 0,0145 + 0,029 = 0,278 \text{ m}$$

#### 6.4 Resumen de las pérdidas de carga en las conducciones del tratamiento terciario

En la siguiente tabla se presentan las pérdidas de carga que sufre el fluido al recorrer las tuberías que integran el tratamiento de afino

Nº del tramo	Puntos a cubrir	Pérdida de carga (m)
1	Decantador secundario – proceso de membrana	0,1
2	Proceso de membrana – balsa de cloración	0,2625
3	Balsa de cloración – tanque de almacenamiento	0,278

Figura 3: Tabla de pérdidas de presión en las tuberías del tratamiento terciario.  
[Elaboración propia]

Si se suman las pérdidas de carga de los diferentes tramos, se puede obtener la caída total de presión en el fluido debida, exclusivamente, al transporte del mismo entre los diferentes equipos y/o puntos de la instalación.

Esta en total será de:

$$h_{totalconducción} = h_{t1} + h_{t2} + h_{t3} = 0,1 + 0,2625 + 0,278 = 0,641 \text{ m}$$

## 7 Pérdidas de carga en los compartimentos de la instalación

Además de en las conducciones, el fluido perderá presión en los diferentes equipos que componen el tratamiento terciario. Estas pérdidas de carga son las siguientes

### 7.1 Módulos de ultrafiltración

Según el catálogo del fabricante, la presión máxima del fluido a la entrada podrá ser de hasta 6 bares. Lo cual no supone ningún problema.

La caída de presión tras membrana (TMP), que será la debida a la operación, se moverá en torno a 1,5 y 2,1 bares dependiendo de lo sucio que se encuentre el filtro.

Por tanto, y para suponer el caso más desfavorable, se considerará que la caída de presión en el proceso de membrana será de 2,1 bares. [58]

### 7.2 Cámara de cloración

Tras intentar, sin éxito, obtener el dato de la longitud del vertedero a través de la Dirección de Explotación de la EDAR de Muskiz, para aplicar la fórmula recogida en el apartado 5.3 de este mismo documento, se ha buscado una alternativa para el cálculo de las pérdidas que se dan en el tanque de cloración.

Para ello se ha reparado en proyectos de similares características, concluyendo que la pérdida de carga en este tipo de instalaciones es prácticamente despreciable, en torno a los 0,05 o 0,1 metros.

Finalmente se tomará 0,1 metros como pérdida de carga en la cámara de cloración extrapoliándolo de esos otros proyectos. [97]

## 8 Cálculo de la altura de presión en el tratamiento terciario

### 8.1 Elección del recorrido más desfavorable

Tal y como ya se ha comentado, para el cálculo de la altura de presión a suministrar al fluido hay que ponerse en el supuesto más desfavorable.

En este caso será cuando el agua realiza el trayecto completo desde los decantadores secundarios, hasta el depósito de almacenamiento del agua regenerada.

La otra opción (no contemplando hacer uso en ningún caso, bajo las etapas de normal operación, de los diferentes by-passes que existen antes de la esterilización) sería evacuar el efluente inmediatamente después de su paso por el tanque de cloración. Siguiendo, por lo tanto, el recorrido que describe actualmente el agua depurada en el completo de Muskiz

Para esta segunda opción, la altura geométrica es un factor decisivo, ya que el punto de salida del tanque de cloración tiene una cota tal, que permite que el agua fluya por mera gravedad hasta el colector de salida sin que las pérdidas de carga supongan un problema.

La evacuación se hace a la altura del edificio de flotación y recepción/pretratamiento del agua. Es decir, varios metros por debajo del resto de instalaciones que componen la EDAR. [72]

### 8.2 Pérdidas en el recorrido más desfavorable

Por tanto la pérdida de carga total, incluyendo los distintos compartimentos además de los tramos de tubería, se calculará como:

$$\text{Tubería tramo 1} + \text{Proceso de membrana (módulos ultrafiltración)} + \text{Tubería tramo 2} + \text{balsa de cloración} + \text{Tubería tramo 3} = 0,1 + 21,41 + 0,2625 + 0,1 + 0,278 = 22,16 \text{ m}$$

La pérdida de carga total en el circuito del tratamiento terciario, desde la decantación secundaria hasta el tanque de almacenamiento, es de 22,16 y la diferencia geométrica entre el pozo de bombeo y el depósito de almacenamiento es de 2 metros.

Por lo tanto, las bombas a instalar deberán suministrar una altura de presión de unos 25 metros.

Al final de este documento se presentará un croquis aproximado que represente el recorrido y la trayectoria de las conducciones y, además, las diferentes instalaciones que conforman la ampliación de la EDAR de Muskiz.

## 9 Consideraciones generales

Debido a que se desconoce la altura de presión con la que cuenta el agua a la salida de los decantadores secundarios, se ha optado por asimilar que esta será cero desde el pozo de bombeo.

En el dimensionamiento y posterior cálculo de la línea de presión de las tuberías, no se ha dado demasiada importancia al trazado en alzado de las conducciones, debido a que la diferencia de alturas geométricas de las diferentes instalaciones que conforman el tratamiento terciario será prácticamente despreciable. El solar sobre el que se van a ubicar es totalmente plano.

En la EDAR de Muskiz solo las etapas de pretratamiento y bombeo inicial se encuentran a un nivel diferente. Tal y como se ha comentado previamente, dichas etapas están varios metros por debajo de los equipos que conforman el tratamiento primario, el biológico y el terciario/ de afino.

## 10 Pérdidas de carga en el circuito de recirculación de aguas de lavado

### 10.1 Introducción

Para el enjuague de los diferentes filtros que componen los módulos de membrana, se programará un sistema de lavado a base de líquido.

Consiste en una bomba que impulsa agua limpia, hacia un lado u otro de la membrana, desde un depósito de 75 metros cúbicos diseñado para tal efecto. A ese agua limpia se le añaden una serie de aditivos químicos que faciliten y mejoren el enjuague.

Este sistema actuará durante periodos cortos con una frecuencia fijada.

Posteriormente, el agua del lavado se conducirá al pozo de bombeo situado a continuación de los decantadores, para que se regenere formando de nuevo parte del circuito del tratamiento terciario.

### 10.2 Datos a considerar

La propia empresa distribuidora de las membranas proporciona, una vez más a través de su catálogo, diferente información a tener en cuenta para la definición de la etapa de lavado.

Otra información adicional que no está recogida entre las especificaciones de los productos, como la duración y frecuencia de los ciclos de enjuague, se ha obtenido gracias al contacto directo vía e-mail.

El caudal a bombear necesario para llevar a cabo este proceso será de:

- $13,6 \text{ m}^3/\text{h}$  para la dirección de retrolavado
- $3,4 \text{ m}^3/\text{h}$  para la dirección de lavado hacia adelante

El diámetro de las tuberías en el interior del equipo de UF será:

- 250 mm en el caso de la tubería de alimentación de retrolavado
- 250 mm en el caso de la tubería de salida del retrolavado
- 150 mm en el caso de la tubería de alimentación del lavado hacia adelante
- 250 mm en el caso de la tubería de salida del lavado hacia adelante

El diámetro de las tuberías de abastecimiento del agua desde el depósito hasta el equipo de membrana será de 100 mm, donde después empalmarán con las interiores eligiéndose el recorrido de contralavado o lavado hacia adelante mediante una válvula en T. Estará justificado que no cumplan con las condiciones de velocidades, mínimas en este caso, ya que se trata de caudales reducidos de agua limpia, que no dará lugar a sedimentación, que circulan por tramos cortos.

La caída máxima global de presión por la operación de lavado, que será en la fase de contralavado, es de:

- 2,5 bares

Mientras que en lavado hacia adelante la caída es bastante menor; de 1,5 bares.

Las características de los ciclos de operación de esta etapa son:

- Frecuencia: uno cada 20-60 minutos
- Duración: entre 40 y 120 segundos por ciclo

El depósito de alimentación será, como se ha dicho, de 75 metros cúbicos de capacidad.

Para calcular el bombeo necesario para esta etapa de lavado, además de la caída de presión de 2,5 bares debida exclusivamente a la operación de enjuague habrá que tener en cuenta la debida al tramo de tubería que va desde el depósito hasta el equipo de membrana.

Y de igual manera, la conducción que cubre la distancia entre la salida del lavado y el pozo de bombeo donde se verterán las aguas.

### 10.3 Pérdidas de carga tubería: Depósito lavado – Entrada equipo ultrafiltración (dirección contralavado)

Pérdidas de carga en el tramo que va desde el depósito de agua limpia hasta la entrada de los módulos de ultrafiltración. Cuando el proceso de limpieza es en la dirección de retrolavado. (Diferente caudal y tubería con la que empalmar, con respecto al lavado hacia adelante)

#### 10.3.1 Datos iniciales

- Tipo de tubería: Acero nuevo sin recubrimiento
- Diámetro de la tubería: 100 mm
- Aspereza: 0,045
- Aspereza relativa (coeficiente de rugosidad/ diámetro):  $\frac{e}{D} = \frac{0,045}{100} = 4,5 * 10^{-4}$
- Longitud de la tubería: 8 m
- Caudal transportado:  $13,6 \text{ m}^3/h$
- Velocidad máxima: 0,482 m/s
- N° de codos a 90°: 1 largo

#### 10.3.2 Resultado de la pérdida de presión en la conducción

Cálculo del número de Reynolds:

$$N^{\circ} \text{ de Reynolds} = \frac{V * D}{\nu} = \frac{0,482 \text{ m/s} * 0,1 \text{ m}}{1,3 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 37077 > 4000$$

⇒ Régimen turbulento (Ábaco de Moody)

Factor de fricción obtenido del diagrama:  $f = 0,02370$

Pérdidas de carga continuas:

$$h_f = \frac{f * L * V^2}{D * 2g} = \frac{0,02370 * 8 * 0,482^2}{0,1 * 2 * 9,81} = 0,0225 \text{ m}$$

Pérdidas de carga localizadas:

- Codo largo 90° ( $K=0,4$ ) →  $h_{scl} = k * \frac{V^2}{2g} = 0,4 * \frac{0,482^2}{2 * 9,81} = 0,005 \text{ m}$
- Embocadura ( $K=0,5$ ) →  $h_{se} = k * \frac{V^2}{2g} = 0,5 * \frac{0,482^2}{2 * 9,81} = 0,006 \text{ m}$
- Válvula T con salida lateral ( $K=1,8$ ) →  $h_{vT} = k * \frac{V^2}{2g} = 1,8 * \frac{0,482^2}{2 * 9,81} = 0,022 \text{ m}$

Pérdidas por ensanchamiento gradual de sección:

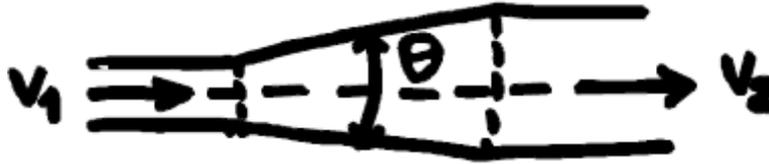


Figura 4: Esquema ensanchamiento gradual. [98]

Se calcularán a través de la fórmula de Gibson para este tipo de casos

El cambio de sección en el empalme se proyectará con un ángulo de conicidad de 6°, por haber espacio suficiente y estar demostrado que este es el que menos pérdida de presión crea. [98]

$$h_{cs} = \lambda * \left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2}\right) * \frac{v_1^2}{2 * g}$$

Donde:

- $\lambda$  es el coeficiente según ángulo de conicidad
- $D_1$  es el diámetro de entrada en el ensanchamiento
- $D_2$  es el diámetro de salida en el ensanchamiento
- $V_1$  es la velocidad de entrada al ensanchamiento, en la tubería de menor diámetro

$$h_{cs} = \lambda * \left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2}\right) * \frac{v_1^2}{2 * g} = 0,14 * \left(1 - \frac{0,1^2}{0,25^2}\right) * \frac{0,482^2}{2 * 9,81} = 0,0014 \text{ m}$$

Pérdidas de carga totales que se dan en este tramo de tubería:

$$h_{total} = h_f + h_{scl} + h_{se} + h_{vT} + h_{cs} = 0,0225 + 0,005 + 0,006 + 0,022 + 0,0014 = 0,06 \text{ m}$$

Puede apreciarse como la caída de presión es muy pequeña

## 10.4 Pérdidas de carga tubería: Depósito lavado – Entrada equipo ultrafiltración (dirección lavado hacia adelante)

Pérdidas de carga en el tramo que va desde el depósito de agua limpia hasta la entrada de los módulos de ultrafiltración. Cuando el proceso de limpieza es en la dirección de lavado hacia adelante. (Diferente caudal y tubería con la que empalmar, con respecto al contralavado)

### 10.4.1 Datos iniciales

- Tipo de tubería: Acero nuevo sin recubrimiento
- Diámetro de la tubería: 100 mm
- Aspereza: 0,045
- Aspereza relativa (coeficiente de rugosidad/ diámetro):  $\frac{e}{D} = \frac{0,045}{100} = 4,5 * 10^{-4}$
- Longitud de la tubería: 8 m
- Caudal transportado:  $3,4 \text{ m}^3/h$
- Velocidad máxima: 0,121 m/s
- N° de codos a 90°: 1 largo

### 10.4.2 Resultado de la pérdida de presión en la conducción

Cálculo del número de Reynolds:

$$N^{\circ} \text{ de Reynolds} = \frac{V * D}{\nu} = \frac{0,121 \text{ m/s} * 0,1 \text{ m}}{1,3 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 9308 > 4000$$

⇒ Régimen turbulento (Ábaco de Moody)

Factor de fricción obtenido del diagrama:  $f = 0,0315$

Pérdidas de carga continuas:

$$h_f = \frac{f * L * V^2}{D * 2g} = \frac{0,0315 * 8 * 0,121^2}{0,1 * 2 * 9,81} = 0,002 \text{ m}$$

Pérdidas de carga localizadas:

- Codo largo 90° ( $K=0,4$ ) →  $h_{scl} = k * \frac{V^2}{2g} = 0,4 * \frac{0,121^2}{2 * 9,81} = 0,0003 \text{ m}$
- Embocadura ( $K=0,5$ ) →  $h_{se} = k * \frac{V^2}{2g} = 0,5 * \frac{0,121^2}{2 * 9,81} = 0,0004 \text{ m}$
- Válvula T con salida lateral ( $K=1,8$ ) →  $h_{vT} = k * \frac{V^2}{2g} = 1,8 * \frac{0,121^2}{2 * 9,81} = 0,0014 \text{ m}$

### Pérdidas por ensanchamiento gradual de sección:

Se calcularán a través de la fórmula de Gibson para este tipo de casos

El cambio de sección en el empalme se proyectará con un ángulo de conicidad de 6°, por haber espacio suficiente y estar demostrado que este es el que menos pérdida de presión crea. [98]

$$h_{cs} = \lambda * \left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2}\right) * \frac{v_1^2}{2 * g}$$

Donde:

- $\lambda$  es el coeficiente según ángulo de conicidad
- $D_1$  es el diámetro de entrada en el ensanchamiento
- $D_2$  es el diámetro de salida en el ensanchamiento
- $V_1$  es la velocidad de entrada al ensanchamiento, tubería de menor diámetro

$$h_{cs} = \lambda * \left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2}\right) * \frac{v_1^2}{2 * g} = 0,14 * \left(1 - \frac{0,1^2}{0,15^2}\right) * \frac{0,121^2}{2 * 9,81} = 0,00006 \text{ m}$$

Pérdidas de carga totales que se dan en este tramo de tubería:

$$h_{total} = h_f + h_{scc} + h_{se} + h_{vT} + h_{cs} = 0,002 + 0,0003 + 0,0004 + 0,0014 + 0,00006 = 0,00416 \text{ m}$$

En este caso la caída de presión es aún más pequeña. Totalmente despreciable

### 10.5 Pérdidas de carga tubería: Salida equipo ultrafiltración – Pozo de bombeo

El último tramo a cubrir en este proceso de lavado es el que conecta la salida de la instalación de ultrafiltración, con el pozo de bombeo donde se verterán las aguas para que retornen al ciclo de regenerado.

Las tuberías de evacuación del agua de lavado son del mismo diámetro, 250 mm, independientemente del ciclo que se realice. Por tanto, el caso más desfavorable en cuanto a pérdida de presión será aquel que porte mayor caudal. Así es que se estudiará el ciclo de contralavado

En cualquier caso, se producirá tras la salida del equipo de membrana un estrechamiento de sección hasta los 100 mm. Ya que con tubería de 250 mm de diámetro y caudal de 13,6 metros cúbicos por hora la velocidad producto sería demasiado lenta (0,08 m/s)

#### 10.5.1 Datos iniciales

- Tipo de tubería: Acero nuevo sin recubrimiento
- Diámetro de la tubería: 100 mm
- Aspereza: 0,045
- Aspereza relativa (coeficiente de rugosidad/ diámetro):  $\frac{e}{D} = \frac{0,045}{100} = 4,5 * 10^{-4}$
- Longitud de la tubería: 40,2 m
- Caudal transportado: 13,6 m<sup>3</sup>/h
- Velocidad máxima: 0,482 m/s
- N° de codos a 90°: 2 largos

#### 10.5.2 Resultado de la pérdida de presión en la conducción

Cálculo del número de Reynolds:

$$N^{\circ} \text{ de Reynolds} = \frac{V * D}{\nu} = \frac{0,482 \text{ m/s} * 0,1 \text{ m}}{1,3 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} = 37077 > 4000$$

⇒ Régimen turbulento (Ábaco de Moody)

Factor de fricción obtenido del diagrama:  $f = 0,02370$

Pérdidas de carga continuas:

$$h_f = \frac{f * L * V^2}{D * 2g} = \frac{0,02370 * 40,2 * 0,482^2}{0,1 * 2 * 9,81} = 0,113 \text{ m}$$

Pérdidas de carga localizadas:

- Codos largos 90° ( $K=0,4$ )  $\rightarrow h_{scl} = k * \frac{v^2}{2g} = 0,4 * \frac{0,482^2}{2 * 9,81} = 0,005 * 2 \text{ codos} = 0,01 \text{ m}$
- Desembocadura ( $K=1$ )  $\rightarrow h_{sd} = k * \frac{v^2}{2g} = 1 * \frac{0,482^2}{2 * 9,81} = 0,012 \text{ m}$

Pérdidas por estrechamiento brusco de sección:

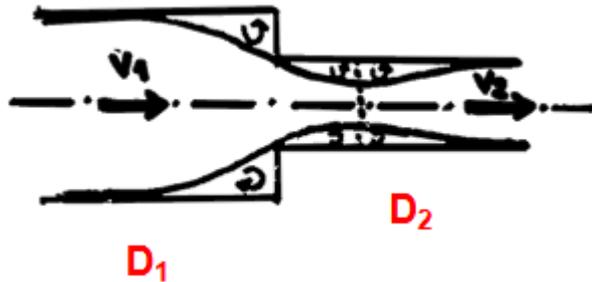


Figura 5: Esquema estrechamiento brusco. [98]

Hasta  $D_2/D_1 = 0,76$ , como es el caso  $0,1/0,25 = 0,4$  se puede tomar  $\lambda = 0,42$  para la expresión de Gibson:

$$h_{cs} = \lambda * \left(1 - \frac{D_2^2}{D_1^2}\right) * \frac{v_2^2}{2 * g}$$

Donde:

- $\lambda$  es un coeficiente obtenido en función de la relación de diámetros  $D_1/D_2$
- $D_1$  es el diámetro de entrada en el estrechamiento
- $D_2$  es el diámetro de salida en el estrechamiento
- $v_2$  es la velocidad en la tubería de diámetro pequeño, la de salida

$$h_{cs} = \lambda * \left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2}\right) * \frac{v_2^2}{2 * g} = 0,42 * \left(1 - \frac{0,1^2}{0,25^2}\right) * \frac{0,482^2}{2 * 9,81} = 0,0042 \text{ m}$$

Pérdidas de carga totales que se dan en este tramo de tubería:

$$h_{total} = h_f + h_{scl} + h_{sd} + h_{cs} = 0,113 + 0,01 + 0,012 + 0,022 + 0,0042 = 0,1612 \text{ m}$$

### 10.6 Pérdidas de carga totales en el ciclo de lavado

Tras realizar los cálculos se puede observar que la práctica totalidad de la caída de presión que experimente el fluido en el proceso de lavado, se deberá a la propia operación de la limpieza de los filtros (presión tras membrana)

Aun así para el cálculo global se considerarán las pérdidas de la línea y sus elementos, en el supuesto más desfavorable, y la diferencia geométrica de cota entre el punto de captación y vertido del agua, que es de 2,5 a la contra.

*Tubería tramo 1 + Proceso de contralavado en los módulos de ultrafiltración*  
*+ Tubería tramo 2 = 0,06 + 25,5 + 0,1612 = 25,73 m*

Por tanto, la pérdida de carga total en el circuito de lavado, desde el tanque de agua limpia hasta el pozo de bombeo, es de 25,73 metros y la diferencia geométrica entre el pozo de bombeo y el tanque de almacenamiento es de 2,5 metros.

Las bombas para el lavado deberán proporcionar al fluido una altura de 28,23 metros, es decir, unos 30 metros.

## 11 Información extra y aclarativa

Por un lado se presenta un croquis/esquema, aproximado y en planta, de la línea y las instalaciones de nueva creación que conforman el tratamiento terciario.

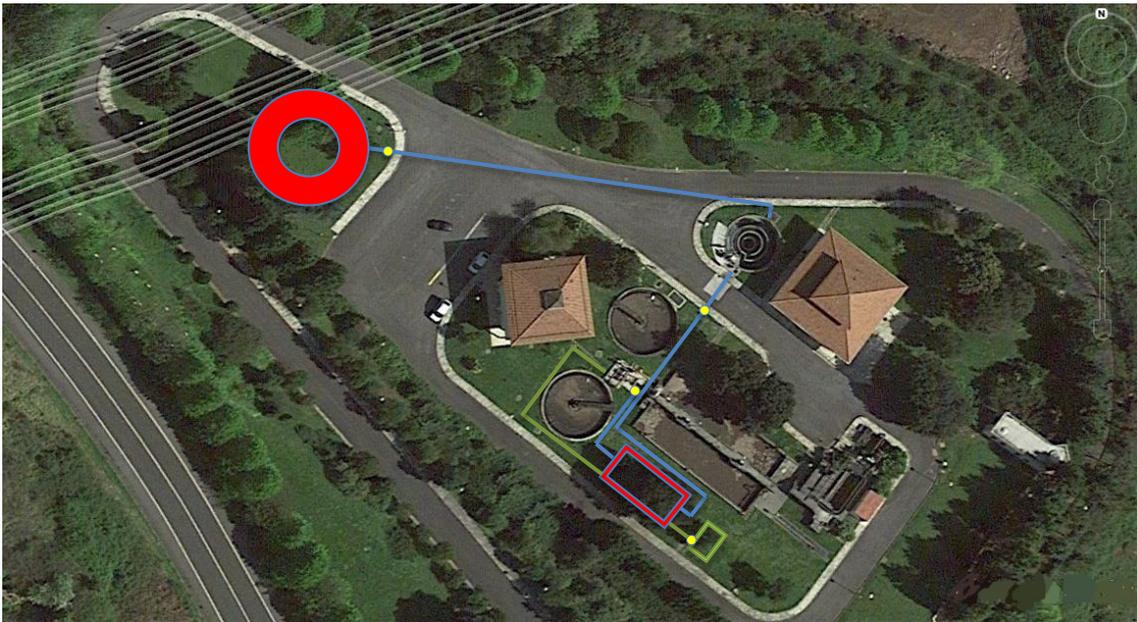


Figura 6: Representación de las conducciones e instalaciones del tratamiento terciario de Muskiz. [Elaboración propia]

En azul se representan los diferentes tramos de tubería que conforman el tratamiento terciario, propiamente dicho.

El rectángulo y círculo rellenos de color rojo son la instalación de ultrafiltración y el depósito del agua regenerada, respectivamente.

En verde oliva se representan los tramos de tubería para la etapa de lavado de filtros.

El rectángulo verde sería el depósito de agua limpia para las operaciones de lavado.

Para ambas líneas, los puntos de color amarillo son los cambios en el trazado en alzado de las mismas.

Por otro lado, se presenta el diagrama/ábaco de Moody. Que se ha utilizado para la obtención del factor “f” de fricción en las pérdidas de carga continuas de la línea de presión.

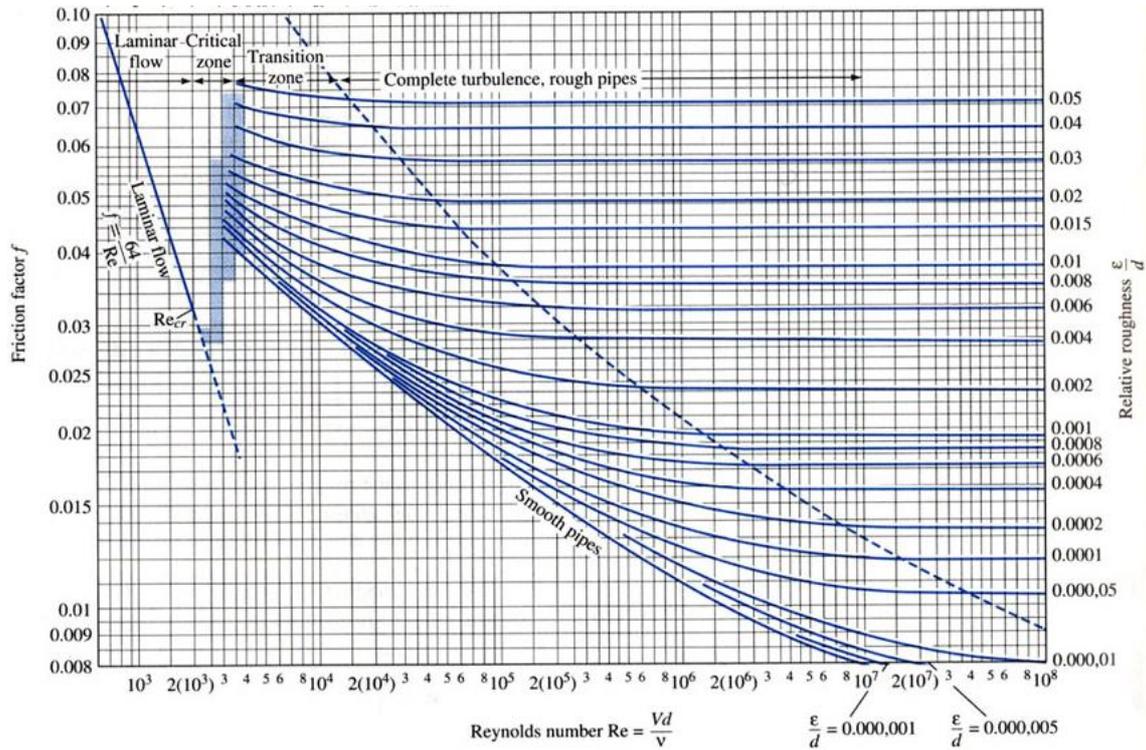


Figura 7: Diagrama de Moody. [99]