

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA Y GESTIÓN
AMBIENTAL**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***PROCESO DE RECUPERACIÓN DE AGUA DESDE
LA LÍNEA DE FANGOS DE UNA ETAP***

Estudiante
Director
Departamento
Curso académico

Sampedro Melchor, Aitor
García Fernández, José Antonio
Ingeniería Química y del Medio Ambiente
2021-2022

Bilbao, 2 de marzo de 2022

Resumen

El agua es un bien limitado, el cual se debe aprovechar de manera eficaz para garantizar que todas las personas tengan acceso a ella. Su consumo aumenta con la superpoblación mundial y resulta de vital importancia desarrollar tecnologías capaces de optimizar los tratamientos a realizar.

Con el fin de garantizar la sostenibilidad en el tratamiento de aguas potables, este trabajo ha analizado diferentes alternativas para la recuperación del agua contenida en el fango producido en la Estación de Tratamiento de Aguas Potables del municipio de Amorebieta-Etxano (Vizcaya).

Entre las alternativas expuestas, se ha escogido aquella que figuraba más viable, cumpliendo con criterios técnicos, económicos, legales y medioambientales. Así, se ha optado por la deshidratación de los fangos mediante la utilización de una centrífuga y su consecuente recuperación del agua como la tecnología óptima para cumplir los objetivos expuestos.

Abstract

Water is a limited resource, which we must make the most of it so as to ensure that everyone has access to it. Its consumption is growing with the global overpopulation, and it is very important to develop technologies which are able to optimize their treatments.

Having the aim to guarantee the sustainability of these water treatments, this project has analyzed different alternatives to recover some of the water contained in the sludge of the Drinking Water Treatment Plant of Amorebieta-Etxano (Vizcaya).

The most viable technology has been chosen between all the alternatives, regarding to technical, economical, legal and environmental criteria. Therefore, sludge dehydration by a spin-dryer and its resulting water recovery is the best way to achieve the expected objectives.

Laburpena

Ura ondasun mugatua da, eta modu eraginkorrean aprobetxatu behar da pertsona guztiek sarbidea izan dezaten. Kontsumoa areagotu egiten da munduko superpopulazioarekin, eta oso garrantzitsua da egin beharreko tratamenduak optimizatzeko gai diren teknologiak garatzea.

Edateko uren tratamenduan jasagarritasuna bermatzeko, Zornotzako (Bizkaia) Edateko Uren Araztegian sortutako lohian dagoen ura berreskuratzeko hainbat aukera aztertu ditu lan honek.

Azaldutako alternatiben artean, bideragarriena zena aukeratu da, irizpide teknikoak, ekonomikoak, legezkoak eta ingurumenekoak betez. Hala, zentrifugagailu baten bidez lohia deshidratatzea eta, horren ondorioz, ura tratamendu berrirako berreskuratzea aukeratu da azaldutako helburuak betetzeko teknologia hoberentzat.

Índice

1.	Introducción	1
1.1.	Contexto.....	1
1.2.	Objetivos y alcance del proyecto.....	5
1.3.	Beneficios que aporta este proyecto.....	6
1.4.	Metodología utilizada en el proyecto.....	6
1.4.1.	Descripción de las fases del proyecto	7
1.4.2.	Planificación.....	7
1.4.3.	Diagrama de Gantt	8
2.	Descripción de la situación actual	9
2.1.	Origen del agua	10
2.2.	Línea de agua	11
2.3.	Línea de fangos	15
2.4.	Procesos auxiliares.....	21
2.4.1.	Lavado de filtros	21
2.4.2.	Purga del decantador	23
3.	Análisis de alternativas.....	25
3.1.	Vertido directo a colector municipal	25
3.2.	Separación mediante clasificador de arenas.....	26
3.3.	Deshidratación mediante centrífuga	29
3.4.	Deshidratación mediante filtro prensa.....	31
4.	Solución adoptada	33
4.1.	Proceso de recuperación de agua mediante deshidratación con centrífuga..	35
4.1.1.	Conducción de las corrientes de fango	37
4.1.2.	Decantaciones y espesamiento en depósito tampón	38
4.1.3.	Acondicionamiento del fango	39
4.1.4.	Deshidratación por centrifuga.....	43
4.1.5.	Evacuación de fangos	44
4.1.6.	Cálculos del nuevo proceso	44
4.1.7.	Gestión de residuos	49
4.2.	Equipos comerciales a adquirir para el proceso de deshidratación.....	51
4.2.1.	Preparador de floculante.....	51
4.2.2.	Bombas dosificadoras de floculante	52
4.2.3.	Bomba de alimentación a centrífuga	53
4.2.4.	Centrífuga	54

4.2.5. Contenedor	55
5. Presupuesto	56
5.1. Costes de recursos materiales	56
5.2. Costes de recursos humanos	57
5.3. Presupuesto total.....	57
6. Conclusiones.....	58
7. Referencias	60
Anexo: Planos	63
Plano I: ETAP San Juan.....	65
Plano II: Proceso de fangos actual.....	69
Plano III: Proceso de fangos propuesto.....	73

Índice de figuras

Figura 1. Vista aérea de las instalaciones de la ETAP de San Juan. Imagen cedida por Aquambiente S.L.U.	2
Figura 2. Localización de Amorebieta-Etxano dentro de Euskadi. Fuente: ArcMap 10.8.1.	3
Figura 3. Diagrama de fases del proyecto.	7
Figura 4. Diagrama de Gantt del proyecto.	8
Figura 5. Plano con las instalaciones principales de la ETAP de San Juan. Imagen cedida por Aquambiente S.L.U.....	9
Figura 6. Procesos de la ETAP de San Juan. Imagen cedida por Aquambiente S.L.U.....	10
Figura 7. Diagrama de las captaciones de la ETAP de San Juan. Imagen cedida por Aquambiente S.L.U.	11
Figura 8. Obra de llegada del agua bruta desde las captaciones.	12
Figura 9. Decantador tipo Acclerator. Fuente: Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Tema 20: Decantadores especiales.	13
Figura 10. Instalaciones principales de la línea de agua.	14
Figura 11. Diagrama del proceso de recuperación de agua. Imagen cedida por Aquambiente S.L.U.	15
Figura 12. Canales de medición de fangos.	16
Figura 13. Instalaciones del proceso de fangos.....	17
Figura 14. Válvula flotadora del Pozo 2.....	18
Figura 15. Clasificador de arenas.....	19
Figura 16. Diagrama de la operación de lavado de filtros.....	22
Figura 17. Válvula y conducción de la purga de fondo.....	23
Figura 18. Válvula de purga de concentradores.....	23
Figura 19. Alternativa 1: Vertido directo a colector.....	25
Figura 20. Esquema simple de un clasificador de arenas. Fuente: Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Tema 28: Pretratamientos.....	26
Figura 21. Alternativa 2: Separación mediante clasificador de arenas.....	28
Figura 22. Esquema simple de una centrífuga. Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Tema 35: Deshidratación y evacuación de fangos.	29
Figura 23. Alternativa 3: Deshidratación mediante centrífuga.....	30
Figura 24. Esquema simple de un filtro prensa. Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Tema 35: Deshidratación y evacuación de fangos.	31
Figura 25. Alternativa 4: Deshidratación mediante filtro prensa.....	32
Figura 26. Esquema del proceso de recuperación de agua y tratamiento de fangos....	35
Figura 27. Esquema simple de un desarenador elemental. Fuente: Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Tema 28: Pretratamientos.....	37
Figura 28. Esquema simple de un espesador por gravedad. Fuente: Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Tema 33: Tratamiento de fangos.....	38
Figura 29. Esquema del proceso de acondicionamiento químico del fango espesado.	39
Figura 30. Esquema de funcionamiento de la centrífuga.	43
Figura 31. Parámetros de cálculo del proceso.	45
Figura 32. Esquema del preparador de floculante. Fuente: 'Politech'.....	51
Figura 33. Bombas dosificadoras de floculante. Fuente: 'Flygt'.	52
Figura 34. Bomba de alimentación a centrífuga. Fuente: 'Netzshe'.	53

Figura 35. Centrífuga. Fuente: 'Andritz' .	54
Figura 36. Plano del contenedor de obra escogido. Fuente: 'GRV Ambient'	55

Índice de gráficos

Gráfico 1. Curva característica cualitativa del consumo diario del municipio Amorebieta-Etxano.	4
---	---

Índice de tablas

Tabla 1. Equipos del sistema de recuperación de agua.	20
Tabla 2. Evaluación cualitativa de las alternativas.	34
Tabla 3. Listado de instalaciones y equipos requeridos para el proceso de deshidratación.	36
Tabla 6. Parámetros de acondicionamiento del fango con polielectrolito.	40
Tabla 4. Punto de funcionamiento de una bomba de fangos.	45
Tabla 5. Parámetros del proceso de deshidratación.	46
Tabla 7. Estimación de caudales del nuevo proceso.	48
Tabla 8. Parámetros de cálculo de la producción volumétrica de fangos.	49
Tabla 9. Características principales de las bombas dosificadoras. Fuente: 'Flygt'	52
Tabla 10. Características principales de la bomba de alimentación a la centrífuga. Fuente: 'Netzshe'	53
Tabla 11. Características principales de la centrífuga. Fuente: 'Andritz'.	54
Tabla 12. Costes de recursos materiales del proyecto.	56
Tabla 13. Costes de recursos humanos del proyecto.	57

Definiciones y abreviaturas

A continuación, se detallan en la siguiente tabla todas las abreviaturas de las magnitudes y conceptos utilizados a lo largo del proyecto.

Definiciones y abreviaturas.

Descripción	Abreviatura	Unidad
Altura de bomba	H	m
Cal	CaO	-
Cloruro Férrico	Cl ₃ Fe	-
Caudal de Entrada a Espesador	Q _{in} ^{esp}	m ³ h ⁻¹
Caudal de Entrada a la Planta	Q	m ³ h ⁻¹
Caudal de Fango Deshidratado	Q _{fango}	m ³ h ⁻¹
Caudal de Fango Espesado	Q _{esp}	m ³ h ⁻¹
Caudal de Recuperación de Agua Total	Q _{rec}	m ³ h ⁻¹
Caudal de Recuperación de Agua Total Actual	Q' _{rec}	m ³ h ⁻¹
Caudal de Recuperación Centrífuga	Q _{rec3}	m ³ h ⁻¹
Caudal de Recuperación del Espesador	Q _{rec2}	m ³ h ⁻¹
Caudal de Recuperación del Pozo 2	Q _{rec1}	m ³ h ⁻¹
Concentración de Acrilamida en el Fango	C _{acr}	μg L ⁻¹
Concentración de Acrilamida en Polielectrolito	x _{acr}	%
Concentración de Acrilamida Preparada	C _{acr} ^{prep}	μg L ⁻¹
Concentración de Polielectrolito Preparado	C _{poli}	kg m ⁻³ H ₂ O
Concentración Límite de Acrilamida	C _{lim}	μg L ⁻¹
Concentración Total de Acrilamida	C _{acr} ^{tot}	μg L ⁻¹
Estación de Depuración de Aguas Residuales	EDAR	-
Estación de Tratamiento de Aguas Potables	ETAP	-
Porcentaje en Peso de Materia Seca	MS	%
Porcentaje en Peso de Materia Seca de Entrada a Espesador	x _{in} ^{esp}	%
Porcentaje en Peso de Materia Seca de Salida de la Centrífuga	x _{rec3}	%
Porcentaje en peso de Materia Seca de Salida del Espesador	x _{out} ^{esp}	%
Porcentaje en Peso de Materia Seca Final	x _{fango}	%
Potencia	P	kW
Producción Volumétrica de Fangos por Centrifugado	P ₀	m ³
Supervisory Control and Data Acquisition	SCADA	-
Tiempo de Centrifugado	t ₀	h
Tiempo de Retención Hidráulico	TRH	h
United States Department of Agriculture	USDA	-
Valor Acumulado de Ponderación	S	-
Velocidad Ascensional de Decantación	v _{asc}	m ³ m ⁻² h ⁻¹
Velocidad de Giro	n	r.p.m.
Velocidad de Filtración	v _f	m ³ h ⁻¹ m ⁻²
Volumen de Polielectrolito Preparado por Centrifugado	V _{poli}	m ³
Volumen del Espesador	V _{esp}	m ³

Descripción	Abreviatura	Unidad
Volumen Inferior del Espesador	V_i	m^3
Volumen por Centrifugado	V_0	m^3
Volumen Superior del Espesador	V_s	V_{tot}
Volumen Total con Polielectrolito	V_{tot}	V_{tot}

1. Introducción

Actualmente, la sociedad es plenamente consciente de la necesidad de salvaguardar un recurso natural limitado, como es el caso del agua dulce. Existe una creciente conciencia social para con el consumo de este bien preciado, la cual ha de recalar en todas las personas. Sin embargo, existe una tarea importante que la ingeniería debe cumplir: realizar tratamientos de agua con la suficiente eficacia para que los municipios puedan gozar de un buen agua potable para su consumo, tanto en cantidad como en calidad.

Los tratamientos de agua potable son de vital importancia para garantizar unas buenas condiciones de salud en las personas consumidoras. El agua es utilizada en muchos momentos del día, tanto para ser consumida directamente como para asegurar la higiene personal. Además, al tratarse de un recurso limitado, el agua que se lleva a tratamiento ha de seguir una serie de procesos que garanticen unas altas calidades y eficiencias operacionales.

Por ello, en estos procesos se busca encontrar tecnologías capaces de aprovechar al máximo el agua que se trata en la planta. El volumen de agua procedente de las captaciones debe ser similar al volumen de agua que después se distribuye a la población, de tal manera que las pérdidas sean mínimas a lo largo de cada uno de los procesos de tratamiento.

De esta manera, el presente trabajo se encargará de desarrollar el tratamiento de los fangos producidos en una Estación de Tratamiento de Aguas Potables (ETAP), con el fin de garantizar una alta eficiencia en el proceso general gracias a la recuperación de las aguas contenidas en dichos fangos.

A continuación, se lleva a cabo la explicación de la introducción del proyecto, presentando el contexto en el cual se engloba, los objetivos que se buscan lograr, el alcance que se pretende y los beneficios que este otorgará.

1.1. Contexto

La estación de tratamiento de agua potable de San Juan fue construida en 1987 y está diseñada para un caudal de tratamiento de 100 L s^{-1} . La instalación, trata la mayor parte de las aguas de consumo del municipio de Amorebieta-Etxano (Bizkaia).

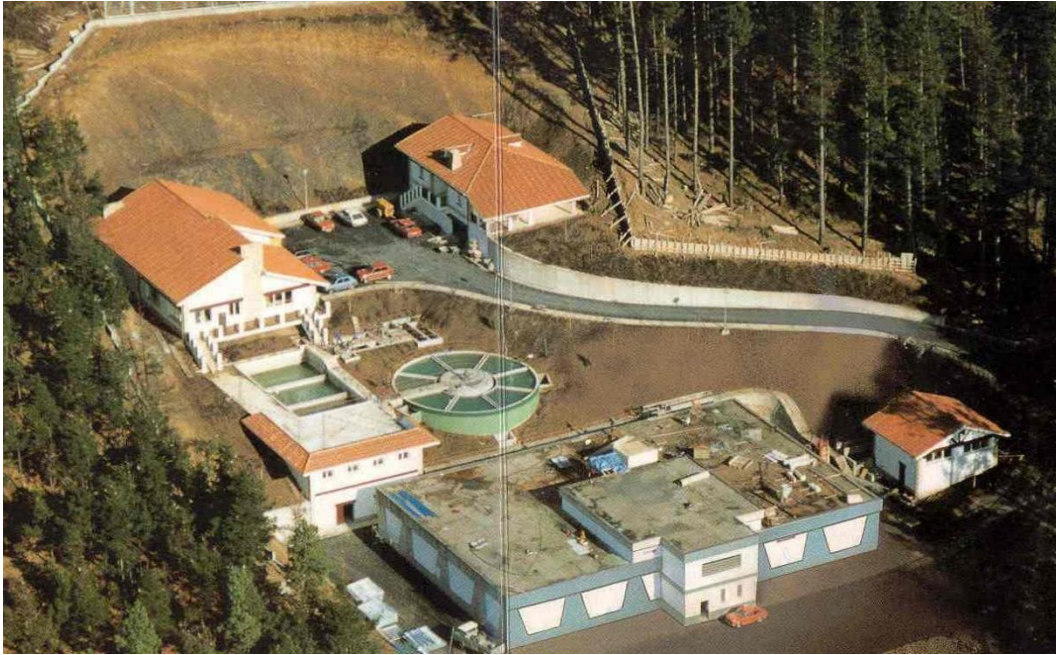


Figura 1. Vista aérea de las instalaciones de la ETAP de San Juan. Imagen cedida por Aquambiente S.L.U.

A día de hoy, la concesión de la planta es llevada a cabo por Aquambiente S.L.U, empresa incluida dentro del Grupo Aguas de Barcelona (Grupo AGBAR), que a su vez es propiedad de la multinacional Suez S.A. Tanto la planta como sus instalaciones auxiliares (bomberos, depósitos y captaciones) forman parte del Ayuntamiento de Amorebieta-Etxano, siendo Aquambiente S.L.U. la empresa responsable de llevar a cabo la explotación y el mantenimiento y las posibles mejoras técnicas de la planta y de la estación de bombeo de Orobio. Aquambiente S.L.U. posee un término variable en el contrato en base a los m^3 tratados por la ETAP, siendo el resto de los ingresos un término fijo definido en el contrato. A cargo de personal propio del Ayuntamiento quedan el resto de las instalaciones auxiliares, las cuales no salen a concurso público.

En cuanto a las propias instalaciones de la ETAP, se tiene una pequeña planta de potabilización para un municipio con una población de unos 20.000 habitantes equivalentes, con operaciones de coagulación-floculación, decantación, filtración y desinfección. Además, dispone de un sistema de clasificación de arenas y recuperación de agua que en la actualidad se encuentra parado debido a reparaciones en el clasificador de arenas. No obstante, el sistema establecido no resulta del todo óptimo. Así, se han ido realizando diversas evoluciones desde el inicio de la explotación en 1987 y, actualmente, se quieren plantear algunas alternativas para desarrollar tecnologías más eficientes y respetuosas con el medio ambiente.

La red de abastecimiento del municipio de Amorebieta-Etxano posee en torno a una longitud de 100 kilómetros de tuberías, distribuidas por todos los barrios de este extenso municipio. Se trata de un municipio de la zona central de Bizkaia (Figura 2) que posee una baja densidad de población debido a la amplia extensión de su terreno ($58,78 \text{ km}^2$) para una población de solo 19.576 habitantes en 2021. Estos valores determinan una densidad de población de 333 habitantes por km^2 .

Además, el agua de abastecimiento posee tanto un destino residencial y de consumo humano como un destino para uso industrial.

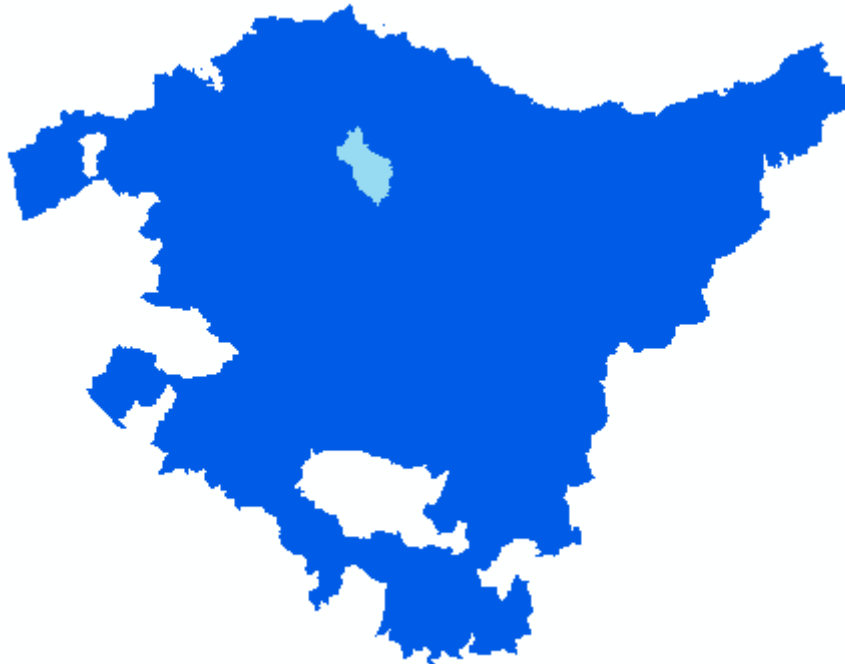


Figura 2. Localización de Amorebieta-Etxano dentro de Euskadi. Fuente: ArcMap 10.8.1.

De esta manera, se diferencian 7 zonas de abastecimiento dentro del municipio, las cuales se enumeran a continuación:

- **Polígono U-13 Boroa:** Bombeo hacia su depósito de almacenamiento y consumo. Uso industrial. Alto consumo.
- **San Bartolomé:** Uso doméstico. Muy bajo consumo.
- **Etxano:** Uso doméstico. Consumo medio.
- **Tantorta:** Uso doméstico. Bajo consumo.
- **Larrea:** Uso doméstico. Consumo medio.
- **Epalza:** Uso doméstico. Bajo consumo.
- **Arkotxa:** Uso doméstico. Bajo consumo.

Cabe destacar que el consumo medio diario del municipio es de unos 6.000 m^3 . Dicho consumo no se mantiene constante en el tiempo y depende de muchos factores, como la época del año, el día en concreto (laborable, fin de semana o festivo) y, sobre todo, de la hora del día. Por tanto, este consumo de 6.000 metros cúbicos diarios no se traduce en un consumo horario de 6.000 m^3 entre 24 horas, lo cual vendrían a ser $250 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

La curva característica del abastecimiento de la población de Amorebieta-Etxano se representa en el Gráfico 1. No es una curva con datos reales si no una aproximación cualitativa del consumo del municipio. En él se ve un alto consumo a primeras horas de la mañana, con un pico acusado. Después, un descenso fuerte hacia el mediodía, con otra subida a la hora de la comida, si bien menos acusada. Finalmente, a la tarde empieza a crecer de nuevo el consumo por el llenado del depósito del polígono de Boroa y mantiene esa altura en la noche con el consumo doméstico, hasta que llega el momento en el que la población duerme y el consumo es mínimo. Este consumo mínimo, además, es un valor representativo de las fugas que pudiera haber en la red de abastecimiento, pues se trata de un momento del día en el cual el consumo es prácticamente nulo por parte de la población y de la industria circundante.

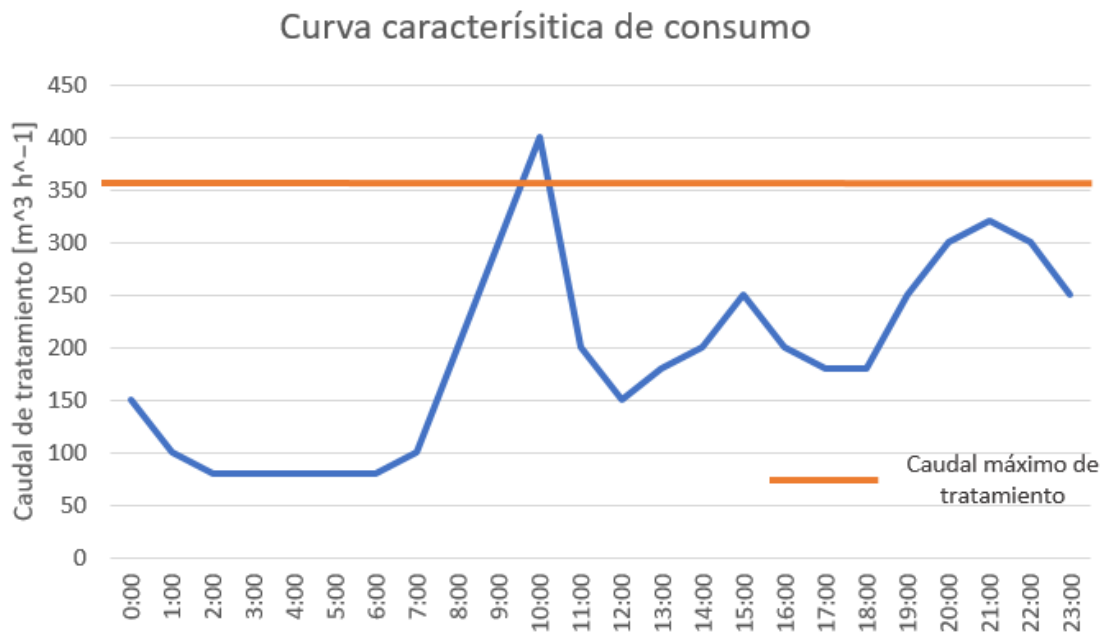


Gráfico 1. Curva característica cualitativa del consumo diario del municipio Amorebieta-Etxano.

El estudio de este aspecto del consumo es esencial, ya que la planta posee solamente un depósito de 3.000 m³. Por consiguiente, diariamente la población consume 2 veces dicho depósito. Sin embargo, es evidente que no lo hace de manera constante, así pues, es posible llevar a cabo la explotación de la planta de tal manera que nunca haya carencia de agua en los momentos en los cuales se exige un alto consumo. Muchas veces este consumo es superior al caudal de tratamiento máximo de la planta (línea horizontal naranja: 100 L s⁻¹ ó 360 m³h⁻¹), por lo que será fundamental explotar adecuadamente el amortiguamiento que ofrecen los 3.000 m³ de depósito.

1.2. Objetivos y alcance del proyecto

Los objetivos que se quieren lograr gracias a este trabajo son los siguientes:

- Desarrollar el subproceso de recuperación de fangos integrado en el proceso de la planta.
- Evaluar la eficacia del proceso y los beneficios que otorgan al rendimiento completo de la planta.
- Ofrecer alternativas para aumentar el rendimiento de recuperación de agua a tratamiento.
- Diseñar sistemas para limitar el vertido de arenas a colector.

Dentro de la ETAP de San Juan, se plantea elaborar el proceso de recuperación de agua proveniente de las purgas de fangos del decantador y de la limpieza de los filtros de arena. El proceso consistirá en la separación de las arenas y del flóculo excedente, productos extraídos de los procesos principales de tratamiento de las aguas: la decantación y la filtración.

El subproceso de separación de fangos y recuperación de agua consistiría en lo siguiente: las arenas sobrantes, decantarían por gravedad y serían extraídas hacia un clasificador de arenas. Así, por un lado, éstas se recogerían en una cuba, mientras que el agua extraída de estos residuos podría volver a cabecera de planta para someterla de nuevo al tratamiento de potabilización.

Este proceso de recuperación de agua actualmente se encuentra parado y, además de requerir una puesta en marcha, ofrece cierto margen de mejora actuando sobre la infraestructura de la planta. De esta manera, se describirá el proceso y se realizará la valoración de los beneficios que otorga tener un subproceso de recuperación de agua interno dentro de la propia ETAP, valorándose también otras posibles mejoras aplicables. Finalmente, se obtendrá una solución final óptima para las características de la planta, en base a criterios técnicos, legales, humanos y económicos.

1.3. Beneficios que aporta este proyecto

El tratamiento de los residuos generados en una instalación industrial es fundamental para, por un lado, generar un menor impacto sobre el medioambiente y, por otro, cumplir con unos criterios legales definidos para los diferentes sectores industriales, lo cual tendrá también su correspondiente impacto económico.

De esta manera, en una ETAP también resulta necesario tratar los residuos que en ella se producen de manera eficiente. Por ello, este proyecto pretende ofrecer una serie de beneficios a la propia explotación, principalmente:

- Reducir el vertido de fangos y arenas a colector, con el fin último de reducir la carga contaminante que alcanza la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) municipal.
- Aprovechar toda el agua bruta introducida a través de las captaciones, reduciendo al mínimo el caudal de agua excedente de vertido.
- Garantizar un equilibrio económico entre ambas instalaciones municipales (ETAP y EDAR).
- Favorecer el funcionamiento automatizado del proceso, para que opere a prueba de errores y requiera de un mantenimiento correctivo mínimo.

1.4. Metodología utilizada en el proyecto

A continuación, se procederá a comentar la metodología y planificación que se ha llevado a cabo durante el proyecto. Se comentarán las fases del estudio y se detallará la planificación estipulada que se ha desarrollado durante los casi 3 meses de ejecución de este.

1.4.1. Descripción de las fases del proyecto

El proyecto en cuestión se ha dividido en 3 fases claramente diferenciadas. Inicialmente, se comenzó con un estudio preliminar de la ETAP de San Juan, valorando el proceso actual que se plantea modificar y estudiando junto al responsable de la planta los esbozos de las alternativas posibles. Posteriormente, en una segunda fase se realizó un análisis de alternativas exhaustivo, finalizando la etapa con la elección de la tecnología que más se adecuaba a la realidad de la planta. Para terminar, la Fase 3 del trabajo ha consistido en el desarrollo más profundo de la idea que se planteaba como solución más correcta para la ETAP de San Juan. La Figura 3 adyacente resume las fases del proyecto.

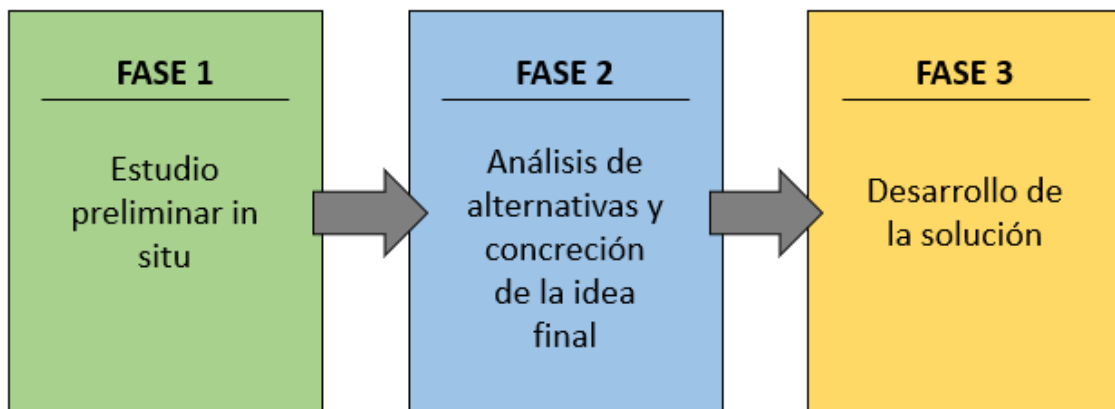


Figura 3. Diagrama de fases del proyecto.

1.4.2. Planificación

La planificación del proyecto se realizó gracias a la herramienta del Diagrama de Gantt. Se ha dividido el trabajo realizado por fases y por semanas, de tal manera que el color asignado en la Figura 3 se representa a continuación en el Diagrama de Gantt (Figura 4) como la tarea realizada en dicha semana. Destacar únicamente que el inicio del proyecto fue el 13 de diciembre y que la finalización corresponde al 25 de febrero, completando así 11 semanas completas de trabajo.

1.4.3. Diagrama de Gantt

	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10	Semana 11	
FASE 1	█											
FASE 2				█								
FASE 3								█				

Figura 4. Diagrama de Gantt del proyecto.

2. Descripción de la situación actual

La instalación completa de la ETAP cuenta con tres edificios: control, oficinas y fangos y recuperación de agua, además de un depósito general. En la Figura 5 se observa la distribución de los edificios en la ETAP. Además, dentro de los procesos, cuenta con:

- Obra de llegada de las captaciones.
- Cámara de mezcla para las operaciones de coagulación, floculación y precloración.
- Decantador circular.
- Tres filtros de arena.
- Depósito intermedio para el agua filtrada.
- Instalación de recuperación de agua y tratamiento de fangos.

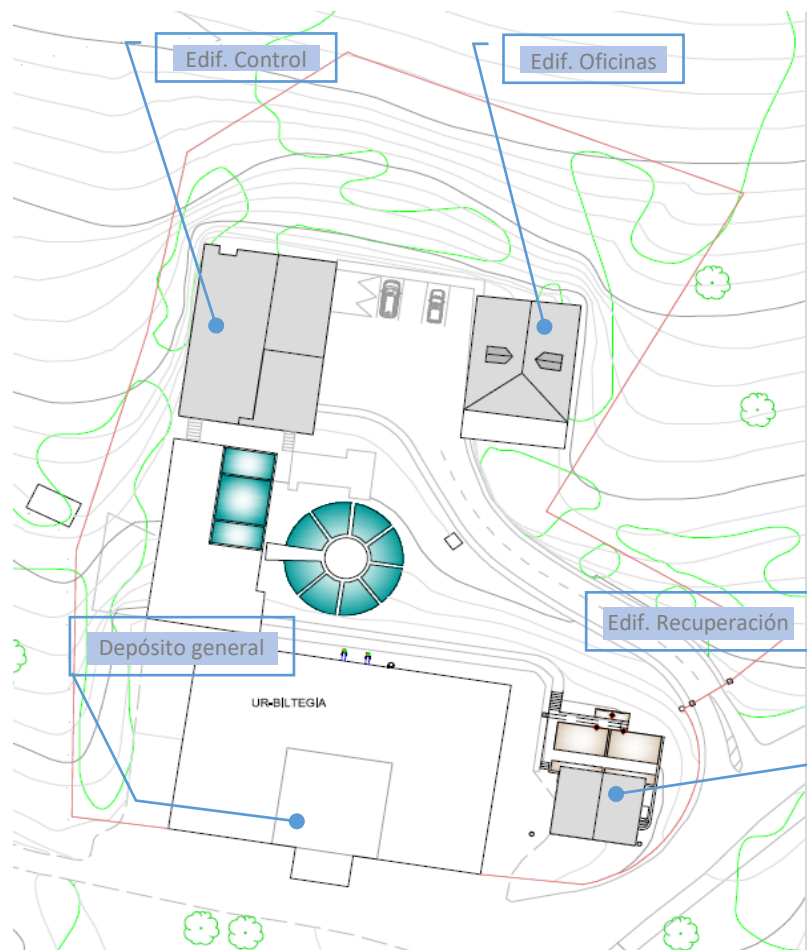


Figura 5. Plano con las instalaciones principales de la ETAP de San Juan. Imagen cedida por Aquambiente S.L.U.

A continuación, se han representado de manera esquemática los procesos e instalaciones de la ETAP de San Juan (Figura 6).

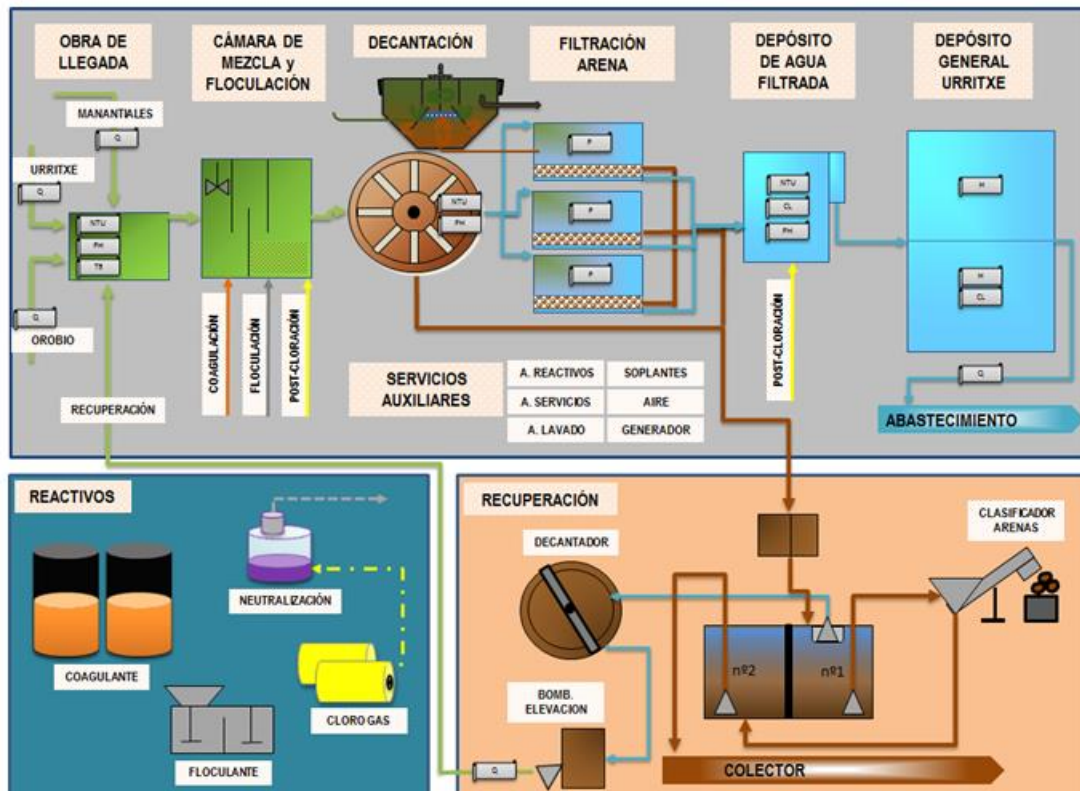


Figura 6. Procesos de la ETAP de San Juan. Imagen cedida por Aquambiente S.L.U.

2.1. Origen del agua

El agua bruta a tratar proviene de 3 zonas claramente diferenciadas (Figura 7):

- **Manantiales:** se trata de 4 captaciones agrupadas en la misma entrada a la ETAP. Los manantiales de Canteras y Andikolabe son conducidos hasta la planta por gravedad. Berroetas es un bombeo que recoge el agua de un pequeño arroyo y de un manantial. Finalmente, el aporte de agua se completa con el sondeo de Alakao.
- **Manantial de Urgozo:** se recoge en el depósito de Urritxe desde el cual se bombea hasta la ETAP.
- **Río Orobio:** se bombean a la planta las aguas procedentes del río Orobio mediante una estación de bombeo.

Además de estas 3 captaciones, la planta posee una cuarta entrada de agua bruta, proveniente del agua recuperada de otros procesos de la planta. Dicho proceso se explicará con más detalle en capítulos posteriores.

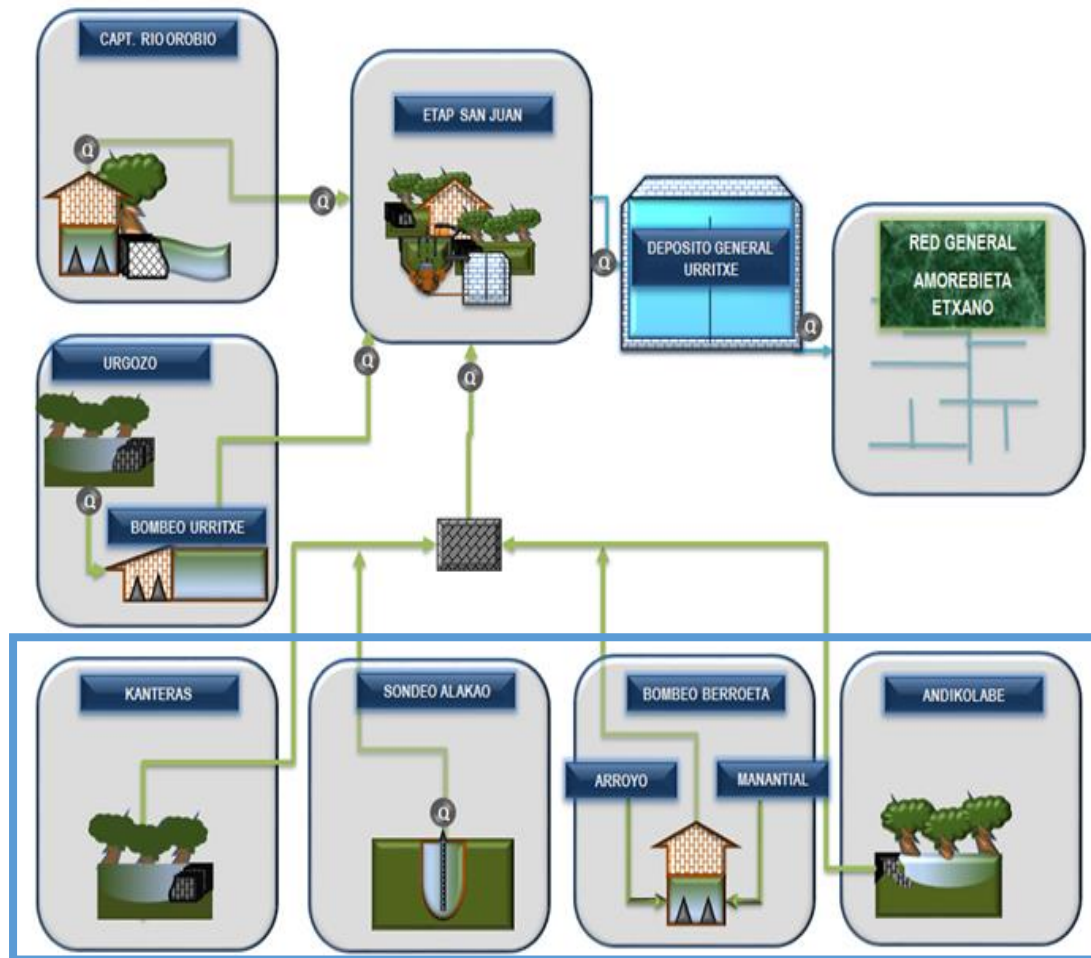


Figura 7. Diagrama de las captaciones de la ETAP de San Juan. Imagen cedida por Aquambiente S.L.U.

2.2. Línea de agua

En la obra de llegada se recogen y se homogenizan, las aguas provenientes de la captación “Manantiales”, del manantial Urgozo y del río Orobio. Asimismo, en este punto se recogería el agua proveniente del sistema de recuperación.

Para el control en continuo de la calidad del agua bruta, se dispone de una bomba tomamuestras ubicada junto a la entrada (Figura 8). El agua proveniente de la Obra de Llegada entra en la cámara de mezcla donde se le adicionan los siguientes reactivos:

- Coagulante: DK Basic 03
- Floculante: DK-Almidón A
- Desinfectante: Cloro gas

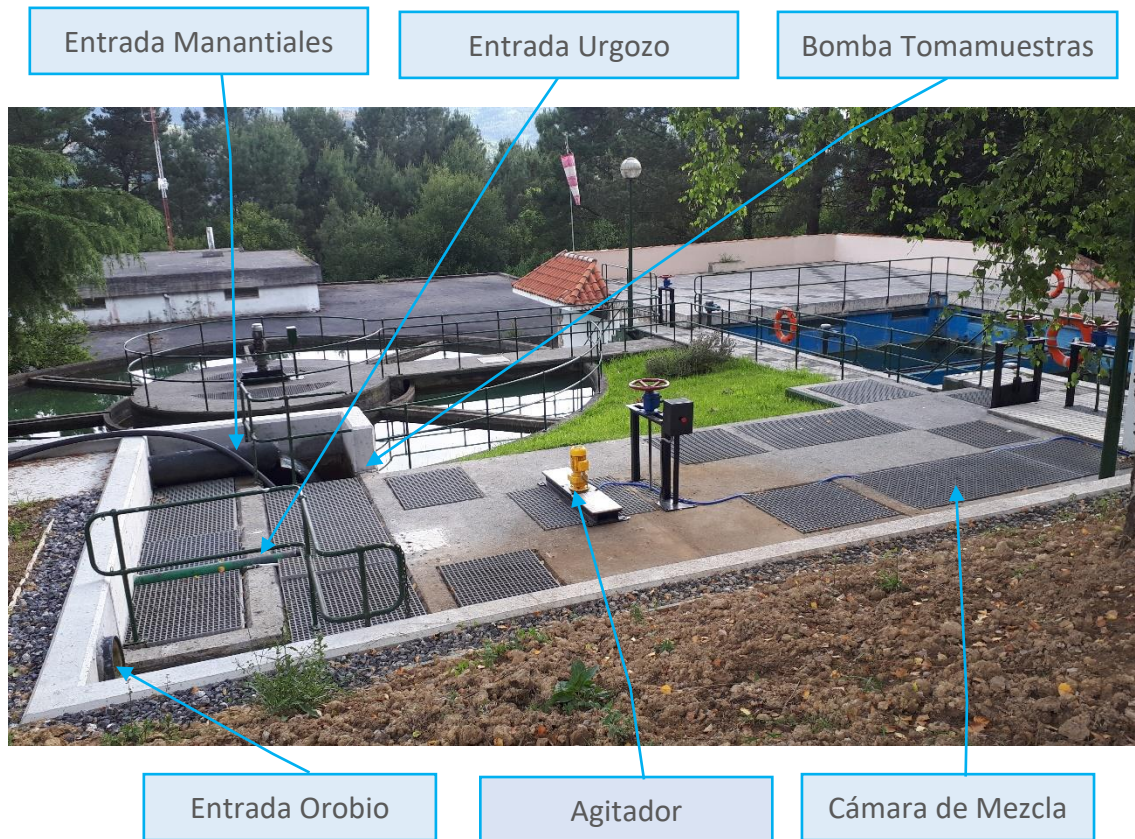


Figura 8. Obra de llegada del agua bruta desde las captaciones.

En las tuberías de llegada de los distintos aportes, se encuentran instalados tres caudalímetros electromagnéticos para la determinación de los caudales individuales de entrada.

La cámara de mezcla acepta un caudal de diseño de 100 L s^{-1} , con un tiempo de retención hidráulico (TRH) en la cuba para este caudal de 0,1667 horas (600 segundos). La mezcla se ve favorecida por la presencia de un agitador vertical, el cual posee una velocidad de giro (n) constante de 100 r.p.m. A la salida de la cámara de mezcla, el agua es conducida directamente a través de una compuerta hacia el proceso de decantación.

Si las condiciones del agua lo permiten, mediante un juego de llaves situado en la conducción de las aguas de Urgozo, antes de su entrada a la cámara de mezcla, podrá realizarse un bypass de decantación, para su incorporación directamente a filtración. Esta línea del proceso se debe a que las aguas de Urgozo poseen una calidad tal que generalmente no requieren de un proceso de coagulación-floculación y clarificación.

A continuación, se encuentra el decantador, donde se elimina una gran parte de los sólidos en suspensión. Esta unidad es del tipo Acclerator (Figura 9) y tiene una superficie en planta circular de $132,7 \text{ m}^2$. Esto representa una velocidad ascensional de decantación (v_{asc}) de $6,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ a caudal medio y un TRH de 1,68 horas (100 minutos).

El decantador está provisto de una cuba exterior cilíndrico-troncocónica, en el interior de la cual, una campana determina las zonas de reacción primaria y secundaria y la zona de decantación. El sistema de recirculación consiste en una turbina de palas planas combinadas en disposición horizontal y vertical, la cual, favorece la agitación necesaria. Tiene una Potencia (P) de 1,5 kW y una n máxima de 9 r.p.m.

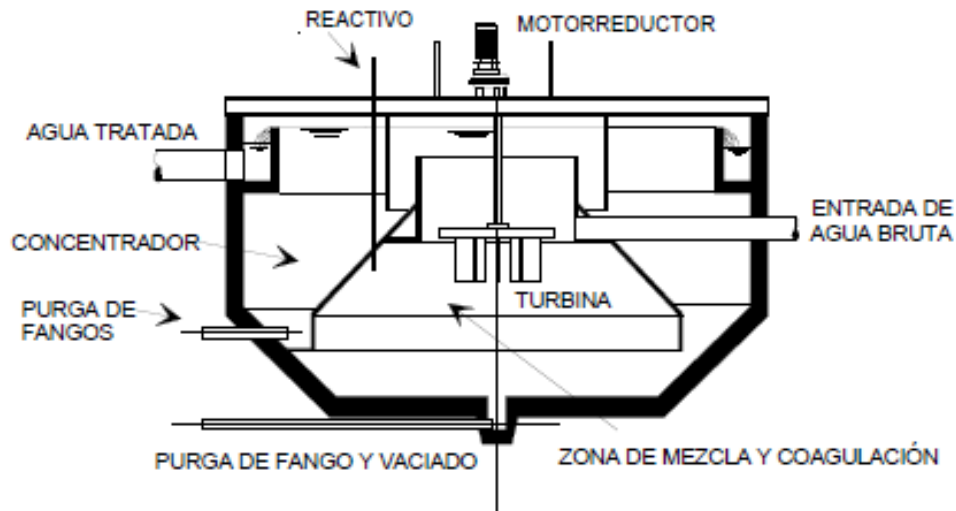


Figura 9. Decantador tipo Acclerator. Fuente: Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Tema 20: Decantadores especiales.

El funcionamiento del decantador consiste básicamente en: el agua se introduce en la zona de reacción primaria a través de una tubería que descarga el agua en la corona de reparto. Desde aquí el agua pasa a la zona de reacción, en la cual, se pone en contacto con la masa de fangos en movimiento provocado por la citada turbina. En la zona de reacción secundaria el flujo se tranquiliza, aglomerándose las partículas coloidales, y se crea una velocidad vertical hacia el fondo, la cual arrastra la masa de fangos hacia la parte inferior del decantador. En la zona de decantación, el caudal tratado asciende mientras que la masa de fangos desciende entrando de nuevo en la zona de reacción primaria. Finalmente, el exceso de fangos depositados en el fondo del decantador se extrae mediante la purga de fondo. Dicha purga de fangos es conducida hacia los pozos de recuperación de la caseta de fangos para su posterior tratamiento.

El sistema para la recogida de agua decantada está formado por 7 canales radiales, completándose con un canal general de salida. Las características de este equipo y su funcionamiento permiten una cámara de floculación interna y la recirculación del fango. El proceso de purgas, tanto de concentradores como de fondo está automatizado y se controla desde el Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA), estableciendo un patrón temporal. El SCADA es el sistema de visualización y control de los datos adquiridos mediante los sensores de los equipos de la planta y de las instalaciones auxiliares, los cuales se envían a través de una emisora al ordenador de control de la ETAP.

Una vez decantada, el agua pasa a los filtros de arena (Figura 10). Existen tres unidades, los cuales están abiertos y son de lecho de arena. Poseen una superficie de filtración de 73,5 m² con una altura de 1,10 metros y la siguiente distribución de capas:

- Capa 1: Arena soporte con una altura de 1 m.
- Capa 2: Grava soporte con una altura de 0,05 m.
- Capa 3: Grava de soporte con una altura de 0,05 m.

En el fondo de cada filtro, en disposición lateral y en sentido longitudinal, se encuentran dos canales, superpuestos. El canal superior es el colector de las aguas de lavado, diseñado con pendiente suficiente para evitar la sedimentación de las partículas arrastradas por el agua. En el canal inferior se encuentra un conducto para la distribución del aire y agua de lavado, así como para la recogida del agua filtrada. El lavado de los filtros se produce por señal de pérdida de carga, sin embargo, también puede realizarse por control semiautomático o de forma manual actuando desde el SCADA de la planta.

Como se ha mencionado anteriormente, el lavado de los filtros se lleva a cabo mediante la impulsión a contracorriente de agua y aire, en dos etapas. Para ello se dispone de 2 bombas de lavado y 2 soplantes, estando una de cada en reserva y, por tanto, funcionando solo con una durante la operación de lavado. El agua de lavado, junto con las purgas del decantador son conducidas a los pozos de recuperación para su tratamiento.

Por otro lado, el agua ya filtrada se recoge en el depósito de agua filtrada, donde se inyecta el cloro necesario para la desinfección, y posteriormente se envía al depósito general del municipio de Amorebieta-Etxano. El control de la cloración esta automatizado, y se realiza en función de la señal de cloro libre enviada por un sensor de medida en continuo y el valor de consigna indicado en el SCADA.

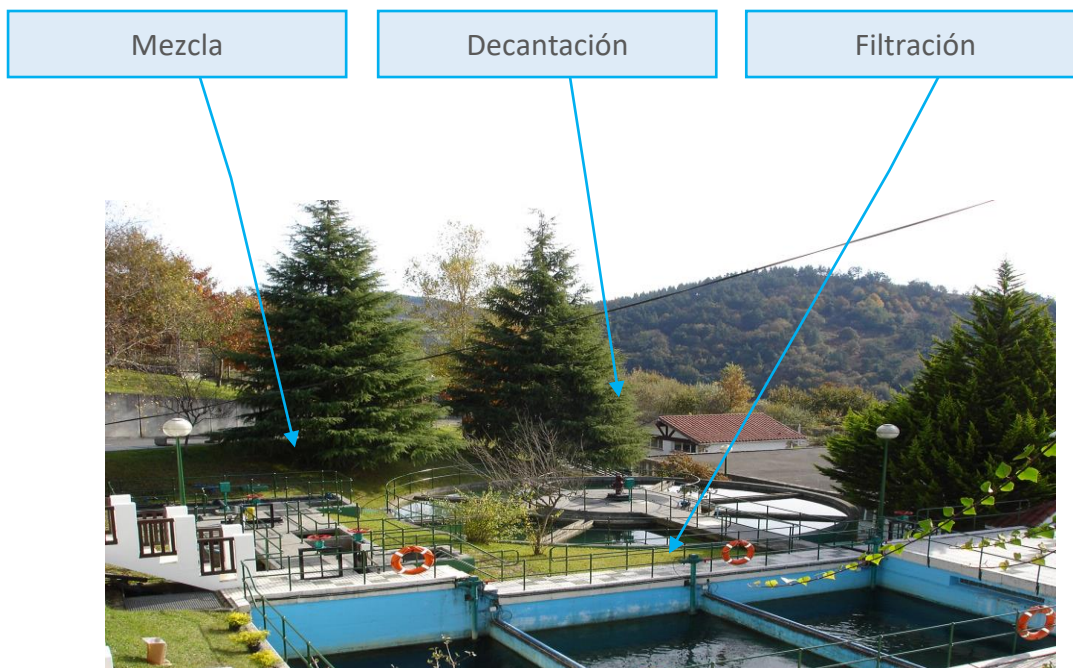


Figura 10. Instalaciones principales de la línea de agua.

2.3. Línea de fangos

El agua proveniente del lavado de filtros, así como los fangos que vienen de las purgas del decantador, son conducidos por dos canales hasta los pozos de recuperación. Los canales conducen los mencionados fangos por gravedad, que gracias a una baja viscosidad son capaces de viajar fácilmente y sin producir obstrucciones hasta los pozos de recuperación situados en la caseta de fangos. La entrada de cada corriente de los dos procesos puede regularse gracias a tres compuertas murales, las cuales se mantienen estáticas produciendo una mezcla de ambas corrientes justo en la entrada al Pozo 1 (Figura 11).

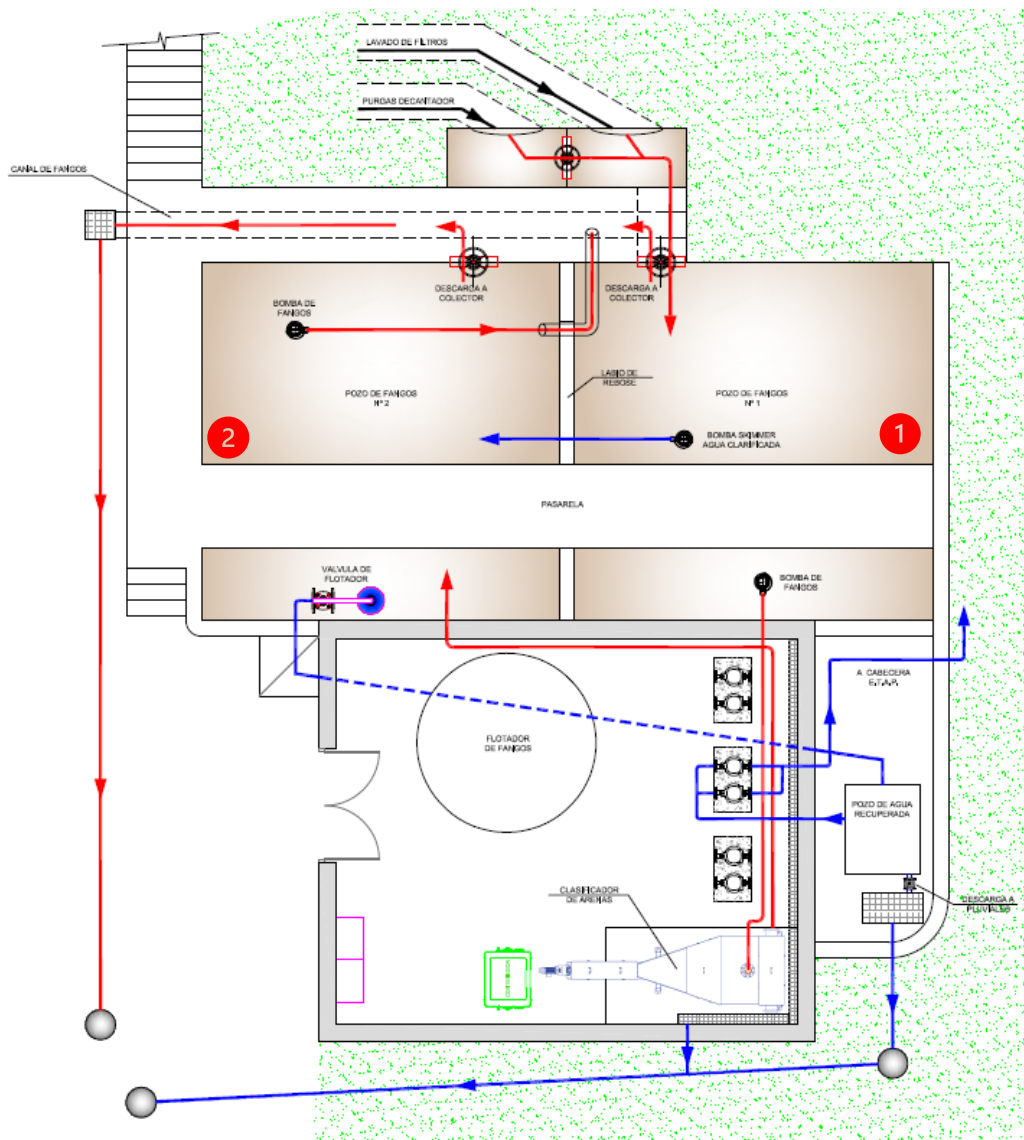


Figura 11. Diagrama del proceso de recuperación de agua. Imagen cedida por Aquambiente S.L.U.

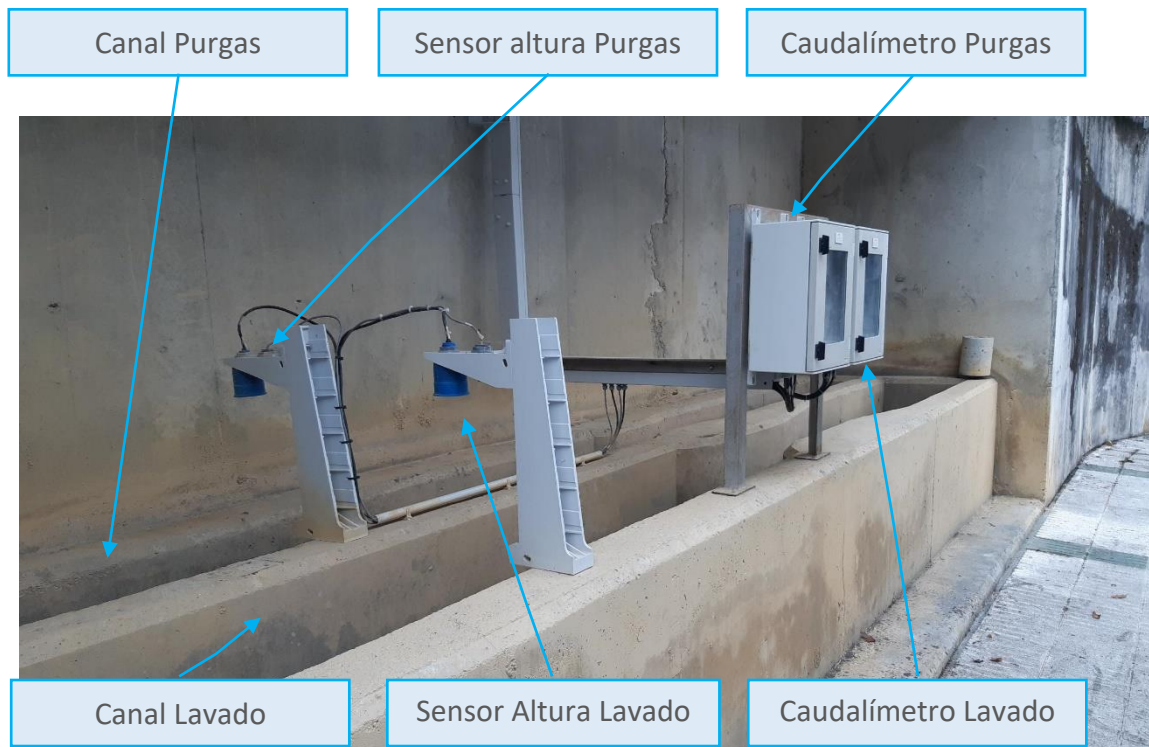


Figura 12. Canales de medición de fangos.

La Figura 12 muestra la operación previa realizada antes de la llegada a los pozos de recuperación. Los fangos viajan a través de dos canales, el más cercano a la pared del fondo corresponde a las purgas del decantador y el más alejado de la pared es el canal por el que fluyen las aguas procedentes de los lavados de los filtros de arena.

De esta manera, se puede conocer el caudal que transcurre por dichos canales y, por tanto, los caudales de fangos de cada proceso. Esto se realiza gracias a unos sensores de altura de la lámina de agua, conectados a dos equipos de medición. Estos datos capturados serán de gran ayuda para, por una parte, conocer el caudal de agua de rechazo respecto del agua bruta de entrada y, por otra parte, evaluar el rendimiento del proceso de recuperación de agua.

Seguidamente, el agua fluye hacia los mencionados pozos de recuperación. La Figura 13 muestra que, mediante tres compuertas murales, los fangos se conducen hasta el primero de los pozos (Pozo 1).



Figura 13. Instalaciones del proceso de fangos.

Tras una decantación inicial en el Pozo 1, el agua clarificada en primera instancia se trasvasa al segundo de los pozos (Pozo 2) mediante una bomba flotante situada en la superficie (Bomba de Trasvase). El funcionamiento de esta bomba está controlado por tres boyas, de manera que cuando el pozo alcanza su nivel máximo, la bomba comienza a trasvasar agua y finaliza al llegar al nivel mínimo. La tercera boya funciona como aviso frente a un posible rebose por fallo de la boya de nivel máximo. Esta configuración permite extraer el agua decantada, libre de productos flotantes. En el fondo de este pozo se haya situada la bomba de extracción de fangos a colector (Bomba de Fangos 2). Su funcionamiento está controlado desde el SCADA mediante una temporización consignable.



Figura 14. Válvula flotadora del Pozo 2.

Como se puede observar en la Figura 14, estos pozos son de construcción cuadrada, con forma troncocónica para forzar el arrastre de los fangos hacia el fondo. En el Pozo 2 existe una válvula flotadora, que permite el paso de agua en función del nivel del pozo. Con el pozo vacío, la válvula permanece cerrada, y el proceso de recuperación parado. A medida que la bomba de trasvase lo va llenando, la válvula permite el paso de agua hacia el pozo de aspiración (Pozo 3), el cual se encuentra dentro de la caseta. En este tercer pozo existen dos boyas para el control de las bombas de elevación a cabecera de planta. El Pozo 3 comienza su vaciado cuando la altura de la lámina de agua alcanza la boya superior y finaliza en el momento en que dicha lámina alcanza la boya inferior. Finalmente, el agua recuperada se bombea a cabecera mediante dos bombas con funcionamiento semanal alternativo, de cara a realizar de nuevo todo el proceso de tratamiento de la línea de agua.

Para un mayor afino del agua recuperada, es posible realizar un trayecto alternativo a través del decantador terciario directamente desde el Pozo 1. Se trata de un pequeño decantador de planta circular, con 3,5 metros de diámetro y una altura de 6 metros. Su funcionamiento es muy poco habitual ya que los dos pozos de decantación son, en principio, suficientes para un proceso correcto. El volumen útil de este decantador es de 45 m³.

En cuanto al residuo final, los fangos decantados, existe un proceso adyacente a la retirada a colector. Como se puede observar en la Figura 11, una bomba de fangos permite extraer los fangos del fondo del Pozo 1 (Bomba de Fangos 1) y los envía a un clasificador de arenas. Este equipo es capaz de separar mediante un tornillo sin fin en posición angular los sólidos contenidos en la corriente multifásica del fango, es decir, gracias al avance del tornillo, las arenas ascienden y terminan depositándose por caída en un depósito para su posterior retirada, mientras que el agua, ya separada de estas arenas, sale por una tubería hacia el Pozo 2. Así, se ha eliminado gran cantidad de los sólidos y el proceso se optimiza, reduciendo la cantidad de sólidos vertidos a colector. Finalmente, las arenas recogidas, al ser un residuo no peligroso, se entregan a un gestor autorizado para su depósito en vertedero.



Figura 15. Clasificador de arenas.

Observando el clasificador de arenas de la Figura 15, al lado del motor vertical está la caída de arenas deshidratadas y por la parte inferior, pegada a la pared, sale el agua con una concentración muy baja de arenas, considerándose casi nula. La entrada de fangos al equipo se realiza mediante la tubería horizontal central, conectada mediante dos bridas al cuerpo del clasificador de arenas.

Finalmente, es de destacar las características generales del fango producido. Este fango de la ETAP de San Juan es de tipo mineral, debido a su procedencia. Es un fango que se genera por la decantación de los flóculos, los cuales, a su vez, son generados a través de la coagulación de partículas arrastradas en las captaciones. Debido a la naturaleza de estas captaciones (manantiales, arroyos y ríos) el arrastre de sedimentos minerales es importante y, así, el fango producido en última instancia se clasifica como un fango mineral de textura arcillosa y limosa, según la clasificación USDA.

A modo de resumen, en la Tabla 1 se recogen todos los equipos que se incluyen en el proceso de recuperación de agua. Se trata de los equipos que posee la ETAP, teniendo en cuenta que la Bomba de Fangos 1, el clasificador de arenas y las bombas de recuperación de agua no se encuentran en activo. Su parada es debida a un fallo en el clasificador de arenas y su consecuente mantenimiento correctivo.

Tabla 1. Equipos del sistema de recuperación de agua.

Obra civil	
Pozo 1	Decantación primaria
Pozo 2	Decantación secundaria
Pozo 3	Aspiración por bombas de recuperación
Bombas	
Bomba de Traslase	Traslase de agua limpia desde el Pozo 1 hasta el Pozo 2
Bomba de Fangos 1	Extracción de fangos hacia clasificador de arenas
Bomba de Fangos 2	Extracción de fangos hacia colector
Bombas de Recuperación (2 uds.)	Elevación del agua recuperada hacia cabecera de planta
Boyas	
Pozo 1 (3 uds.)	Control de la bomba de traslase
Pozo 3 (2 uds.)	Control de las bombas de recuperación
Otros equipos	
Decantador terciario	Última clarificación
Válvula flotador	Control del paso de agua entre Pozo 2 y Pozo 3
Compuertas murales (3 uds.)	Canalización de las corrientes de fangos
Clasificador de arenas	Separación de arena y agua

2.4. Procesos auxiliares

A continuación, se realiza la descripción de los dos procesos auxiliares esenciales en la planta para la producción de fangos. Ambos forman parte del proceso completo de potabilización de agua y son los únicos que traen consigo la producción de residuos, es decir, las arenas.

2.4.1. Lavado de filtros

El lavado de filtros consiste en la operación auxiliar de la planta que permite limpiar el lecho de arena que está en proceso de colmatación. Un filtro de arena, a medida que realiza su proceso de filtrado, va perdiendo su capacidad de filtración a causa del fenómeno de colmatación. Su velocidad de filtración (v_f) disminuye y, por tanto, el caudal que se trata en el filtro es menor y el proceso se descompensa.

A modo de recordatorio, convendría realizar dos apreciaciones.

- Primera, el caudal de agua a filtrar debe estar relacionado con la superficie de filtración disponible para conseguir unos rendimientos adecuados. Como parámetro básico de diseño en filtración, se utiliza la v_f , la cual relaciona el caudal a filtrar y la superficie horizontal del lecho ($m^3 m^{-2} h^{-1}$).
- Segunda, para los procesos de potabilización y depuración de aguas, es muy importante trabajar a caudal constante. Por tanto, una colmatación excesiva de los filtros provocaría una reducción considerable del caudal, lo cual alteraría el proceso. Así, se considera que el grado de colmatación máximo permitido en el filtro es de un 5% para realizar su lavado. Dicha medición se realiza en base a la pérdida de carga adicional sobre el propio filtro.

En la ETAP de San Juan, el proceso de lavado se realiza en tres modos distintos a escoger por el responsable de la instalación:

- Automático: dirigido a través del SCADA en base a su grado de colmatación.
- Semiautomático: el operador, desde el ordenador de planta, inicia un ciclo de lavado en cualquier momento. Este se realiza de manera automatizada.
- Manual: el operador controla de forma manual tanto las válvulas, así como las bombas de lavado y las soplantes.

El ciclo automatizado se lleva a cabo siguiendo los siguientes pasos:

1. Cierre de la válvula de entrada de agua a filtrar.
2. Vaciado del filtro. El agua que estaba contenida en el filtro viaja hacia los pozos de recuperación de fangos.
3. Una vez el filtro está vacío, se abre la válvula de salida de agua de lavado.

4. Se abre la válvula de aire de lavado y se pone en marcha la soplante de lavado. Comienza el ciclo de aireación del filtro para llevar a cabo el esponjamiento del lecho y facilitar así la posterior limpieza con agua. Se realiza la parada de la soplante y el cierre de las válvulas de aire.
5. Apertura de la válvula de venteo, la cual permite extraer el aire que se ha quedado en el sistema de agua de lavado.
6. Apertura de la válvula de entrada de agua de lavado y se pone en marcha la bomba de agua de lavado. El agua fluye a través del lecho de arena y viaja por el canal exterior de vaciado de filtros de nuevo hacia los pozos de recuperación.
7. Parada de la bomba de lavado y cierre de las válvulas de salida de agua de lavado y de venteo. El filtro ya ha sido lavado correctamente y se ha enviado el agua, cargada de residuos arenosos, hacia el proceso de recuperación de agua y eliminación de fangos.
8. Para finalizar, se abre la válvula de entrada de agua a filtrar y comienza de nuevo el proceso de filtración, teniendo en cuenta que el llenado ha de ser lento para no maltratar al nuevo lecho recuperado.



Figura 16. Diagrama de la operación de lavado de filtros.

Este proceso de lavado del filtro se realiza una vez cada 3 días en cada filtro, realizando una limpieza diaria en el cómputo general del bloque de filtros. No obstante, si el filtro ha sufrido una colmatación excesiva, se puede realizar con una frecuencia menor como necesidad específica del proceso en ese momento dado. Además, cada 3 semanas se realiza el vaciado completo y limpieza por parte de los operarios de todo el filtro de manera manual. El agua que se lleva al proceso de recuperación posee, por una parte, el flóculo que no ha logrado decantar en la operación previa y, por otra parte, arena silíceas del propio material del filtro.

2.4.2. Purga del decantador

El decantador, a medida que se va introduciendo el agua bruta mezclada con los reactivos aportados en la cámara de mezcla, va produciendo en el fondo una densa capa de fango. Dicha capa es acumulativa, es decir, si no se realizara ninguna operación de vaciado, el decantador se llenaría de fango y dejaría de operar. De esta manera, la purga de fondo es una operación esencial que se realiza con una frecuencia medianamente alta y que, operando adecuadamente, produce una alta concentración de fangos en el sistema de recuperación.

En la planta, existen dos tipos de purgas. Por un lado, las de la válvula de fondo del decantador, y por otro las que se realizan en los concentradores. Se pueden realizar de manera manual. Sin embargo, lo más común es llevarlas a cabo de forma temporizada desde el SCADA, estableciendo una consigna temporal de purgas/hora con un tiempo de duración determinado. En caso de superar el límite proporcional de fango dentro del decantador, se requiere de una reducción del tiempo entre purgas o de una ampliación en el tiempo de purgado. Así, el criterio general para el límite de fango en el decantador es de entre un 8% y un 12% respecto del volumen total del mismo.

- Control purgas de fondo: gracias al SCADA se puede modificar el tiempo de activación de la purga y el tiempo entre purga y purga (Figura 17).



Figura 17. Válvula y conducción de la purga de fondo.

- Control de purgas de concentradores: de la misma manera, se pueden temporizar las purgas de los concentradores. Se selecciona la duración de cada ciclo y el tiempo entre ciclos. En este caso, en cada purga se activan de forma consecutiva las cuatro válvulas (Figura 18).



Figura 18. Válvula de purga de concentradores.

Se trata de un proceso mucho más sencillo que el lavado de filtros, pues consiste en la apertura de válvulas durante un tiempo concreto. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, la gran concentración de fango y la no utilización de agua externa de limpieza, implica una alta concentración en el fango procedente de este proceso.

Así, cabe destacar que este fango está más concentrado que el procedente del agua de lavado de filtros, y que se diluirá con este, generando una corriente homogénea una vez se junten en el Pozo 1 de recuperación de agua.

3. Análisis de alternativas

A continuación, se enumeran y se explican de manera general las principales alternativas que se han encontrado para mejorar el proceso de recuperación de agua. Más adelante, se determinará la viabilidad de cada una, de manera que se realizará el desarrollo más preciso de la alternativa elegida.

3.1. Vertido directo a colector municipal

La primera opción para la gestión de los fangos consiste en la eliminación de estos a través del colector municipal. Se trata de una opción muy sencilla y que actualmente se utiliza en los momentos en los cuales existe avería y parada en el proceso de recuperación de agua.

El agua fluye hacia la caseta de fangos, donde gracias a las compuertas murales, ambas corrientes de fangos entran en el Pozo 2. Este pozo de decantación secundaria simplemente funcionará como almacenamiento de los fangos, que de manera gradual se irán enviando al colector municipal. No se realiza ningún tratamiento sobre los fangos generados en la ETAP. Sin embargo, será la EDAR la encargada de tratar esta producción de fangos.

A priori, resulta una opción poco eficiente. Sin embargo, a nivel de economía municipal, recordando que tanto la instalación de potables como de residuales es propiedad del Ayuntamiento del municipio, puede resultar ventajoso no tratar los fangos en planta y enviarlos a la EDAR municipal. Cierto es que se reduce el consumo eléctrico en equipos, los costes de mantenimiento asociados a la maquinaria que entra en juego en el proceso y los costes de vertido.

No obstante, se reduce la calidad del efluente vertido, generando mayor carga contaminante en la EDAR y se pierde parte del agua de consumo que podría haber sido aprovechada en la planta. En definitiva, es una alternativa que podría implicar beneficios económicos a gran escala, pero que, a pequeña escala, tanto económica como ambientalmente, no supone grandes beneficios.

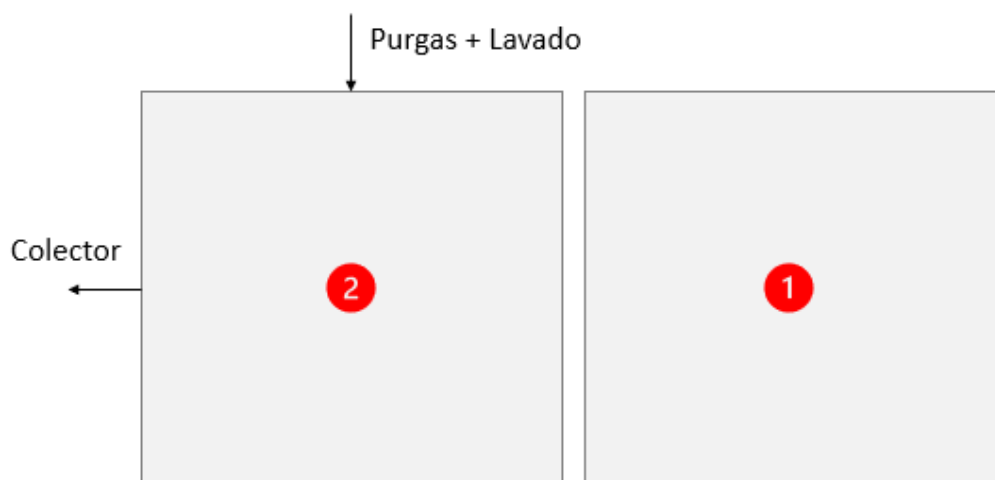


Figura 19. Alternativa 1: Vertido directo a colector.

3.2. Separación mediante clasificador de arenas

Una manera de optimizar el proceso de recuperación de agua y gestión de fangos es la separación de ambos productos mediante un clasificador de arenas. Se trata del proceso actual de la ETAP de San Juan. El agua cargada de arenas viaja a través de las conducciones de la línea de fangos y va a parar al primer pozo de decantación (Pozo 1). En él, sucede la primera etapa de decantación, de tal manera que se acumulan los fangos en el fondo.

Tras esa primera etapa de decantación, una bomba flotante (Bomba de Trasvase), trasvasa agua con una concentración de fangos muy baja desde el Pozo 1 hasta el Pozo 2. Así, comienza la segunda etapa de clarificación, produciendo un agua con calidad suficiente para entrar de nuevo al proceso de depuración de cabecera, sin requerir de un afino final mediante un tercer decantador. Finalmente, ese agua clarificada sale a través de una válvula flotadora hacia el pozo de aspiración para bombeo a cabecera (Pozo 3), la cual se mantiene abierta en función del nivel de agua del Pozo 2. En esta decantación secundaria, también se acumulan fangos en el fondo del correspondiente pozo.

Esta separación entre los sólidos y los líquidos hace necesaria la extracción del fango sedimentado. Para ello, se sitúan dos bombas de extracción de fangos sumergidas en el fondo de ambos pozos (Bomba de Fangos 1 y Bomba de Fangos 2). Ellas son las encargadas de impulsar esta corriente de lodo muy húmedo hacia el clasificador de arenas, equipo capaz de reducir esta humedad contenida en el fango. Por una parte, se extraen las arenas más gruesas gracias al movimiento del tornillo sin fin, mientras que, por otra parte, otra corriente con agua y arenas más finas vuelve de nuevo al Pozo 2 para buscar una nueva sedimentación.

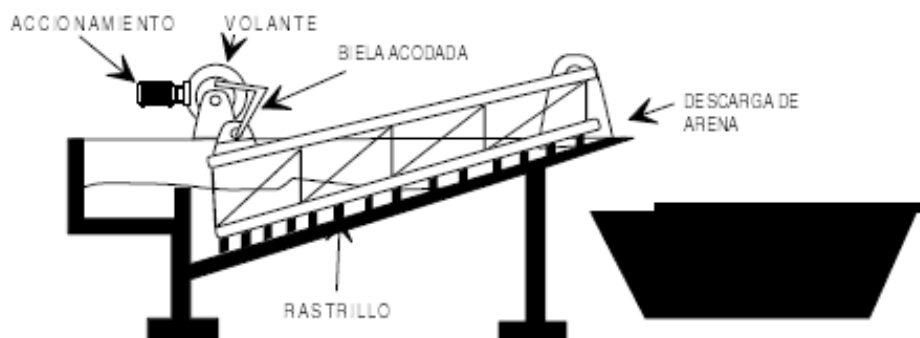


Figura 20. Esquema simple de un clasificador de arenas. Fuente: Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Tema 28: Pretratamientos.

Estas arenas extraídas del clasificador de arenas (Figura 20) poseen tres alternativas distintas para su gestión como residuo inerte. Estas alternativas son:

- Depósito en vertedero de residuos sólidos urbanos: se trata de una alternativa sencilla que simplemente exige mantener las arenas extraídas del clasificador en unas cubas, las cuales son recogidas semestralmente por un gestor autorizado de residuos para su transporte a vertedero. El equipo ha de ser capaz de extraer unas arenas con un Porcentaje de Materia Seca (MS) al menos del 18 % para poder ser vertido. No se realiza el aprovechamiento de este residuo y, además, posee un coste variable de gestión en función del volumen producido.
- Incineración: consiste en eliminar las arenas extraídas mediante la valorización energética de las mismas. Sin embargo, la baja producción de fangos en la ETAP y, además, la baja concentración de materia orgánica que estos poseen hace que la incineración no sea un proceso rentable para las plantas de combustión. A pesar de ello, sería una oportunidad que produciría beneficios económicos en vez de un costo en la gestión.
- Uso agrícola: se trata de la aplicación sobre el terreno de los fangos producidos en la planta. El fango puede servir como acondicionador del suelo y como abono. En el primer caso, permite retener agua del suelo, el crecimiento más fácil de las raíces y mejora la textura del suelo. En el segundo caso, sirve como complemento de los fertilizantes químicos permitiendo el ahorro de una parte de ellos. Es una aplicación que favorece a ambos sectores, pues se entregan a coste nulo para la ETAP a las personas interesadas en verterlos sobre sus terrenos agrícolas. Estos fangos carecen de metales pesados, pero tampoco poseen las concentraciones de nitrógeno, fósforo o potasio que pueden poseer los fangos producidos en una EDAR, luego la viabilidad de esta alternativa quedaría en manos de la empresa agricultora en cuestión.

En definitiva, la alternativa más eficiente sería el tratamiento sobre el terreno agrícola. Ofrece la capacidad de reutilizar un potencial residuo y, además, permite reducir notoriamente los costes relacionados con la gestión de residuos. Sin embargo, requiere de condiciones muy particulares como encontrar de manera particular a una empresa receptora capaz de sostener los costes de transporte y ser verdaderamente beneficiada por el uso de las arenas extraídas.

Esta operación de desarenado (Figura 21) permite reducir de manera importante la evacuación de fangos hacia el colector municipal. Sin embargo, no es capaz de eliminar toda la arena y el flóculo contenido en el agua, por lo que alcanzará la EDAR municipal. Su gran ventaja es que posee una alta eficiencia con un coste operacional razonable, además de favorecer la eliminación de los residuos de una manera económica y ecológica.

No obstante, el mantenimiento de este tipo de equipos, en la ETAP de San Juan, requiere de operaciones especializadas por personal externo, aumentando considerablemente los costes de mantenimiento. Además, es frecuente encontrar atascos que limitan la operatividad del proceso.

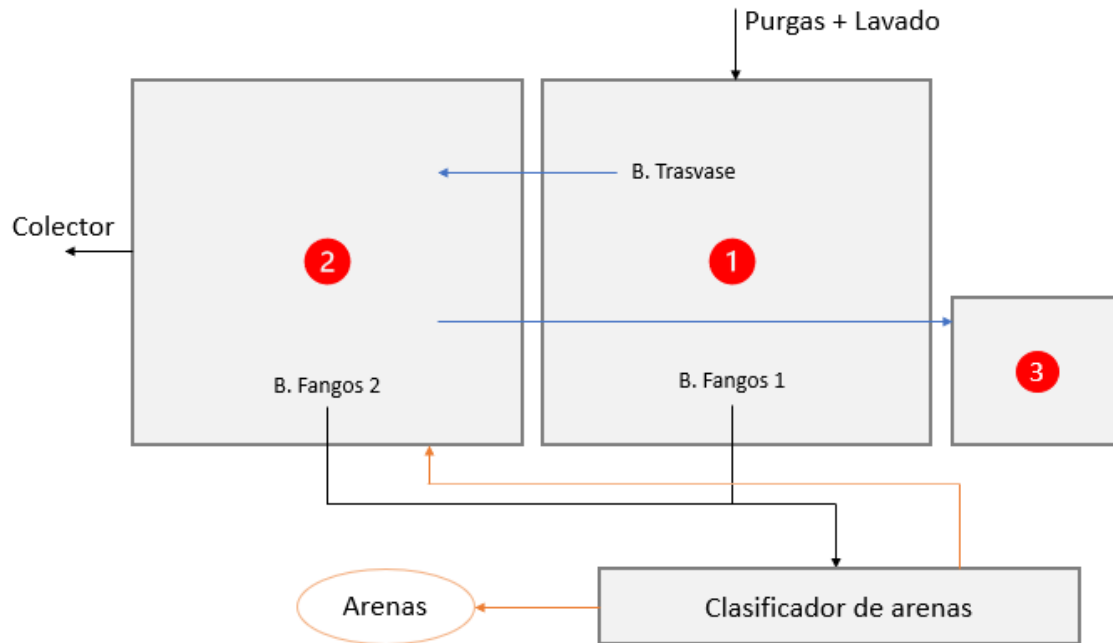


Figura 21. Alternativa 2: Separación mediante clasificador de arenas.

Como se ha comentado con anterioridad, actualmente la Alternativa 2 es el proceso que está implantado en la ETAP de San Juan. Sin embargo, debido a las paradas por avería, se lleva a cabo la Alternativa 1 de manera circunstancial. Dichas paradas son debidas a mantenimientos correctivos que se realizan sobre el clasificador de arenas.

3.3. Deshidratación mediante centrífuga

A continuación, se presenta la opción de deshidratación mecánica mediante el uso de una centrífuga. Se trata de un proceso de ejecución sencillo pero que requiere de ciertos equipos específicos que han de adquirirse e instalarse previamente.

Una centrífuga es un equipo de deshidratación mecánica que consta de un tornillo con forma de hélice que gira alrededor de su eje, a una n de entre 1600 y 2000 r.p.m. Este tornillo se encuentra encerrado dentro de una carcasa con forma cilíndrico-cónica, la cual posee un giro de menor velocidad. Su representación esquemática se puede ver en la Figura 22.

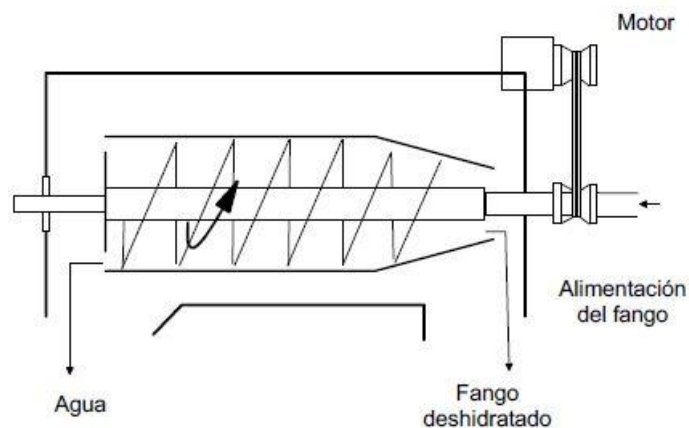


Figura 22. Esquema simple de una centrífuga. Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Tema 35: Deshidratación y evacuación de fangos.

Al ser capaz de extraer dos corrientes, una húmeda y otra seca, resulta de gran interés para la aplicación del sistema de recuperación de agua en la ETAP. Una centrífuga, de media, es capaz de extraer un porcentaje de MS de entre el 20 y el 25 %, si bien es posible encontrar equipos capaces de alcanzar el 30 y el 35 %. En cuanto al agua extraída del proceso, posee una turbidez baja, de tal manera que se puede aprovechar para realizar nuevamente su tratamiento de potabilización sin afectar apenas al proceso general. Así, durante el proceso se tendrían unos fangos espesados que, tras un acondicionamiento previo, pasarían a la centrífuga y se convertirían en los fangos deshidratados, los cuales deberán ser gestionados. Las alternativas para la gestión de los residuos son las mismas que se plantean en el Apartado 3.2. De esta manera, se elige como la alternativa óptima el uso agrícola, obviando las mencionadas dificultades que esta acarrea.

En lo referido al proceso completo, se requeriría de una reestructuración amplia del sistema actual. Se debería añadir equipos de preparación y dosificación de floculante, equipos de impulsión de fangos espesados y también de fangos deshidratados y sistemas de almacenamiento de ambos tipos de fangos. La Figura 23 representa las corrientes que se deberían encontrar dentro de este sistema.

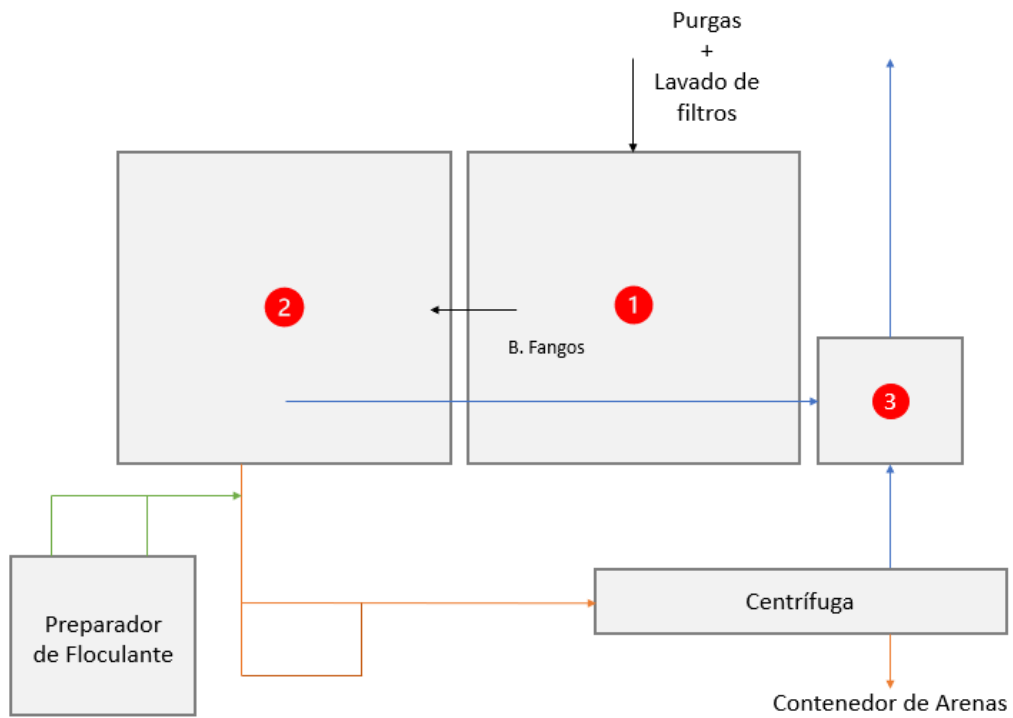


Figura 23. Alternativa 3: Deshidratación mediante centrifuga.

La utilización de una centrifuga hace que la eficiencia del proceso sea muy alta, garantizando así un vertido de fango muy bajo a colector y recuperando un porcentaje de agua más alto, a pesar de que los costes iniciales sean altos.

3.4. Deshidratación mediante filtro prensa

La deshidratación mecánica mediante la utilización de equipos como los filtros prensa, es una operación similar a la presentada en el Apartado 3.3. La diferencia fundamental entre estos dos sistemas reside en el equipo de deshidratación empleado, es decir, se cambia la centrífuga por el filtro prensa.

Estos filtros constan de unas celdas recubiertas de un material poroso en las que se introduce el fango. Dichas celdas están situadas a lo largo de un eje sobre el que se aplica compresión. Como consecuencia, el agua presente en el fango escapa a través de una serie de drenes y el fango deshidratado queda retenido en las celdas, formando una torta. Finalmente, se abren las celdas y las tortas caen hacia el punto de evacuación final. En la Figura 24 se muestra un esquema simplificado de este tipo de filtros.

La secuencia de trabajo se realiza de manera intermitente, de tal manera que no se requiere de un funcionamiento en continuo de los equipos adyacentes al filtro prensa. Así, a continuación, se enumeran las fases de funcionamiento del equipo:

1. Llenado del filtro con fango a través del bombeo de alimentación.
2. Operación de filtrado con una duración entre 1 y 2 horas. Se aplica una fuerza de compresión que permite al fango compactarse en la celda.
3. Vaciado del filtro. Esta operación se realiza liberando la compresión aplicada y realizando zarandeos o golpes automáticos en diversas zonas del equipo.
4. Lavado con una duración de 30 minutos cada 2 ó 3 filtrados.

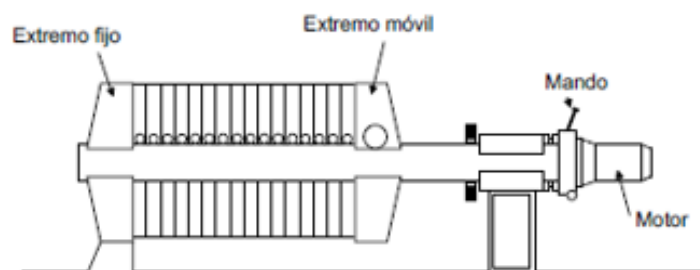


Figura 24. Esquema simple de un filtro prensa. Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Tema 35: Deshidratación y evacuación de fangos.

Como se ha comentado anteriormente, el esquema del proceso no cambia, simplemente se debe acoplar un equipo distinto al final del mismo proceso. No obstante, existe una gran diferencia si se utiliza un equipo u otro (Figura 25). Tal elección se debe realizar en base a las características del fango, los costes tanto de compra e instalación como de mantenimiento y operación, el espacio disponible y la capacidad del personal de la planta para llevar a cabo el proceso.

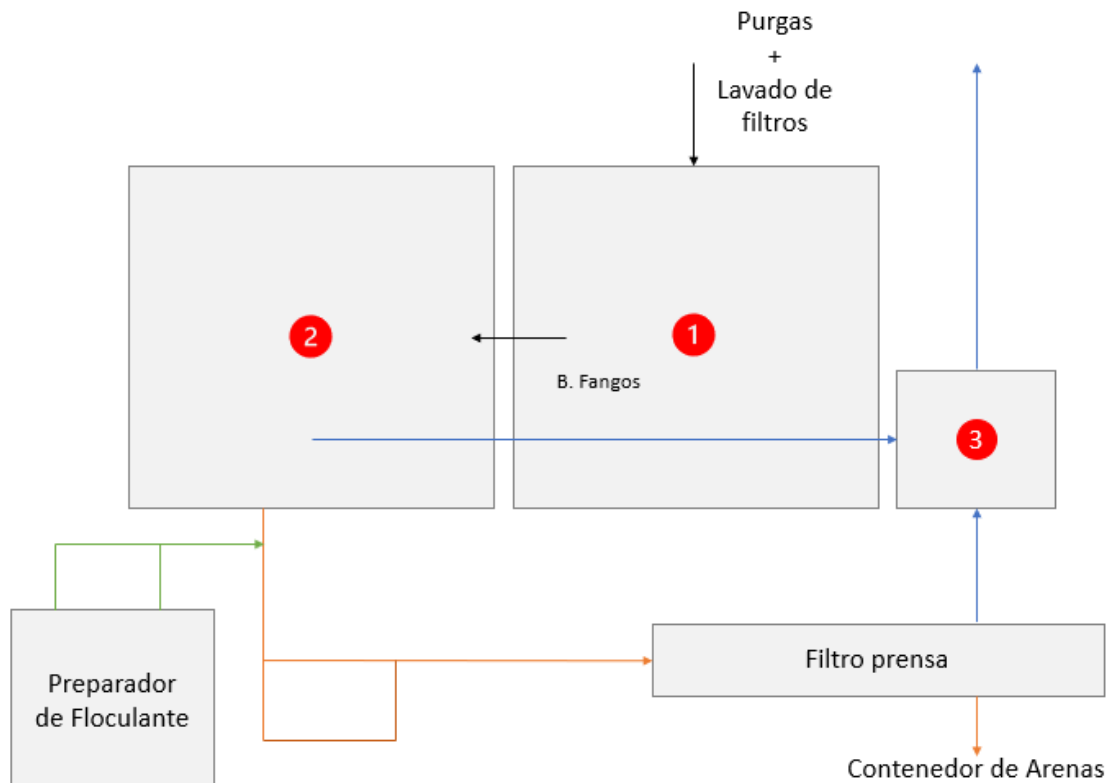


Figura 25. Alternativa 4: Deshidratación mediante filtro prensa.

La ventaja principal del filtro prensa es su capacidad para conseguir sequedades superiores al 30 %, aumentando la eficiencia del proceso de recuperación de agua de la ETAP. Sin embargo, entre sus desventajas se encuentran las siguientes:

- Los costos energéticos son bastante altos, pero son adaptables a diferentes tipos de fango.
- Los costos de inversión son muy altos.
- Los costos de operación son también muy altos, pues necesitan de gran cantidad de reactivos en la fase de acondicionamiento y su consumo energético es elevado.

4. Solución adoptada

A continuación, se realiza una evaluación cualitativa de las alternativas expuestas en el Apartado 3. La Tabla 2 recoge cada una de estas alternativas y cada uno de los criterios de evaluación que se han utilizado. Por una parte, se evalúa el coste de instalación, es decir, el coste asociado a la compra y puesta en marcha del equipo en cuestión. Por otra, los costes de mantenimiento, teniendo en cuenta en este ítem tanto los costes por materiales de reparación como los relacionados con los tiempos empleados por operarios en sus labores o por empresas externas subcontratadas. Seguidamente, se contempla la eficacia de separación, es decir, la capacidad que tiene el proceso de conseguir sequedad en el fango y un gran volumen de agua clarificada para volver a tratar y aprovechar. Finalmente, se tienen en cuenta los criterios legales en base a los límites de vertido, de tal manera que, aunque la EDAR municipal sea capaz de aceptar los fangos enviados, se realice de una manera respetuosa con el medio.

Estos criterios de valoración pueden poseer una puntuación que va desde el 1 hasta el 5, donde 5 significa muy adecuado y 1 poco adecuado. Sin embargo, el ítem “Límites de vertido” puede tomar los valores 0,25, 0,5 y 1. Esto es debido a que el límite de vertido puede sobrepasarse, mantenerse muy cerca o quedarse muy lejos de este, de tal manera que el valor 0,25 se asocia a un vertido excesivo, 0,5 se asocia a un vertido en el límite de los valores establecidos y 1 se relaciona con un vertido bajo.

Los 3 primeros ítems se suman, generando un sumando que se pondera por el cuarto ítem, el límite de vertido. De esta manera, el criterio de ponderación utilizado corresponde a la siguiente ecuación:

$$S = (\text{Coste Instalación} + \text{Costes Mantenimiento} + \text{Eficacia}) * \text{Límites Vertido}$$

Aquel valor acumulado de ponderación (S) que posea un valor mayor será aquel que se elegirá como la solución más adecuada para la planta. En este caso, dados los resultados obtenidos en la Tabla 2, la instalación de una centrífuga después de las etapas de decantación supone, en principio, el proceso óptimo debido sobre todo a su gran eficacia de separación, lo que supone una importante recuperación de agua, así como de una importante reducción de las arenas vertidas a colector, a pesar de su mayor coste de instalación y mantenimiento. Por tanto, se va a tratar en mayor profundidad la alternativa sugerida de deshidratación mediante centrífuga, siempre a la espera de tener suficiente disponibilidad presupuestaria.

Tabla 2. Evaluación cualitativa de las alternativas.

Vertido a colector		Clasificador de arenas		Centrífuga		Filtro prensa	
Aspecto	Valor	Aspecto	Valor	Aspecto	Valor	Aspecto	Valor
Coste instalación	5	Coste instalación	4	Coste instalación	2	Coste instalación	1
Costes de mantenimiento	4	Costes de mantenimiento	1	Costes de mantenimiento	2	Costes de mantenimiento	1
Eficacia de separación	1	Eficacia de separación	3	Eficacia de separación	5	Eficacia de separación	5
Límites de vertido	0,25	Límites de vertido	0,5	Límites de vertido	1	Límites de vertido	1
Valor Acumulado	2,5	Valor Acumulado	4	Valor Acumulado	9	Valor Acumulado	7

Cabe destacar que la Alternativa 2, relativa al clasificador de arenas, posee una alta puntuación ya que dicho equipo se encuentra ubicado en la planta. Sin embargo, el hecho de que se encuentre en periodo de reparación hace que no sea posible otorgarle la puntuación máxima. La Alternativa 4, también posee una alta puntuación, pero es penalizada, sobre todo, por las dificultades de mantenimiento que puede llegar a ocasionar.

En cuanto a la Alternativa 3, se aprovechan los equipos ya existentes en la ETAP, pero se debe realizar la compra de diversos equipos, lo cual hace aumentar los costes de instalación. Dichos equipos se comentarán, a continuación.

4.1. Proceso de recuperación de agua mediante deshidratación con centrífuga

Como se ha comentado con anterioridad, la deshidratación de los fangos mediante la utilización de una centrífuga resultaría la operación más adecuada para llevar a cabo los objetivos deseados. De esta manera, se realizará una explicación teórica del funcionamiento del proceso, una representación detallada de su instalación en la ETAP de San Juan y una serie de cálculos preliminares.

La deshidratación es un proceso físico que se puede integrar en la línea de fangos tanto de una ETAP como de una EDAR. Se utiliza para reducir el contenido de agua y, por tanto, el volumen de los fangos. De esta forma, el fango deshidratado es más fácil de manejar y el proceso de almacenaje y transporte es más cómodo y económico que en el caso de un fango con mayor contenido de agua. Además, en este caso, las aguas extraídas de la centrífuga sirven como nueva agua de tratamiento y posterior consumo. La Figura 26 representa el proceso diseñado para ello, el cual se irá explicando a lo largo de este apartado.

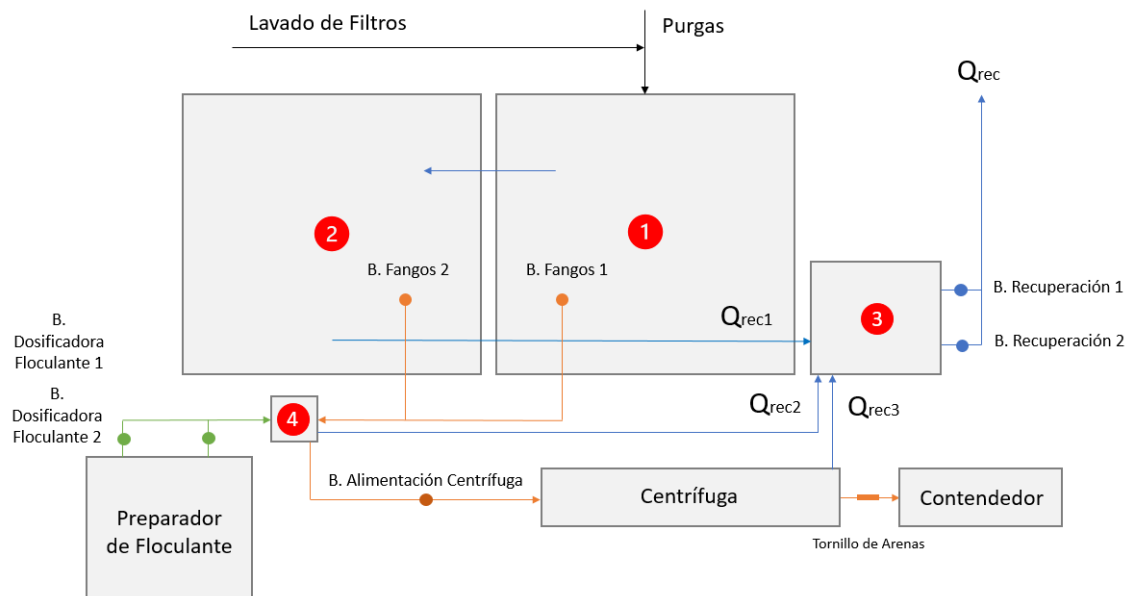


Figura 26. Esquema del proceso de recuperación de agua y tratamiento de fangos.

A continuación, se describen de manera detallada cada una de las etapas del proceso. Posteriormente, se desarrollan los cálculos necesarios para el dimensionamiento preliminar del proceso y se determina el sistema de gestión de residuos elegido. La Tabla 3 recoge todos los equipos necesarios para la puesta en marcha del proceso expuesto. Cabe destacar que algunos equipos de bombeo poseen una configuración (1+1) para evitar posibles fallos que provoquen una parada absoluta en el proceso continuo, como sucede con las bombas de recuperación de agua.

Además, para una mejor comprensión del proceso, el plano denominado 'Plano III: Proceso de fangos propuesto' del Anexo representa los equipos necesarios distribuidos en la superficie de la ETAP de San Juan y la distribución de los pozos.

Tabla 3. Listado de instalaciones y equipos requeridos para el proceso de deshidratación.

Obra civil	
Pozo 1	Decantación primaria
Pozo 2	Decantación secundaria
Pozo 3	Aspiración por bombas de recuperación
Desarenador elemental	Separación de arenas distinta densidad
Bombas	
Bomba de Fangos 1	Extracción de fangos desde el Pozo 1 hasta el Pozo 4
Bomba de Fangos 2	Extracción de fangos desde el Pozo 2 hasta el Pozo 4
Bombas de Dosificación de Floculante (2 uds.)	Dosificación de floculante en los fangos
Bomba de Alimentación a Centrífuga	Introducción de fangos acondicionados desde el Pozo 4 hasta la centrífuga
Bombas de Recuperación (2 uds.)	Elevación del agua recuperada hacia cabecera de planta
Boyas	
Boya Pozo 3 (2 uds.)	Control de las bombas de recuperación
Otros equipos	
Centrífuga	Separación de fango y agua
Preparador de Floculante	Preparación de almidón para dosificación
Clasificador de arenas	Transporte desde la centrífuga hasta el contenedor de arenas
Válvula flotadora	Control del paso de agua desde Pozo 2
Espesador	Espesamiento de fango y mezcla de floculante
Contenedor	Almacenamiento de fango deshidratado

4.1.1. Conducción de las corrientes de fango

Como se ha comentado en el Apartado 2.4, los fangos tratados en la ETAP provienen de dos procesos claramente diferenciados. En el caso del agua de lavado de los filtros de arena conviene llevar a cabo la separación de los dos tipos principales de residuos sólidos que transporta: la arena silíceica que se pierde de los filtros de arena y el flóculo que se escapa del proceso de decantación.

Para llevar a cabo esa separación se aprovechan los dos canales construidos, haciendo que el canal de las purgas del decantador viaje directamente al Pozo 1 y se realiza una modificación sobre el canal por el que fluye el agua de los lavados de los filtros, el cual también llegará al Pozo 1 (Figura 26).

Dicha modificación se realiza en base a la diferencia de peso específico entre las arenas procedentes de la corriente. Las arenas silíceicas poseen un alto peso específico en comparación con el flóculo que ha ido colmatando los filtros de arena y ha viajado por la corriente de lavado de filtros. A continuación, la Figura 27 representa el esquema básico de un desarenador elemental, sistema que debería instalarse en la conducción horizontal previa al caudalímetro de dicho canal.

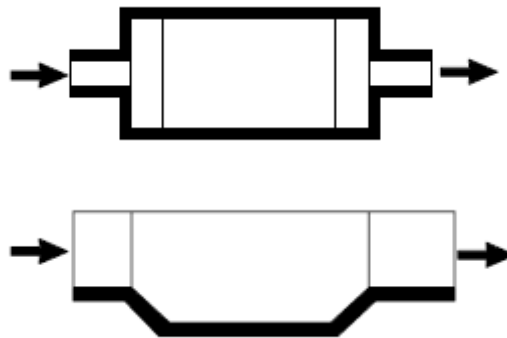


Figura 27. Esquema simple de un desarenador elemental. Fuente: Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Tema 28: Pretratamientos.

El proceso consiste simplemente en una separación física por gravedad, en el cual los cuerpos con un peso específico superior son capaces de precipitar sobre la cavidad inferior, a una velocidad de paso determinada. Además, teniendo en cuenta que se trata de un proceso discreto que se realiza una vez al día, es posible extraer manualmente las arenas depositadas en la cavidad para almacenarlas y colocarlas de nuevo en el lecho de arena cuando se realicen las operaciones manuales de los filtros de arena. Dichos lavados manuales realizados por los operarios se llevan a cabo cada tres semanas en cada filtro.

De esta manera, se ha separado el fango producido en la ETAP asociado a la turbidez que trae consigo el agua bruta de las captaciones. Resulta importante separar las arenas del filtro del flóculo debido a que, por una parte, no interesa perder la arena que se usa como medio filtrante y, por otra parte, es una arena muy abrasiva que provocaría fallos en los equipos posteriores del proceso de fangos.

4.1.2. Decantaciones y espesamiento en depósito tampón

Después de que el fango viaje por las conducciones, este (que todavía posee un % de MS muy bajo) llega al Pozo 1, donde comienza el primer proceso de decantación. Los sólidos precipitan, dejando un manto inferior de fangos bastante concentrados. Sin embargo, para llevar a cabo la deshidratación, se requiere una mayor concentración de fangos y el aumento de ese % de MS. Para ello, el fango que se encuentra en el fondo del Pozo 1, se envía al depósito tampón (Pozo 4) mediante la Bomba de Fangos 1, mientras que el agua clarificada que se encuentra en la parte superior es trasvasada desde el Pozo 1 hasta el Pozo 2 gracias a su rebose a través de un vertedero. Seguidamente, el agua del Pozo 2 también decanta, generando otra capa de fango concentrado en el fondo, la cual también se bombea, esta vez mediante la Bomba de Fangos 2, hacia el Pozo 4 (Figura 26). Ambas bombas de fangos funcionan de manera temporizada gracias a las consignas descritas sobre el SCADA de la planta.

Con este planteamiento, el decantador de clarificación terciaria que se utiliza en la actualidad va a convertirse en un espesador de fangos, con un volumen útil de 45 m^3 . Además, en este espesador o depósito tampón se realizará la operación de acondicionamiento, explicada en apartados posteriores. El fango introducido se concentra por gravedad a medida que pasa el tiempo hasta lograr un porcentaje de MS de entre el 2 y el 3 %. La operación de vaciado del espesador para proceder con la deshidratación se realiza una vez al mes o cada dos meses, en función de la época del año y, por ende, de la producción de fangos de la ETAP.

La Figura 28 representa un sencillo esquema de aplicación. El fango entra por la parte superior izquierda, proveniente del Pozo 1 y del Pozo 2. Parte del agua que se extrae de este fango espesado sale a través de la tubería superior hacia el Pozo 3. Dicha tubería extrae agua clarificada en última instancia a una velocidad muy baja. Teniendo en cuenta que se trata de una tubería de pequeño diámetro (200 mm), el caudal recuperado a través del espesador es muy bajo. Finalmente, por el fondo se extrae el fango ya concentrado con el porcentaje de MS deseado, el cual es bombeado hacia la centrifuga para su posterior deshidratación.

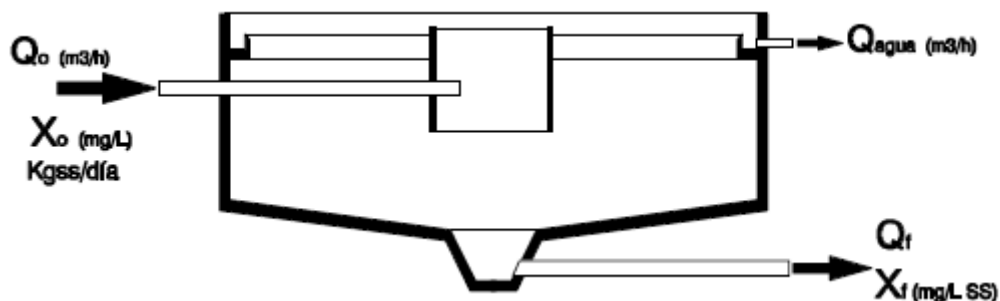


Figura 28. Esquema simple de un espesador por gravedad. Fuente: Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Tema 33: Tratamiento de fangos.

4.1.3. Acondicionamiento del fango

El agua presente en el fango se puede encontrar bajo cuatro formas: libre, coloidal, intercelular (el cual no existe en este tipo de fango) y capilar. El agua libre puede separarse del fango por gravedad ya que no está asociada a los sólidos. No obstante, para eliminar el agua coloidal y capilar se necesita un acondicionamiento químico previo al empleo de medios mecánicos. Es decir, para poder utilizar una centrífuga, primeramente, será necesario acondicionar químicamente el fango almacenado.

Este proceso consiste en la adición de reactivos al fango de tal manera que se consigue la floculación de los sólidos y la expulsión de parte del agua retenida. Entre los productos químicos más utilizados se tiene el cloruro férrico (Cl_3Fe), la cal (CaO) y los polielectrolitos catiónicos o aniónicos; mientras que, entre los floculantes naturales, el más utilizado con gran diferencia es el almidón. Comúnmente se utilizan los polielectrolitos para operaciones con centrífuga, ya que ofrecen mucho mejores resultados. Por ello, se escoge un polielectrolito catiónico como el floculante óptimo para la operación en la ETAP. Como contrapartida, el polielectrolito se adquiere comercialmente en grano y es necesaria su maceración, pues su solubilidad en el fango es muy mala si no es disuelto previamente en agua.

Además, el polielectrolito cede al agua acrilamidas libres, unas sustancias tóxicas muy solubles en agua. Está limitada la concentración de estas acrilamidas siempre que el agua que se va a tratar sea para consumo humano, según la Directiva de la Unión Europea 2020/2184 del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2020 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano. Nunca se podrá sobrepasar una concentración de acrilamidas en agua de consumo humano de $0,1 \mu\text{g L}^{-1}$.

Así, para tratamiento de aguas potables se suele utilizar floculantes naturales como el almidón para evitar posibles problemas, mientras que en las líneas de fangos o en las líneas de agua de EDAR, se utiliza habitualmente el polielectrolito debido a su gran efectividad.

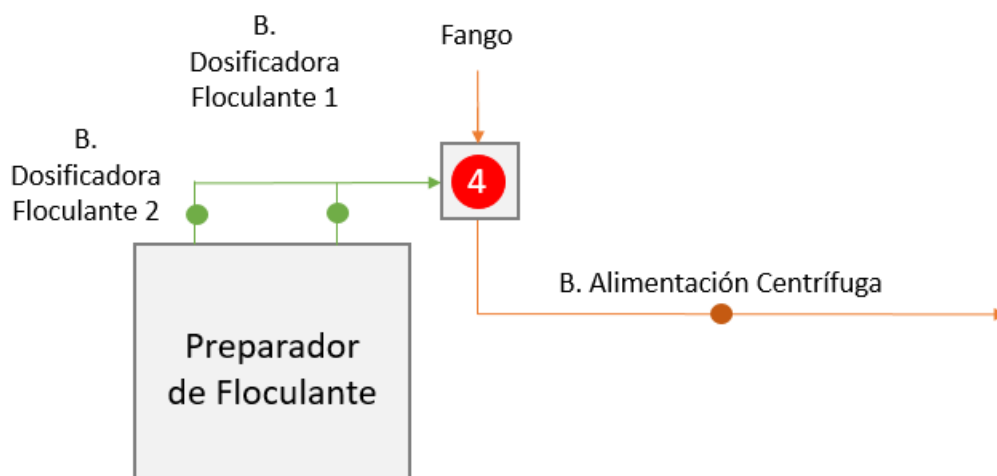


Figura 29. Esquema del proceso de acondicionamiento químico del fango espesado.

Como se puede observar en la Figura 29, para realizar el acondicionamiento químico mediante polielectrolito, se requiere de un sistema de preparación y dosificación, el cual consiste en lo siguiente:

1. Se vierte el polielectrolito en grano sobre la cuba del preparador de polielectrolito.
2. El preparador genera una mezcla en estado líquido que puede suministrarse sobre el fango.
3. Dos bombas dosificadoras son las encargadas de enviar el polielectrolito preparado al Pozo 4, donde el fango se mezcla con el floculante preparado.
4. Dos bombas de alimentación a centrífuga, con funcionamiento alternativo, impulsan el fango hacia la centrífuga.

El Pozo 4 es el responsable de realizar la mezcla entre los fangos espesados y el polielectrolito ya preparado. Como se ha mencionado anteriormente, dicho Pozo 4 se utiliza como espesador y realiza la mezcla del polielectrolito y el espesamiento del fango.

Para llevar a cabo el acondicionamiento del fango, es importante destacar la condición relativa a la concentración máxima de acrilamida que puede haber en el agua (Tabla 6). Por ello, es necesario dimensionar el sistema de dosificación para valorar si es posible la utilización de polielectrolito, cuyos resultados se presentan también en la Tabla 6.

Tabla 4. Parámetros de acondicionamiento del fango con polielectrolito.

Parámetro	Abreviatura	Valor	Unidad
Datos			
Caudal de Entrada a la Planta	Q	300	m ³ h ⁻¹
Concentración de Acrilamida en Polielectrolito	x _{acr}	0,025	%
Concentración Límite de Acrilamida	C _{lim}	0,1	µg L ⁻¹
Concentración de Polielectrolito Preparado	C _{poli}	2,5	kg m ⁻³ H ₂ O
Resultados			
Concentración de Acrilamida Preparada	C _{acr} ^{prep}	625	µg L ⁻¹
Volumen de Polielectrolito Preparado por Centrifugado	V _{poli}	2,43	m ³
Volumen de Centrifugado	V ₀	29,25	m ³
Concentración de Acrilamida en el Fango	C _{acr}	48,07	µg L ⁻¹
Concentración Total de Acrilamida	C _{acr} ^{tot}	2,87	µg L ⁻¹

Teniendo en cuenta los resultados expuestos en la Tabla 6, cabe destacar desde un inicio que no va a ser posible el uso de polielectrolito debido a la alta concentración de acrilamida en el agua de consumo. A continuación, se presenta el desarrollo de los cálculos que han determinado dicha conclusión.

Primeramente, se calcula la concentración de acrilamida dentro del polielectrolito. Teniendo en cuenta la Concentración de Acrilamida en Polielectrolito (x_{acr}) establecida por la Directiva de la Unión Europea 2020/2184 del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2020 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano, se limita a los fabricantes a no superar dicho porcentaje.

Teniendo en cuenta también la condición experimental que sugiere la utilización 1 m³ de agua por cada de 2,5 kg polielectrolito (C_{poli}), entonces, se calcula lo siguiente:

$$C_{acr}^{prep} = \frac{2,5 \text{ kg polielectrolito}}{\text{m}^3 \text{ H}_2\text{O} * 1000 \text{ L}} * \frac{0,25 \text{ g acrilamida}}{\text{kg polielectrolito}} * 10^6 \mu\text{g} = 625 \frac{\mu\text{g acrilamida}}{\text{L H}_2\text{O}}$$

Donde el denominador (m³ H₂O ó L H₂O) determina que se trata de polielectrolito preparado, en disolución con agua.

Después, se determina el Volumen de Polielectrolito Preparado por Centrifugado (V_{poli}). Este se calcula gracias a la siguiente condición experimental: se requiere de 1 m³ de polielectrolito preparado por cada 12 m³ de fango que se quieren espesar. Teniendo en cuenta el Volumen de Centrifugado (V_0), explicado en el Apartado 4.1.7, se tiene que:

$$V_{poli} = V_0 * \frac{1}{12} \quad (1)$$

$$V_{poli} = \frac{29,25 \text{ m}^3 \text{ fango a espesar} * 1 \text{ m}^3 \text{ polielectrolito preparado}}{12 \text{ m}^3 \text{ fango a espesar}} = 2,43 \text{ m}^3$$

Seguidamente, se establece el Volumen Total con Polielectrolito (V_{tot}), que aúna los volúmenes de polielectrolito y de fango:

$$V_{tot} = V_{poli} + V_0 = 2,43 \text{ m}^3 + 29,25 \text{ m}^3 = 31,68 \text{ m}^3$$

Determinando el V_{poli} , se establece el cociente que determina la Concentración de Acrilamida en el Fango (C_{acr}), cuya concentración en el fango de la ETAP es demasiado alta.

$$C_{\text{acr}} = \frac{1.523.437,5 \frac{\mu\text{g acrilamida}}{\text{L fango}}}{2,43 \text{ m}^3 \text{ polielectrolito} * 1000 \text{ L}} = 48,07 \frac{\mu\text{g acrilamida}}{\text{L fango}}$$

Teniendo en cuenta que esta alta concentración después se diluye con el agua que entra a cabecera de planta, se establece la siguiente relación:

$$C_{\text{acr}}^{\text{tot}} * Q = C_0 * Q_0 + C_{\text{acr}} * (Q_{\text{rec2}} + Q_{\text{rec3}}) \quad (2)$$

La ecuación (2) determina el balance que se tendría en la entrada, siendo la Concentración Total de Acrilamida ($C_{\text{acr}}^{\text{tot}}$) el valor determinante para comparar con el valor límite y el Caudal de Entrada a la Planta (Q). Se destaca que la Concentración Inicial de Acrilamida (C_0) es nula debido a que el agua que proviene de las captaciones de ninguna manera puede poseer acrilamida, luego toda la concentración de acrilamida que se encuentre en el agua de consumo provendrá de la línea de fangos.

$$C_{\text{acr}}^{\text{tot}} = \frac{(16,67 + 0,0314) \text{ m}^3\text{h}^{-1} * 48,07 \frac{\mu\text{g acrilamida}}{\text{L fango}}}{300 \text{ m}^3\text{h}^{-1}} = 2,67 \frac{\mu\text{g acrilamida}}{\text{L}}$$

Por consiguiente:

$$2,67 > 0,1 \frac{\mu\text{g}}{\text{L}} \rightarrow C_{\text{acr}}^{\text{tot}} > C_{\text{lim}}$$

Finalmente, se extrae la conclusión de que no se puede utilizar un polielectrolito catiónico como floculante debido a la cesión de acrilamidas al agua. Entonces, se debe utilizar un floculante natural que sea capaz de lograr concentraciones altas en el fango: el almidón.

4.1.4. Deshidratación por centrifuga

El fango previamente espesado y acondicionado, se introduce por el eje y, debido a la fuerza centrífuga, la fracción sólida de la corriente se recoge de las paredes de la cuba exterior. El agua se extrae por la parte cilíndrica contrapuesta a la parte cónica, lugar por el cual se extraen los fangos deshidratados, con un porcentaje de MS de entre el 18 y el 22 %.

La parte del proceso en el cual entra en juego la centrífuga comienza a partir del bombeo mediante una bomba de tornillo sin fin, encargada de mover el fango acondicionado (Apartado 4.2.3). Una vez el fango es introducido en la centrífuga, el giro de esta hace que una corriente de fango seco salga por una tubería. Dicho fango es conducido gracias a un tornillo sin fin hacia el contenedor de almacenamiento, el cual guardará el fango final para ser gestionado.

Como se ha comentado anteriormente, el proceso de deshidratación se realiza de manera interrumpida. Por lo tanto, las operaciones de deshidratación comenzarán cuando el espesador esté completo de fango a un 75 % de su volumen total, vaciando éste hasta el 10 % de su volumen. Así, se reducen los costes operativos y de mantenimiento y se pueden organizar campañas mensuales de operación en la línea de fangos con los operarios y el responsable de la planta, pues la realización de estas maniobras se limitaría a una o dos veces al mes.

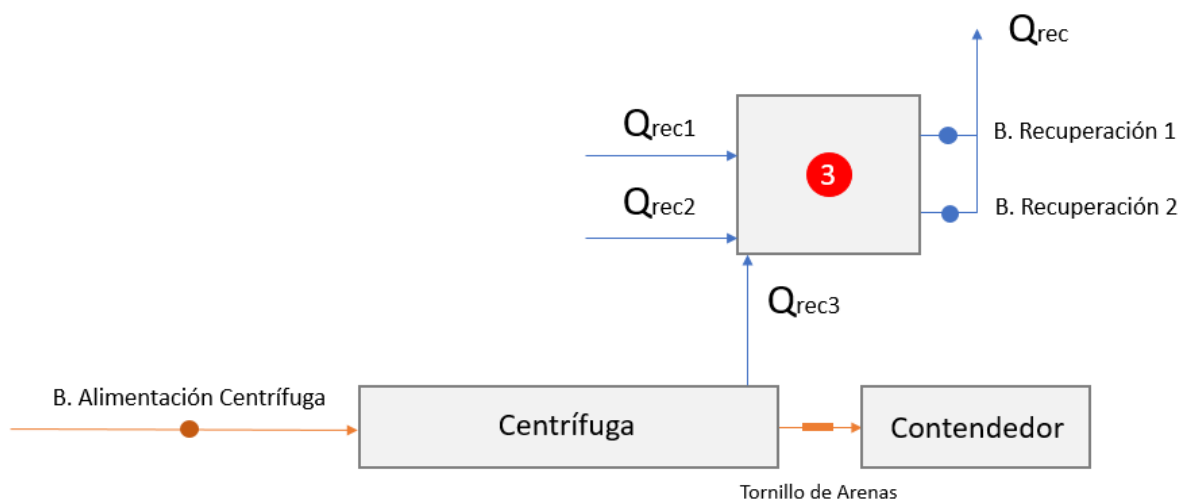


Figura 30. Esquema de funcionamiento de la centrífuga.

Siguiendo la Figura 30, se puede observar que la corriente de agua extraída de la centrífuga es enviada hacia el Pozo 3. La corriente de extracción de agua de la centrífuga, el Caudal de Recuperación Centrífuga (Q_{rec3}), se mezcla con las otras corrientes de recuperación de agua del proceso y en dicho Pozo 3. La otra corriente de agua de recuperación, el Caudal de Recuperación del Pozo 2 (Q_{rec1}), es extraído gracias a la válvula flotador del Pozo 2, la cual permite el paso de agua clarificada en función de la altura de la lámina de agua de dicho pozo.

De esta manera, se tiene un Caudal de Recuperación de Agua Total (Q_{rec}), el cual se mide gracias al caudalímetro que se encuentra en la impulsión de las bombas de recuperación de agua y representa el caudal final de agua que se ha recuperado a través del proceso de recuperación de agua completo.

4.1.5. Evacuación de fangos

Para realizar la evacuación de los fangos desde la centrífuga, se plantea un sistema que permite aprovechar un equipo actual de la planta: el clasificador de arenas. El proceso consiste básicamente en recoger el fango deshidratado en la tolva del clasificador y hacer que ascienda a través del tornillo sin fin del equipo. Una vez alcance la cota más alta del tornillo, el fango cae por la abertura final y se deposita en el contenedor (Figura 15). Para una mayor comprensión del sistema completo, véase el Plano III del Anexo: Proceso de fangos propuesto, el cual representa los equipos distribuidos en la caseta de fangos de la ETAP de San Juan.

4.1.6. Cálculos del nuevo proceso

Para valorar la mejora producida sobre la situación actual, se realizan una serie de cálculos que estiman los caudales más importantes que toman parte del proceso. Cabe destacar que esta estimación puede poseer cierta variabilidad, pues se ha realizado en base a unas expectativas ofrecidas por los fabricantes de los equipos y la experiencia acumulada por Aquambiente S.L.U. Las variables del proceso vienen representadas en la Figura 31.

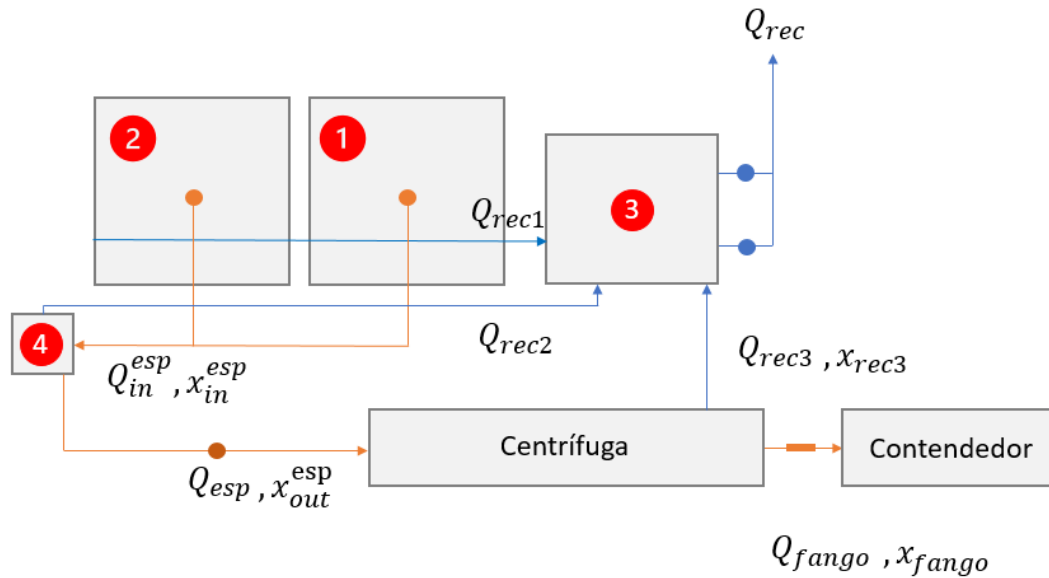


Figura 31. Parámetros de cálculo del proceso.

Así, los cálculos se han desarrollado siguiendo el procedimiento que se explica a continuación:

1. Utilizando la curva característica de las bombas de fangos que se van a instalar en el proceso, se puede estimar un punto de funcionamiento que determina un caudal máximo de ambas bombas, para una altura concreta. Teniendo en cuenta las características de la instalación y del proceso, la Tabla 4 representa el mencionado punto de funcionamiento de una sola bomba.

Tabla 5. Punto de funcionamiento de una bomba de fangos.

Parámetro	Valor	Unidad
Altura de bomba	4	m
Caudal de Bomba de Fangos	12,9	m ³ h ⁻¹

Luego el caudal de la Bomba de Fangos 1, el cual es igual al caudal de la Bomba de Fangos 2, se suman y producen la corriente que entra al espesador (Figura 31). Por tanto, a partir de ahora se mencionará este caudal como Caudal de Entrada a Espesador (Q_{in}^{esp}), el cual posee un valor aproximado de 25,8 m³h⁻¹.

2. Después, se decide el caudal que se pretende extraer de la clarificación del espesador. Para conocer dicho valor, primeramente, se determina una velocidad de extracción de agua, la cual se estima en 1 m h⁻¹ (Degrémont, 1979). Si se escoge una tubería de acero inoxidable de diámetro interior 200 mm, el Caudal de Recuperación del Espesador (Q_{rec2}) será de tan solo 0,0314 m³h⁻¹.

3. Como se comenta anteriormente, el proceso de deshidratación no es continuo. El espesador se va llenando durante un tiempo, produciéndose el espesamiento por gravedad gracias al acondicionamiento del fango. Dadas las características generales del fango de la ETAP de San Juan, se prevé un espesamiento que permita un porcentaje de MS hasta el 3 % (30 g L^{-1}). Entonces, se determinan los siguientes datos como inicio del proceso de deshidratación, siendo el Caudal de Fango Espesado (Q_{esp}) el caudal que entra a la centrífuga para sufrir el proceso de deshidratación (Tabla 5). Así, se escoge que el Q_{esp} sea de $20 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, siendo éste el caudal de diseño de la Bomba de Alimentación a Centrífuga y, por tanto, el caudal que entra en deshidratación.

Tabla 6. Parámetros del proceso de deshidratación.

Parámetro	Abreviatura	Valor	Unidad
% de MS de Entrada a Espesador	$X_{\text{in}}^{\text{esp}}$	0,8	%
% de MS de Salida del Espesador	$X_{\text{out}}^{\text{esp}}$	3	%
% de MS de Salida de la Centrífuga	X_{rec3}	0	%
% de MS Final	X_{fango}	18	%
Caudal de Fango Espesado	Q_{esp}	20	m^3h^{-1}

4. En la etapa de centrifugación, se produce un Caudal de Fango Deshidratado (Q_{fango}), el cual se corresponde con el caudal que sale de la centrífuga cargado de sólidos: % de MS Final (x_{fango}) de 18 % (180 g L^{-1}). El % de MS de Salida de la Centrífuga (x_{rec3}) se considera nulo ya que se trata de un agua que sale prácticamente clarificada a través de la centrífuga y su valor es muy cercano a 0. Además, se extrae Q_{rec3} , todo ello gracias al sistema de ecuaciones (3) y (4) presentado a continuación, que representan de manera aproximada los balances de masa y volumen que se tienen en la centrífuga, teniendo en cuenta los datos de la Tabla 5. Los resultados de los balances pueden observarse en la Tabla 7.

$$Q_{\text{esp}} * X_{\text{out}}^{\text{esp}} = Q_{\text{fango}} * X_{\text{fango}} + Q_{\text{rec3}} * X_{\text{rec3}} \quad (3)$$

$$Q_{\text{esp}} = Q_{\text{fango}} + Q_{\text{rec3}} \quad (4)$$

Despejando el sistema:

$$Q_{\text{fango}} = \frac{Q_{\text{esp}} * X_{\text{out}}^{\text{esp}}}{X_{\text{fango}}} = \frac{20 \text{ m}^3\text{h}^{-1} * 0,03}{0,18} = 3,33 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$$

$$Q_{\text{rec3}} = Q_{\text{esp}} - Q_{\text{fango}} = 16,67 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$$

5. Finalmente, se define Q_{rec} , el cual resulta de la suma de los caudales parciales recuperados, representados en la Tabla 7. Teniendo en cuenta que la distribución no ha cambiado en lo referido al Q_{rec1} , este se obtiene del registro histórico del caudal medio que se recupera a través de la válvula flotador ($10 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$). Su valor se obtiene del registro medio histórico de Aquambiente S.L.U. en la explotación de la ETAP de San Juan, pues el proceso no ha sufrido ninguna modificación hasta ese punto.

$$Q_{rec} = Q_{rec1} + Q_{rec2} + Q_{rec3} \quad (5)$$

Entonces:

$$Q_{rec} = 10 + 0,0314 + 16,7 = 26,75 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$$

La ecuación (4) refleja una suma aritmética de los tres caudales que se obtienen de agua clarificada. Finalmente, se ha obtenido el nuevo caudal de agua recuperada gracias a la nueva línea de fangos.

Una vez determinados todos estos cálculos, se realiza la comparativa de los caudales de recuperación y de la producción de fangos. En cuanto a los caudales de recuperación, por un lado, se valora el mencionado Q_{rec} y, por otro lado, el Caudal de Recuperación de Agua Total Actual (Q'_{rec}), obtenido como el valor medio del registro histórico de la ETAP con el sistema de recuperación de agua actual. Existe un beneficio neto en cuanto al caudal recuperado, tal y como indica las ecuaciones (6.1) y (6.2).

$$Q_{rec}/Q'_{rec} = 1,15 \quad (6.1)$$

$$Q_{rec} - Q'_{rec} = 26,75 - 23,19 = 3,56 \text{ m}^3\text{h}^{-1} \quad (6.2)$$

Se obtiene una mejora del 15 %, lo que equivale a un caudal horario de $3,56 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ en la recuperación de agua al realizar las modificaciones planteadas en el proyecto en función de los datos de la Tabla 7.

Respecto a la producción de fangos deshidratados, no se puede hacer una valoración comparativa y cuantitativa de la cantidad de sólidos que se generan, pues no existe registro previo de ello. Por tanto, se representa la producción de fangos solamente del nuevo proceso en base a Q_{fango} . En este aspecto, la mejora es sustancial, ya que el % de MS aumenta en la salida del proceso respecto a la situación previa. Por ello, la mejora ambiental es importante, debido a dos premisas:

- Se minimiza el vertido de sólidos a colector, pues se reduce el % de MS que se emite en este caso.
- Se extrae un nuevo recurso de la ETAP que se aprovecha en otra industria. Poder recuperar una sustancia no contaminada permite su reutilización. En el caso de enviar a la EDAR municipal estos fangos, cabría la posibilidad de juntarse con otras aguas residuales que provocarían una dilución que no permitiera el Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario.

Tabla 7. Estimación de caudales del nuevo proceso.

Caudales	Abreviatura	Valor	Unidad
Caudal de Recuperación de Agua Total Actual	Q'_{rec}	23,19	m^3h^{-1}
Caudal de Recuperación de Agua Total	Q_{rec}	26,75	m^3h^{-1}
Caudal de Recuperación del Pozo 2	Q_{rec1}	10	m^3h^{-1}
Caudal de Entrada a Espesador	Q_{in}^{esp}	25,8	m^3h^{-1}
Caudal de Recuperación del Espesador	Q_{rec2}	0,0314	m^3h^{-1}
Caudal de Fango Espesado	Q_{esp}	20	m^3h^{-1}
Caudal de Recuperación Centrífuga	Q_{rec3}	16,67	m^3h^{-1}
Caudal de Fango Deshidratado	Q_{fango}	3,33	m^3h^{-1}

4.1.7. Gestión de residuos

Los lodos pueden ser aplicados en los suelos agrícolas conforme a lo que establece el Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario.

Las arenas almacenadas en el contenedor son recogidas de forma mensual o bimensual por un cliente del sector agrícola, el cual utiliza el fango extraído de la ETAP como abono para el terreno, tal y como se explica en el Apartado 3.2. No existen costes asociados al transporte de este, pues se trata de una operación de reutilización del residuo producido, gracias a la cual el nuevo cliente obtiene un beneficio a pesar de sufragar estos costes de transporte.

La producción de fangos final para reutilización viene dada por el volumen de fango centrifugado, teniendo en cuenta que el volumen del espesador es de 45 m³ y que se trabajará siempre entre el 75 % y el 10 % de su volumen. Así, la Tabla 8 representa la producción en volumen de fangos.

Tabla 8. Parámetros de cálculo de la producción volumétrica de fangos.

Parámetro	Abreviatura	Valor	Unidad
Volumen del Espesador	V_{esp}	45	m ³
Volumen Superior del Espesador	V_s	33,75	m ³
Volumen Inferior del Espesador	V_i	4,5	m ³
Volumen por Centrifugado	V_0	29,25	m ³
Tiempo de Centrifugado	t_0	1,46	h
Producción Volumétrica de Fangos por Centrifugado	P_0	4,82	m ³

A continuación, se enumera la secuencia de cálculo empleada para la producción de fangos:

- 1- El Volumen de Centrifugado (V_0) nace de la diferencia entre los Volúmenes Superior e Inferior del Espesador:

$$V_s = 0,75 * V_{esp} \quad (7)$$

$$V_i = 0,1 * V_{esp} \quad (8)$$

$$V_0 = V_s - V_i \quad (9)$$

Por lo tanto:

$$V_0 = V_s - V_i = 33,75 - 4,5 = 29,25 \text{ m}^3$$

- 2- Seguidamente, se determina el tiempo de centrifugado (t_0), utilizando Q_{esp} como referencia y siguiendo la ecuación (10):

$$t_0 = \frac{V_0}{Q_{esp}} \quad (10)$$

Entonces:

$$t_0 = \frac{29,25 \text{ m}^3}{20 \text{ m}^3\text{h}^{-1}} = 1,46 \text{ h}$$

- 3- Finalmente, el producto de t_0 y Q_{fangos} determina la Producción Volumétrica de Fangos por Centrifugado (P_0):

$$P_0 = 3,33 \text{ m}^3\text{h}^{-1} * 1,46 \text{ h} = 4,82 \text{ m}^3$$

En definitiva, se determina que la producción en volumen de fango que es evacuado hacia el contenedor por cada operación de deshidratación es de $4,82 \text{ m}^3$. Esto hace necesaria la instalación de un contenedor de almacenaje de 5 m^3 , para así poder realizar un viaje de camión por cada operación mensual o bimensual de centrifugado. Se satisface la necesidad de la planta de gestionar el residuo, mientras que también se provee al agricultor de materia prima con una periodicidad razonable.

4.2. Equipos comerciales a adquirir para el proceso de deshidratación

A continuación, se muestran los equipos que deben adquirirse para realizar la puesta en marcha del nuevo proceso de recuperación del agua.

4.2.1. Preparador de floculante

El preparador automático para almidón escogido para la ETAP es de tipo Polipak MS130 del fabricante Politech, con forma cilíndrica-vertical con fondo plano, carga de almidón, válvula de drenaje, agitador mecánico en acero inoxidable AISI 304. El cuerpo está fabricado en polietileno amarillo de doble pared, según especificaciones técnicas.

Este equipo, como se puede ver en la Figura 32, posee una tolva anexada a una cuba con un volumen de 130 L. Dicha cuba posee unos amarres para colocar dos agitadores con una P de 0,37 kW, encargados de movilizar el agua y el almidón que se introduce sobre el equipo. Finalmente, de la cuba de la máquina se extrae una manguera, la cual canaliza el almidón preparado hacia el depósito de fango espesado.



Figura 32. Esquema del preparador de floculante. Fuente: 'Politech'.

4.2.2. Bombas dosificadoras de floculante

El equipo escogido es la bomba dosificadora electromecánica de membrana de la serie TM-2-4-6 del fabricante Flygt. Sus características más importantes se exponen en la Tabla 9.

Tabla 9. Características principales de las bombas dosificadoras. Fuente: 'Flygt'.

Parámetro	Valor	Unidad
Caudal	40	L h ⁻¹
Presión	10	bar
Diámetro del pistón	94	mm
Potencia del motor	0,18	kW
Frecuencia	116	pulsos min ⁻¹
Recorrido de carrera	2	mm

Además, estas bombas poseen un cárter de aluminio bañado en aceite. Por tanto, será necesario su cambio de manera anual para garantizar un buen mantenimiento preventivo. Poseen un peso de tan solo 11 kg y una estructura muy compacta (Figura 33).



Figura 33. Bombas dosificadoras de floculante. Fuente: 'Flygt'.

4.2.3. Bomba de alimentación a centrífuga

El equipo escogido para realizar el transporte de los fangos desde el espesador hasta la centrífuga es la 'Bomba de Tornillo excéntrico NEMO con diseño FSIP NM045 BY' del fabricante alemán 'Netzsch'. Se trata de un tipo de bomba específico, el cual permite transportar fluidos con grandes concentraciones de sólidos gracias a un tornillo sin fin que gira dentro de una larga cavidad. El equipo absorbe el fango por la entrada vertical superior y lo impulsa por la tubería horizontal en la que está alojado dicho tornillo (Figura 34).



Figura 34. Bomba de alimentación a centrífuga. Fuente: 'Netzshe'.

A continuación, en la Tabla 10 se enumeran las características más importantes de la bomba requerida. Los materiales de construcción son acero inoxidable para la estructura de la bomba, con un estator que consta de una carcasa reutilizable con un perfil poligonal y el elastómero insertado en ella. Se trata de un equipo muy compacto con la potencia suficiente para cumplir con las necesidades de la ETAP.

Tabla 10. Características principales de la bomba de alimentación a la centrífuga. Fuente: 'Netzshe'.

Parámetro	Valor	Unidad
Caudal máximo	20	m ³ h ⁻¹
Presión máxima	24	bar
Velocidad de giro	550	r.p.m.

4.2.4. Centrífuga

La centrífuga escogida es una 'Andritz Decanter Centrifuge D3', del fabricante Andritz. Se trata de un equipo relativamente pequeño dentro de la gama de centrífugas del mercado. Este modelo se caracteriza por asegurar un mantenimiento más sencillo, sin perder su capacidad de separación de sólidos. Además, tiene protecciones frente al desgaste de partes móviles y alta resistencia a la abrasión por el fango (Figura 35).

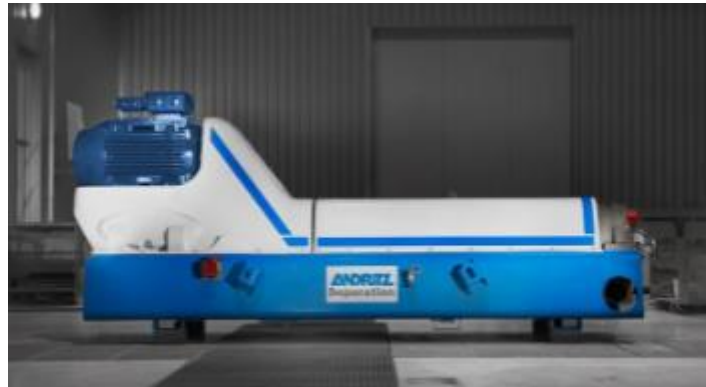


Figura 35. Centrífuga. Fuente: 'Andritz'.

Las características principales del modelo D3 vienen representadas en la Tabla 11. Su elección viene determinada por el caudal que es capaz de tratar, en este caso $20 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, en los periodos que se disponga la deshidratación.

Tabla 11. Características principales de la centrífuga. Fuente: 'Andritz'.

Parámetro	Valor mínimo	Valor máximo	Unidad
Caudal	1	30	$\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$
Capacidad	20	2000	kg h^{-1}
Potencia	10	45	kW

4.2.5. Contenedor

Finalmente, se requiere de un contenedor de almacenamiento para el fango deshidratado. De esta manera, se lleva a cabo la compra de un contenedor con una capacidad de 5 m^3 , igual que el representado en la Figura 36. Se trata de un recipiente compacto, el cual permite almacenar de manera mensual todos los fangos producidos en la ETAP y garantiza que puedan retirarse en camión se manera sencilla una vez llenado, cada mes y medio o dos meses, en función de la capacidad productiva de la ETAP.

Comúnmente, este tipo de activos se alquilan. No obstante, teniendo en cuenta que siempre tiene que haber un contenedor de este tipo y que su retirada es bimensual; a 155 € por contenedor, se amortizaría su compra en menos de dos años ya que su valor unitario de compra es de 998 €.

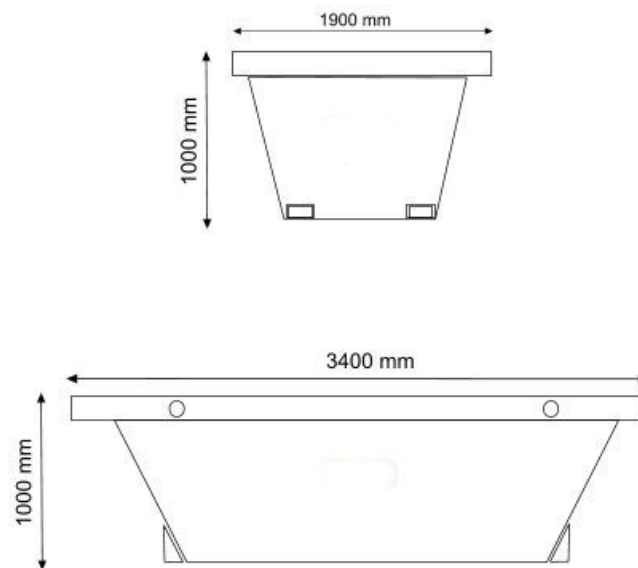


Figura 36. Plano del contenedor de obra escogido. Fuente: 'GRV Ambient'.

5. Presupuesto

A continuación, se detalla el presupuesto relativo al proyecto. Se distinguen claramente dos conceptos, el relativo a los costes materiales y el relativo a los costes de instalación y mantenimiento. Finalmente, se realiza la combinación de todos los costes para dar con el presupuesto total.

5.1. Costes de recursos materiales

En la Tabla 12 se detallan los costes relativos a los recursos materiales requeridos en el proyecto. No se contabilizan los equipos de los cuales ya dispone la ETAP de San Juan.

Tabla 12. Costes de recursos materiales del proyecto.

Concepto	Cantidad	Precio unitario [€]	Total [€]
Centrífuga	1	52.699,76	52.699,76
Bomba de alimentación a centrífuga	1	2.890,93	2.890,93
Bombas dosificadoras de floculante	2	460	920
Preparador de almidón	1	1.358,15	1.358,15
Contenedor de almacenamiento	1	998	998
Tubería de Acero Inoxidable AISI-304	3 m	57,26	172,08
Válvulas y accesorios	-	-	315
Sistemas eléctricos y electrónicos	-	-	250
Precio total			59.603,92

Total del presupuesto de recursos materiales59.603,92 €

5.2. Costes de recursos humanos

En la Tabla 13 se detallan los costes relativos a los recursos humanos empleados durante la instalación y puesta en marcha del equipo. Además, se detalla el coste anual estimado para el mantenimiento del nuevo proceso de recuperación de agua y eliminación de fangos. El concepto “instalación del sistema completo” incluye la construcción del desarenador elemental y la instalación de las conexiones hidráulicas y eléctricas.

Se ha determinado que el coste horario de un operario en nómina de la planta es de 7,2 € (según INE). Se realiza el cálculo de cada concepto teniendo en cuenta que trabajarían dos personas con el número de horas determinadas en la Tabla 13.

Tabla 13. Costes de recursos humanos del proyecto.

Concepto	Tiempo [h]	Coste horario [€/h]	Coste anual [€/h]	Total [€]
Instalación de la centrífuga	20	14,4	-	288
Instalación de preparación y dosificación de floculante	25	14,4	-	360
Instalación del sistema completo	30	14,4	-	432
Mantenimiento	8 h/mes	-	1.382,2	1.382,2
Precio total				2.462,2

Total del presupuesto recursos humanos.....2.462,20 €

5.3. Presupuesto total

Recursos materiales.....59.603,92 €

Recursos humanos.....2.462,20 €

TOTAL.....62.066,12 €

21% I.V.A.....13.033,88 €

PRESUPUESTO TOTAL.....75.100,00 €

Total presupuesto de ejecución del proyecto.....75.100,00 €

6. Conclusiones

A continuación, se comentan todas las conclusiones extraídas de la ejecución del trabajo.

- Se ha llevado a cabo un análisis exhaustivo de la instalación y el funcionamiento actual de la línea de fangos de la ETAP de San Juan, detectándose un área de mejora por parte de la empresa.
- Se han estudiado diversas alternativas de tratamiento de fangos y de gestión de residuos, que pueden ser de aplicación en diferentes plantas de potabilización en función de sus características. El volumen y las características del fango producido, el espacio disponible en la planta y los recursos humanos y económicos disponibles son los criterios que se han valorado a la hora de elegir la mejor alternativa para ejecutar este proyecto.
- Instaurar un subproceso de recuperación de agua dentro del proceso general de la ETAP ofrece apreciables beneficios económicos a largo plazo y medioambientales en todo el rango temporal.
- Se ha elegido de manera cualitativa la deshidratación mediante centrífuga por las siguientes razones principales:
 - Gran eficacia de separación sólido-líquido.
 - Razonables costes de mantenimiento y explotación.
 - Disponibilidad de espacio y distribución en las instalaciones de la ETAP.
- La eficacia de este nuevo proceso de recuperación de agua aumenta aproximadamente un 15 %, de tal manera que se puede aumentar el caudal de tratamiento sin extraer agua en exceso de las captaciones. Actualmente el caudal de agua recuperada es de $23,19 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, mientras que la mejora prevé recuperar $26,75 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.
- A nivel económico, supone una inversión inicial de 75.100 €. Sin embargo, este coste considerable se verá amortizado a largo plazo gracias a la mejora en el sistema de gestión de residuos y a la reducción de las actividades de mantenimiento del proceso.
- El beneficio medioambiental que se produce gracias a la nueva línea de fangos es considerable, debido a la reducción de carga contaminante enviada al colector y a la reutilización del residuo sólido. A pesar de no poseer datos antiguos sobre el % de MS final, el nuevo proceso permite extraer este fango al 18 %, un valor suficientemente alto para asegurar una mejora respecto a la situación actual.

- La gestión de residuos que implica el uso en agricultura de las arenas extraídas es una alternativa con un gran beneficio económico para la explotación, pues elimina directamente los costes de gestión del residuo. Además, se ofrece un gran beneficio al medio ambiente, pues se valoriza un recurso que de cualquier otra manera sería eliminado; bien en un vertedero, bien mediante incineración.

7. Referencias

Enlaces web:

- [1] Andritz. ANDRITZ decanter centrifuge D, a reliable solution with high versatility for a wide range of applications. Disponible en: <https://www.andritz.com/products-en/separation/separation/decanter-centrifuges/decanter-centrifuges>. Última visita: febrero 2022.
- [2] GeoEuskadi Open Data. Límites. Disponible en: <https://www.geo.euskadi.eus/cartografia/DatosDescarga/Limites/>. Última visita: diciembre 2021.
- [3] Ihobe. Proyecto Klimatek 2017-2018. Mapa de existencias de carbono y mapa de textura para los suelos del País Vasco. Disponible en: https://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/lur_carbon/es_def/adjuntos/Mapa_existencias_carbono_Klimatek.pdf. Última visita: diciembre 2021.
- [4] Instituto Nacional de Estadística (INE). Cifras oficiales de población resultantes de la revisión del Padrón municipal a 1 de enero. Disponible en: <https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=2905>. Última visita: diciembre 2021.
- [5] Instituto Nacional de Estadística (INE). Componentes del coste laboral total. Coste laboral por hora efectiva, comunidad autónoma, sectores de actividad. Disponible en: <https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=6062>. Última visita: enero 2022.
- [6] Netzshe. Bombas de tornillo excéntrico NEMO. Disponible en: <https://bombas.netzsch.com/es/productos-accesorios/bombas-de-tornillo-excentrico-nemo/>. Última visita: febrero 2022.
- [7] Politech Equipos y Tecnología. Preparación de Polímeros. Disponible en: <http://www.politech.es/preparacion-de-polimeros/>. Última visita: febrero 2022.
- [8] Tegui Contenedores. Contenedor escombros 5 m³. Disponible en: <http://teguicontenedores.com/es/contenedores-cadenas/contenedor-trapezoidal-5m3-18.html>. Última visita: febrero 2022.
- [9] Tubinox. Productos. Disponible en: <https://www.tubinox.com/productos>. Última visita: febrero 2022.
- [10] Xylem - Flygt. Bomba electromecánica de membrana TM 2-4-6. Disponible en: <https://www.xylem.com/es-es/brands/flygt/flygt-productos/?currentpageid=25266&categoryid=22&page=1&pagesize=96&showcompareoptions=False>. Última visita: febrero 2022.

Libros:

- [1] Degrémont. (1979). 'Manual Técnico del Agua. Cuarta edición española.' Paris: Lavoisier.
- [2] Tejero Monzón, Iñaki. (2004). 'Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Tema 20: Decantadores especiales.'
- [3] Tejero Monzón, Iñaki. (2004). Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Tema 21: Filtración.
- [4] Tejero Monzón, Iñaki. (2004). Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Tema 28: Pretratamiento.
- [5] Tejero Monzón, Iñaki. (2004). Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Tema 33: Tratamiento de fangos.
- [6] Tejero Monzón, Iñaki. (2004). Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Tema 35: Deshidratación y evacuación de fangos.

Normativa consultada:

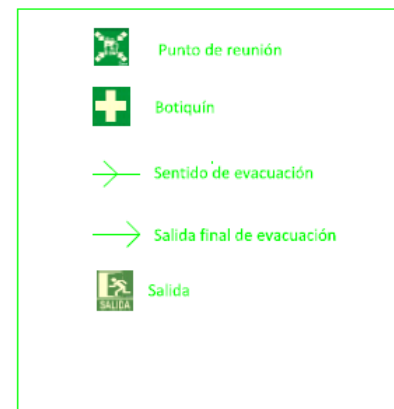
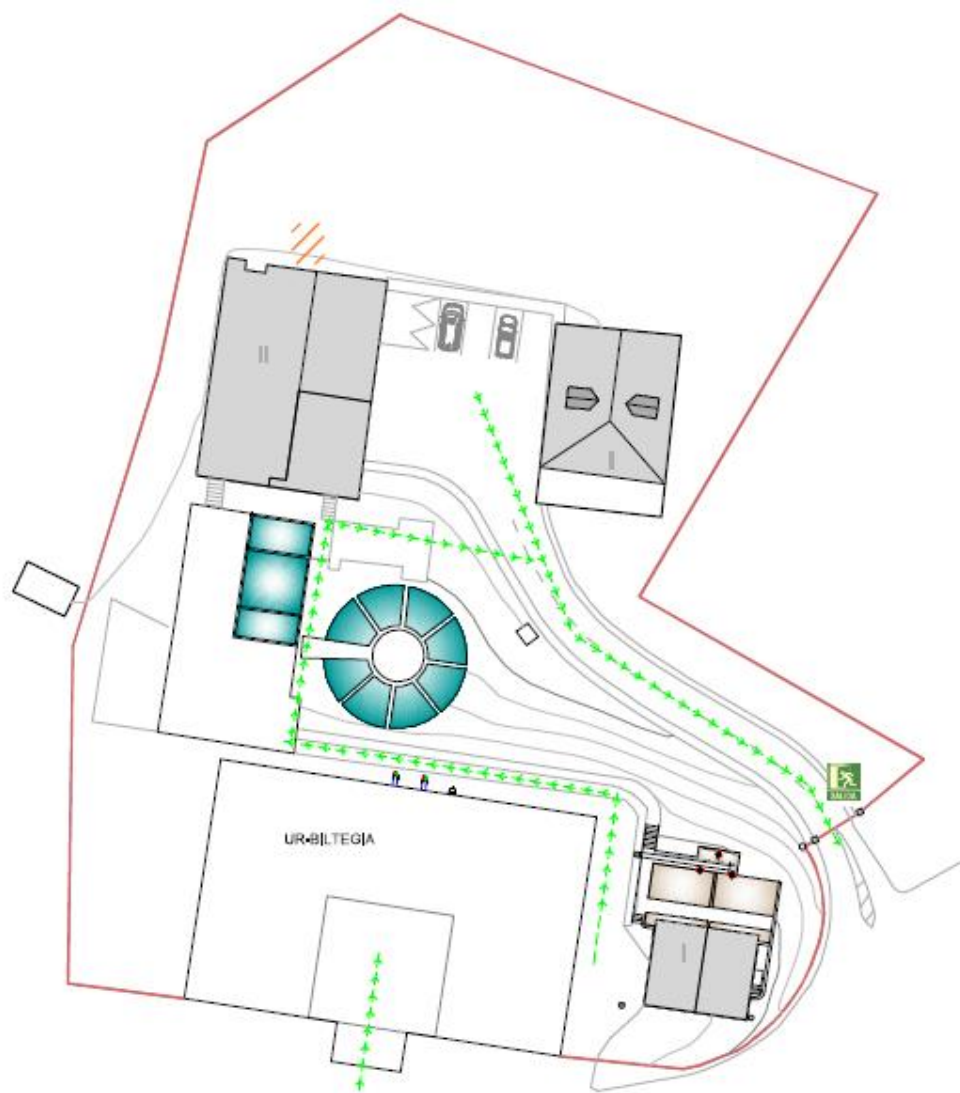
- [1] Directiva de la Unión Europea 2020/2184 del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2020 relativa a la calidad de las aguas destinadas al consumo humano.
- [2] Real Decreto 1310/1990, de 29 de octubre, por el que se regula la utilización de los lodos de depuración en el sector agrario.

Programas informáticos:

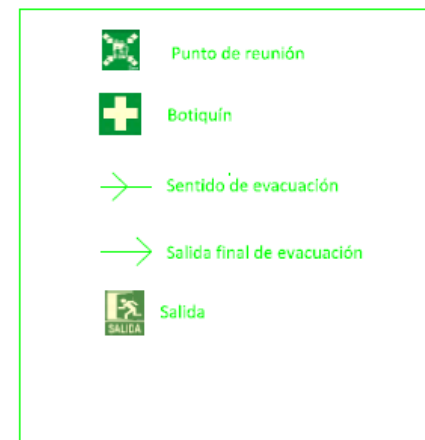
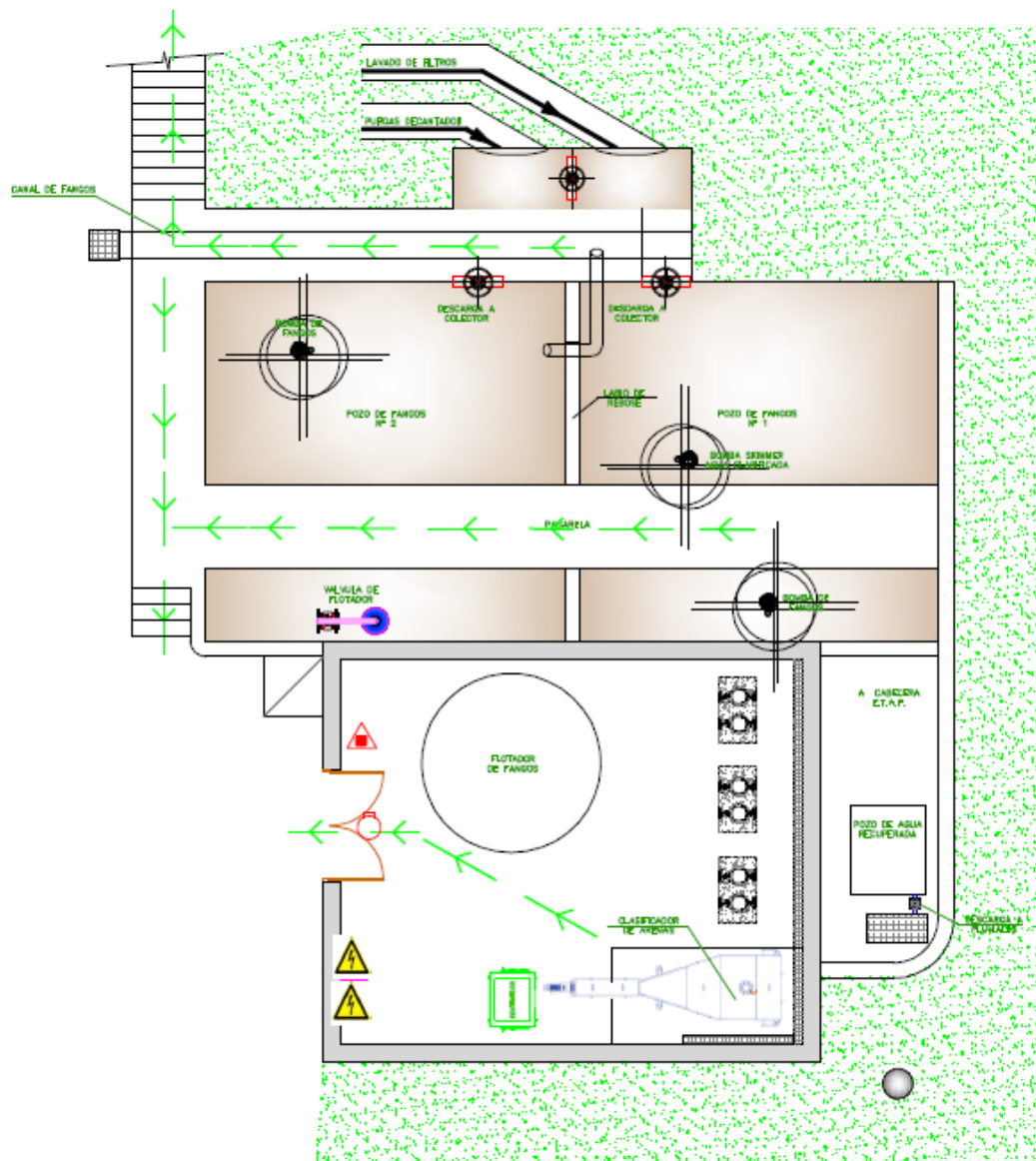
- [1] ArcMap 10.8.1
- [2] Microsoft Office 2016

Anexo: Planos

Plano I: ETAP San Juan



Plano II: Proceso de fangos actual



Plano III: Proceso de fangos propuesto

