



UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA  
DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR DE INGENIEROS  
DE MINAS Y ENERGÍA

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGÍA**

**GRADUADO EN INGENIERÍA DE MINAS  
TECNOLOGÍA MINERA**

**PROYECTO FIN DE GRADO**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y MINERA**

**DISEÑO Y ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE UNA PLANTA DE LAVADO DE ARENAS  
SILÍCEAS PARA LA POTABILIZACIÓN DE AGUA**

**PABLO DEL REY SILVO  
JULIO DE 2025**





UNIVERSIDAD  
POLITÉCNICA  
DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR DE INGENIEROS  
DE MINAS Y ENERGÍA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGÍA

DISEÑO Y ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE UNA PLANTA DE LAVADO DE ARENAS  
SILÍCEAS PARA LA POTABILIZACIÓN DE AGUA

Realizado por  
PABLO DEL REY

Dirigido por  
CARLOS GRIMA OLMEDO – DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y MINERA





## **AGRADECIMIENTOS**

*Quisiera comenzar expresando mi más sincero agradecimiento a mi tutor de proyecto, el Prof. Carlos Grima, cuya experiencia, consejo y apoyo fueron fundamentales para la elaboración de este trabajo. A la empresa Advanced Mineral Processing por acogerme permitiéndome realizar las prácticas curriculares y el trabajo fin de grado con ellos, culminando en un contrato laboral en mi pasión: la minería.*

*A la Universidad Politécnica de Madrid y en particular a la ETSIME por formarme y brindarme la oportunidad de crecer académicamente, permitiéndome convertirme en uno más de esta unida familia minera.*

*A mis amigos y mi hermano por ayudarme a convertirme en la persona que soy, por todo lo que me han enseñado y por su permanente apoyo.*

*A mis padres, en especial, a los cuales les agradezco enormemente su amor incondicional y profunda dedicación. Su constante fe y su ejemplo son los motores que me impulsan a querer ser mejor cada día.*

*Y a ti, Claudia, por iluminarme con tu especial brillo, dejarme ser parte de ti y ser mi fiel compañera de vida.*



# ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS .....	II
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS .....	VIII
ABREVIATURAS .....	X
NOMENCLATURA (UNIDADES) .....	X
SIMBOLOS GRIEGOS .....	XI
RESUMEN.....	XIII
ABSTRACT.....	XIII
DOCUMENTO 1: MEMORIA DESCRIPTIVA.....	1
1. OBJETIVOS .....	2
2. ALCANCE .....	3
3. ANTECEDENTES .....	4
3.1. IMPORTANCIA DEL TRATAMIENTO DE ARENAS EN LA DEPURACIÓN ..	4
3.2. GENERALIDADES .....	5
3.3. CONTEXTO MEDIOAMBIENTAL.....	6
3.4. LEGISLACIÓN APLICABLE AL PROYECTO.....	8
4. ANALISIS DE LA ALIMENTACIÓN.....	8
4.1. ENSAYOS DE LABORATORIO .....	8
4.2. ALIMENTACIÓN FINAL DEL PROCESO.....	12
5. PLANTAS DE TRATAMIENTO .....	12
5.1. INFORMACIÓN GENERAL.....	12
5.2. VÍA HUMEDA VS VIA SECA.....	15
6. DEFINICIÓN DE LOS PROCESOS .....	15
6.1. BALANCE DE LA PLANTA .....	15
6.2. CÁLCULOS DE DIMENSIONAMIENTO .....	16
6.3. FILOSOFÍA DE LA PLANTA.....	17
7. DEFINICIÓN DE LOS EQUIPOS.....	18
7.1. REQUERIMIENTOS GENERALES Y CÁLCULO DE LOS EQUIPOS.....	18
7.2. EQUIPOS ELEGIDOS .....	23
8. INGENIERÍA DE DETALLE.....	29

8.1. SUMINISTRO DEL MATERIAL .....	29
8.2. CARGA DEL MATERIAL .....	30
8.3. RELACIÓN TOLVA - ALIMENTADOR .....	31
8.4. CAJÓN DE REPULPADO Y CRIBA .....	31
8.5. RELACIÓN GRUPOS BOMBEO – BOMBA/MOTOR .....	31
8.6. REJILLA CURVA .....	31
8.7. RELACIÓN TORNILLO/CICLÓN - ESCURRIDOR.....	31
8.8. RELACIÓN TANQUE CLARIFICADOR - BOMBA .....	32
8.9. SUMINISTRO DEL PRODUCTO FINAL .....	32
8.10. SUMINISTRO DE LOS SUBPRODUCTOS.....	32
9. EJECUCIÓN DEL PROYECTO.....	34
9.1. TRANSPORTE .....	34
9.2. OBRA CIVIL .....	34
9.3. MONTAJE .....	36
9.4. PUESTA EN MARCHA DE LA PLANTA .....	37
10. MATRIZ DAFO .....	38
DOCUMENTO 2: ESTUDIO ECONÓMICO.....	41
1. INTRODUCCIÓN.....	42
2. DATOS DE PARTIDA .....	42
2.1. INGENIERÍA.....	43
2.2. DEPARTAMENTO DE PROYECTOS .....	43
2.3. MONTAJE .....	43
2.4. PUESTA EN MARCHA.....	43
2.5. OPERACIÓN DE LA PLANTA .....	43
3. CÁLCULO DE COSTES POR TONELADA TRATADA .....	44
4. CÁLCULO DE LA ENERGÍA Y MEDIDAS DE OPTIMIZACIÓN.....	46
4.1. VARIADORES DE FRECUENCIA (VFD).....	47
4.2. AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL .....	47
4.3. MANTENIMIENTO PREVENTIVO.....	47
4.4. INTEGRACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES.....	47
5. INGRESOS PREVISTOS .....	48
6. FLUJO DE CAJA.....	48
7. INDICADORES ECONÓMICOS.....	49
7.1. PAYBACK.....	49

7.2. WACC.....	49
7.3. TIR.....	50
7.4. VAN.....	50
8. CAPEX vs OPEX.....	50
9. ESCALABILIDAD Y VALOR AÑADIDO SOCIAL.....	51
9.1. INDICADORES MEDIOAMBIENTALES.....	51
9.2. ESCALABILIDAD EN PAISES EN VÍAS DE DESARROLLO.....	52
10. COMPARACIÓN Y CONCLUSIONES.....	53
BIBLIOGRAFÍA.....	56
DOCUMENTO 3: ANEXOS.....	58
ANEXO A: DIAGRAMA DE BLOQUES DE PROCESO.....	59
ANEXO B: DIAGRAMA DE BLOQUES DE EQUIPOS.....	61
ANEXO C: DIAGRAMA DE FLUJO.....	63
ANEXO D: DIAGRAMA DE FLUJO BALANCEADO.....	65
ANEXO E: SISTEMA SCADA DE LA PLANTA.....	67

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1: Proceso de Depuración Agua Potable .....	5
Figura 2: Planta de Tratamiento de Arenas.....	6
Figura 3: Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	7
Figura 4: Curva Granulométrica Material.....	9
Figura 5: Muestra Analizada en el Laboratorio AMP.....	9
Figura 6: Lavadora de Paletas .....	10
Figura 7: Funcionamiento de un Hidrociclón .....	11
Figura 8: Sedimentación de la arena tras los procesos de laboratorio .....	11
Figura 9: Criba Vibrante .....	13
Figura 10: Funcionamiento de los tamaños críticos en la malla .....	14
Figura 11: Materiales Obtenidos en el Proceso .....	17
Figura 12: Dimensionamiento del Acopio de las Cintas Transportadoras.....	18
Figura 13: Curva Característica Bomba.....	20
Figura 14: Tornillo Lavador en Funcionamiento.....	21
Figura 15: Escurridor Vibrante - VibroFlux AMP.....	21
Figura 16: Funcionamiento Interno de un Hidrociclón.....	22
Figura 17: Tolva de Alimentación con Alimentador de Cinta.....	23
Figura 18: Cinta de Alimentación.....	23
Figura 19: Cajón de Repulpado .....	24
Figura 20: Criba Vibrante con 3 niveles .....	24
Figura 21: Grupo de Bombeo + Bomba.....	24
Figura 22: Curva Característica Bomba.....	25
Figura 23: Cinta Transportadora para Acopio .....	25
Figura 24: Rejilla Curva de diseño AMP.....	25
Figura 25: Tornillo Lavador de Arenas.....	26
Figura 26: Escurridor Vibrante .....	26
Figura 27: Grupo de Bombeo de modelo rectangular.....	26
Figura 28: Curva de Trabajo Característica .....	27
Figura 29: Catálogo de Hidrociclones de AMP .....	27
Figura 30: Tanque Clarificador TC07.....	27
Figura 31: Escurridor Vibrante - AMP .....	28
Figura 32: Imagen depósito de agua en la planta.....	28
Figura 33: Bomba de Agua Sumergible.....	28
Figura 34: Boceto Cargas Aproximadas Camiones .....	34
Figura 35: Tolva con hormigón como base estructural.....	35
Figura 36: Muros de Separación para los Acopios .....	35
Figura 37: Paredes Verticales para el Escurridor.....	35
Figura 38: Montaje de las Estructuras mediante grúas .....	36
Figura 39: Montaje de la criba en la estructura.....	37
Figura 40: Puesta en marcha mecánica con agua.....	37
Figura 41: Báscula de pesaje para el monitoreo en cintas transportadoras.....	43
Figura 42: Volquete Minero de la Compañía CAT con Paneles Solares.....	47

Figura 43: Representación Gráfica del OpEx vs CapEx.....	51
--	----

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Matriz DAFO del proyecto .....	38
Tabla 2: Producción de la planta y aspectos económicos iniciales.....	42
Tabla 3: Producción en toneladas del producto .....	44
Tabla 4: Toneladas de subproductos producidas .....	45
Tabla 5: Coste Total.....	46
Tabla 6: Desglose de los Costes.....	46
Tabla 7: Energía y coste energético total .....	47
Tabla 8: Precio de Venta de los Productos y de los Subproductos .....	48
Tabla 9: Flujo de Caja (Neto y Acumulado) Años 1 a 4.....	48
Tabla 10: Flujo de Caja (Neto y Acumulado) Años 5 a 10.....	49
Tabla 11: Datos y Resultados del WACC.....	49
Tabla 12: Cálculo de los costes CapEx vs OpEx del año 1 al 4 .....	51
Tabla 13: Cálculo de los costes CapEx vs OpEx del año 5 al 10 .....	51
Tabla 14: Comparativa de distintos proyectos para el lavado de arenas .....	53



## ABREVIATURAS

AS	Años sucesivos
CT	Criterio de Taggart
H	Hora
P	Potencia instalada
T	Toneladas

## NOMENCLATURA (UNIDADES)

a	Lado de la malla de criba (m)
A	Ancho de los hilos de la malla de criba (m)
$A_{dht}$	Superficie efectiva de deshidratación (m <sup>2</sup> )
$A_{ef}$	Área efectiva de la criba (m <sup>2</sup> )
B	Factor de eficiencia según tipo de material
C	Factor de corrección por inclinación, humedad o tipo de corte
$C_n$	Flujo de caja (€ - €/año)
d	Diámetro medio de partícula (mm)
D	Probabilidad de Paso (%)
$H_{geom}$	Altura geométrica entre la succión y la descarga (m)
$H_{fricción}$	Pérdidas de carga en tuberías, codos, válvulas (m)
$H_{presión}$	Presión requerida aguas arriba o en el equipo receptor (m)
i	Fondos propios (€)
$k_d$	Coefficiente de carga para deshidratación (10 $th \cdot m^2$ para arenas)
m	Masa sólida (kg/h)
$MV_i$	Valor de mercado de los fondos propios en circulación (€)
n	Número entero no negativo
N	Número de recursos de capital o número de periodos
NPV	Valor neto actual (€)
Q	Capacidad de cribado (t/h)
r	Tasa interna de retorno (% -adimensional)
$R_i$	Tasa de retorno requerida para fondos propios (% -adimensional)
t	Tiempo (años)
$t_d$	Tasa de descuento (% -adimensional)
$T_p$	Tiempo de permanencia (h)
V	Volumen útil del tornillo (m <sup>3</sup> )
WACC	Coste medio ponderado del capital (% -adimensional)

## **SIMBOLOS GRIEGOS**

$\rho$	Densidad del líquido (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_a$	Densidad aparente del material (t/m <sup>3</sup> )
$\rho_{s1}$	Densidad del mineral pesado (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{s2}$	Densidad del mineral ligero (kg/m <sup>3</sup> )
$\phi$	Fracción volumétrica de sólidos



## **RESUMEN**

En este proyecto se va a diseñar una planta de tratamiento para arenas procedentes de balsas de lodos de terceros para su vuelta al uso para la depuración de agua. Este estudio abarca los estudios previos de viabilidad hasta el cierre, incluyendo tanto el diseño, la construcción y operación del proceso de lavado de arenas.

Esta arena producida por la planta del proyecto es clave en la depuración del agua por medio de filtros lentos que son los más usados en agua potable. Se emplean también en el tratamiento terciario de aguas residuales y su eficacia y bajo costo los convierten en una de las tecnologías más extendidas en la industria del tratamiento de agua.

El proceso de lavado de arenas consta de etapas claramente diferenciadas como son el lavado de la arena, la clasificación, la eliminación de materia orgánica y la recirculación del agua. Este proyecto trata de manera detallada cada etapa involucrándose y detallando los equipos y las tecnologías necesarias para completar y optimizar el proceso.

Con este proyecto se busca sentar una base escalable a otros contextos, tales como países en vías de desarrollo que busquen tener un suministro de agua potable continuo lo que aseguraría una evolución en su estructura social y en la calidad de vida de las personas.

## **ABSTRACT**

In this project, a treatment plant will be designed for sands originating from third-party sludge ponds to be reused for water purification. This study covers all phases from preliminary feasibility studies to closure, including the design, construction, and operation of the sand washing process.

The sand produced by the project's plant is essential for water purification through slow sand filters, which are the most used in drinking water treatment. They are also employed in the tertiary treatment of wastewater, and their efficiency and low cost make them one of the most widely used technologies in the water treatment industry.

The sand washing process consists of clearly defined stages, including sand washing, classification, removal of organic matter, and water recirculation. This project thoroughly analyses each stage, detailing the equipment and technologies required to complete and optimize the process.

This project aims to establish a scalable foundation applicable to other contexts, such as developing countries seeking a continuous supply of drinking water, which would support progress in their social structure and improve the quality of life of their populations.



# **DOCUMENTO 1: MEMORIA DESCRIPTIVA**

## 1. OBJETIVOS

En este proyecto se diseña una planta de tratamiento de arenas procedentes de balsas de lodos, con el objetivo de obtener un material apto para su utilización en sistemas de depuración de agua. El estudio abarca desde los análisis previos de viabilidad hasta las fases de diseño, construcción, operación y clausura del depósito de residuos.

La instalación se ha dimensionado para una capacidad de producción de 120 toneladas por hora de arena lavada, aunque este dato se desarrolla con mayor detalle en el análisis de viabilidad económica. La calidad y granulometría del producto final son factores clave, ya que condicionan tanto la eficiencia de los sistemas de filtración como la vida útil de los equipos asociados.

El objetivo principal del proyecto es producir arena reciclada lavada, adecuada para su aplicación en filtros lentos de tratamiento de agua.

Como objetivos secundarios, se plantean:

- Alcanzar un modelo de circularidad completa, valorizando los estériles y materiales potencialmente contaminantes como subproductos con valor comercial.
- Diseñar un proceso escalable y transferible a contextos internacionales, especialmente en países en vías de desarrollo, donde el acceso a tecnologías de depuración sostenible es una necesidad urgente.

## 2. ALCANCE

Este proyecto se estructura en varias fases, todas ellas fundamentales para el correcto funcionamiento de la planta de tratamiento. En primer lugar, se realiza un análisis del material a partir de muestras representativas obtenidas en campo, mediante ensayos de laboratorio que permiten determinar su composición, granulometría y contenido en sílice.

En una segunda fase, se aborda el diseño técnico del sistema de lavado de arenas, optimizando los procesos de cribado, lavado y eliminación de impurezas, con el fin de obtener un producto adecuado para su uso en procesos de potabilización de agua.

Finalmente, se desarrolla un estudio de viabilidad económica que proporciona justificación y respaldo financiero al proyecto, evaluando su rentabilidad y sostenibilidad a medio y largo plazo.

Se prestará especial atención al dimensionamiento de los equipos y a la selección de tecnologías apropiadas en cada fase del tratamiento. De este modo, el proyecto se plantea como una guía técnica integral para la planificación, diseño y ejecución de plantas de lavado de arenas silíceas aplicables a contextos diversos, con capacidad de adaptación a diferentes características y necesidades específicas.

### 3. ANTECEDENTES

#### 3.1. IMPORTANCIA DEL TRATAMIENTO DE ARENAS EN LA DEPURACIÓN

El tratamiento de aguas potables y residuales requiere de procesos de filtración para eliminar partículas en suspensión y otras impurezas. Para poder hacer una depuración del agua hasta convertirla en potable ha de pasar por diferentes procesos: [1]

**Captación y Canalización del Agua:** El primer paso es la captación del agua de los procesos industriales o de la recogida de aguas grises de la ciudad como es el caso los clientes de este proyecto.

**Tanques Clarificadores:** Los tanques de clarificadores, en combinación con un equipo de floculación, están especialmente indicados en el tratamiento de vertidos de efluentes, escorrentías y aguas residuales generadas en el lavado de áridos, arenas y minerales.

Estos equipos se basan en la diferencia de densidades como aprovechan de manera muy eficiente los equipos de la empresa Advanced Mineral Processing: “la pulpa de alimentación se conduce inicialmente a un depósito auxiliar solidario al Clarificador HYDROSILT®, donde se elimina el aire y se aporta el floculante necesario para acelerar el efecto de sedimentación. La mezcla de la pulpa / floculante pasa a la zona inferior del tanque clarificador a través de un lecho fluido creado en el fondo por los sólidos sedimentados. El agua clarificada asciende a través del lecho fluido hacia la superficie, siendo evacuada por medio de un canal periférico de rebose. Un sistema de rastras que gira en el fondo del tanque clarificador empuja el lodo sedimentado hacia el cono central de descarga de donde es extraído mediante bombeo.” [2]

**Filtro de Arenas:** A la salida del primer proceso de clarificación se encuentran los filtros de arena. Existen dos tipos de filtros de arena en función de las necesidades de depuración: filtros rápidos y filtros lentos. Existen multitud de diferencias entre ambos tipos de filtros, pero la más interesante para nuestro proyecto es la diferencia de granulometrías de las arenas utilizadas. En los filtros rápidos la arena utilizada tiene una granulometría más gruesa (desde 0,5 mm a 4 mm) para permitir un flujo rápido mientras que en los filtros lentos la granulometría de las arenas utilizadas está comprendida entre los 0,1 mm y los 0,3 mm.

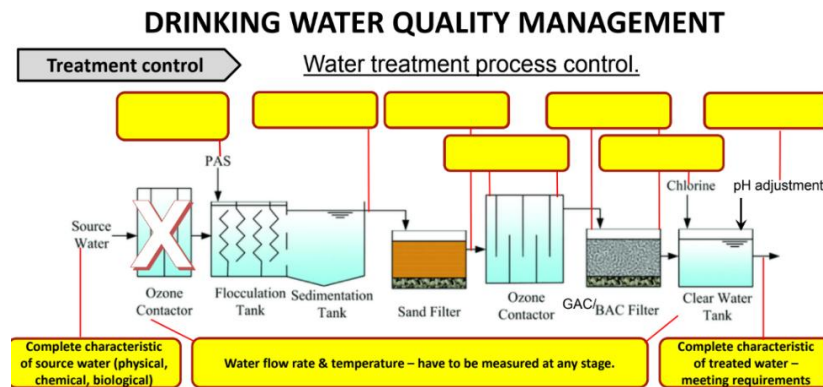
**Procesos Químicos y de Control:** Por último, se realizan multitud de diferentes procesos químicos para la regularización de las propiedades del agua tratada:

**Contacto con Ozono:** Es un proceso en el que el agua entra en contacto con ozono ( $O_3$ ), un gas altamente oxidante utilizado para la desinfección eliminando microorganismos, bacterias y virus. Además, el ozono produce una oxidación de los compuestos orgánicos, reduciendo así la materia orgánica, una eliminación de olores y sabores y una precipitación de metales como el hierro y el manganeso.

**Filtro de Carbón Activo Granular (GAC filter):** Elimina compuestos orgánicos y contaminantes, reduce el cloro y sus derivados ayudando a mejorar el sabor y el olor a su vez que elimina subproductos de la desinfección. Este último aspecto es realmente importante ya que se forman trihalometanos (THM) y ácidos haloacéticos (HAA) al reaccionar el cloro con la materia orgánica. Esto deriva en una mayor calidad de agua pasando así los controles exigidos para el agua potable.

**Filtro de Carbón Activado Biológico (BAC filter):** mezclado o en sustitución con el GAC, combina la adsorción con la biodegradación para un tratamiento enfocado en reducir la materia orgánica que no se puede absorber fácilmente.

Todos los procesos por los que el agua pasa como medio para su potabilización son críticos por lo que se ha de asegurar un correcto uso de los equipos y los recursos los cuales se pueden ver reflejados en la [Figura 1](#).



**FIGURA 1: PROCESO DE DEPURACIÓN AGUA POTABLE**

En los filtros de arena, con el uso, la arena pierde eficacia debido a la acumulación de residuos y debe ser tratada para su futura reincorporación en el sistema. Esto representa un desafío para las plantas de tratamiento, ya que su eliminación suele implicar costos adicionales y puede generar impactos ambientales si no se gestiona correctamente.

Actualmente, y por la conciencia medioambiental que ha cogido la sociedad y las empresas, la idea de simplemente desechar la arena usada y contaminada en balsas de lodo sin tratarla y comprar arena nueva no es una opción. Es por eso por lo que surge la necesidad de las potabilizadoras de tratar la arena usada y separarla de los contaminantes y de la materia orgánica.

En el centro de esa necesidad es de donde nace este proyecto de la construcción de una planta de tratamiento de arena en una ubicación cercana a varias plantas de tratamiento de agua.

### 3.2. GENERALIDADES

La arena usada por las plantas de potabilización se almacena en grandes acopios o balsas de lodos. Es por ello por lo que para el correcto dimensionamiento de la planta de tratamiento se ha tenido que hacer un estudio de las tres plantas de tratamiento próximas al proyecto y que querían tratar sus arenas.

En el pasado las empresas poseedoras de las plantas de potabilización tenían diferentes opciones con la arena procedente de los filtros de arena:

Acopio en balsas de lodos: Simplemente almacenar en balsas de lodos las arenas no útiles para el proceso. Esto tiene multitud de inconvenientes entre los que destaca un desperdicio del material al cual no se le saca ningún beneficio económico ni se vuelve a introducir de ninguna manera en el proceso. Además, esta práctica es insostenible en términos de volumen de estéril generado ya que a medida que las plantas de depuración de agua fuesen procesando litros y litros, las balsas de lodos comenzarían a requerir cada vez más espacio haciendo inservible una extensión muy grande de terreno. Por último y más importante, el impacto medioambiental de esas balsas de lodos es tremenda en términos de sostenibilidad. La idea de utilizar un recurso material, empobrecerlo y contaminarlo y abandonarlo con una degradación de sus propiedades que podrían afectar a flora y fauna no es viable dentro de un marco de conciencia medioambiental.

Comprar los equipos de la planta de tratamiento de arenas: Los equipos que en las siguientes páginas se van a explicar son equipos costosos y poco rentables si la cantidad de arena a tratar no es muy elevada. Además de esto, en el proceso de tratamiento de las arenas se producen subproductos que si no son bien manejados se convierten en estériles y producen los mismos problemas que las arenas del caso 1.

Realizar el proceso de lavado de arenas en plantas de tratamiento más lejanas o móviles: En los términos de los áridos, en el transporte está la clave. El transporte de un árido es lo que diferencia entre si una explotación es rentable o no lo es. Es por ello por lo que tener una planta de tratamiento de esas arenas en una distancia próxima y fácilmente accesible te ofrece muchas ventajas. Algunas de estas ventajas son la rapidez del proceso de tratado de las arenas reduciendo los tiempos, la reducción de costes en el transporte y en el global del tratamiento y la eliminación de la problemática de los subproductos con la posibilidad de la recompra de estos a un menor coste por acuerdos con la planta de tratamiento de las arenas. En cuanto a las plantas de lavado de arenas móviles, tienen una capacidad de tratamiento normalmente insuficiente para una gran empresa de depuración de agua por lo que se necesitarían varias lo que hace que el coste operativo aumente.

La viabilidad económica de las diferentes soluciones se desarrollará más adelante. Pese a esto, si es económica la planta de tratamiento de arena, las plantas de depuración del agua se aprovecharán de un cliente perfecto para sus arenas sucias y un proveedor magnífico de sus requeridas arenas limpias. En la [Figura 2](#) observamos una planta de lavado de arenas en operación y los acopios que esta genera.



[FIGURA 2: PLANTA DE TRATAMIENTO DE ARENAS](#)

### 3.3. CONTEXTO MEDIOAMBIENTAL

El marco medioambiental actual está recogido por desafíos globales como el cambio climático, la escasez de recursos hídricos y la contaminación ambiental. Como mecanismo para marcar unas directrices comunes, en la actualidad se están instaurando muchas organizaciones y regulaciones para tratar de avanzar juntos a un futuro objetivo común.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), reflejados en la [Figura 3](#), son un conjunto de 17 metas globales establecidas por la organización internacional Naciones Unidas (ONU) como parte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Estos objetivos comunes tratan de proveer unas directrices a personas y empresas para alcanzar objetivos comunes globalizados.



FIGURA 3: OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

Para cualquier proyecto actual, es realmente importante ajustarse y alinearse con los ODS buscando tanto el amparo de la organización que los regula como los objetivos que estos tratan de que conseguir. En el proyecto que se desarrolla, los ODS que se trabajan son: [3]

3.3.1. ODS 6 - AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO: El proyecto impacta directamente con el objetivo de garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos. Este objetivo se aborda positivamente ya que el proyecto permite la recuperación y reutilización de las arenas para el filtrado lo que asegura la eficiencia y sostenibilidad del proceso de potabilización. También reduce la contaminación del agua tanto de las plantas beneficiarias de la arena lavada evitando materia orgánica y residuos como del agua de proceso de la planta de lavado de arena. Como valor adicional, esta planta optimiza el consumo de agua en los procesos de lavado de arena mediante circuitos cerrados, reduciendo el desperdicio de recursos hídricos.

3.3.2. ODS 9 - INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA: Este proyecto se basa fundamentalmente en el diseño y la optimización de los equipos y procesos de una planta de tratamiento de arenas por lo que está íntimamente relacionado con el ODS 9. Introducir una tecnología innovadora de clasificación y lavado de arenas, mejorar la infraestructura de tratamiento de agua asegurando procesos más sostenibles y eficientes y fomentar una simbiosis entre el sector industrial y el medioambiental son consecuencias directas de una correcta realización de este proyecto.

3.3.3. ODS 12 - PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES: El proyecto del documento encaja con el objetivo 12 relacionado con garantizar modales de consumo y producción sostenibles. Se abarca de manera directa en esta planta de lavado de arenas fomentando la economía circular al transformar un residuo como es la arena mayor de 4 mm en un producto útil para la construcción. Así mismo, minimiza la generación de residuos evitando que la arena usada termine en balsas de lodos sin tratamiento y promueve el uso eficiente de los materiales desdibujando la línea muy instaurada en la minería entre estéril y mena.

3.3.4. ODS 13 - ACCIÓN POR EL CLIMA: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos es el tema que abarca la ODS 13. La manera en la que este proyecto se involucra con esta acción es múltiple e incluye: disminuir la huella de carbono al reducir la necesidad de extracción de nueva arena, así como su transporte, optimiza los procesos industriales reduciendo el consumo de energía y reduce la contaminación del agua y del suelo evitando la acumulación de arenas contaminadas en vertederos sin el control adecuado.

### 3.4. LEGISLACIÓN APLICABLE AL PROYECTO

En cuanto a la legislación ambiental que regula este proyecto, al ser en un país de la unión europea, se ajusta al marco europeo. Este marco comprende multitud de leyes y regulaciones que fomentan el correcto desarrollo de la industria como:

Ley de Evaluación de Impacto Ambiental: Directiva *2014/52/UE* en la UE. Esta ley obliga a realizar un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) para proyectos industriales y evaluar el impacto de la planta en su entorno antes de la construcción. [4]

Regulaciones sobre el Agua y su Tratamiento. Existen multitudes de normas de Calidad del Agua Potable como la Directiva *2020/2184/UE* que establece los parámetros que debe cumplir el agua tratada. Otra regulación relevante en relación con el agua y su tratamiento es el Reglamento de Vertidos Industriales regido por la Directiva *91/271/CEE*. Esta regula la calidad de los efluentes descargados por la planta en cuerpos de agua o alcantarillado. [5]

Regulaciones sobre Arena para Filtración: comprende dentro la norma *UNE-EN 12904* que define os requisitos de calidad y granulometría de la arena empleada en filtros de tratamiento de agua. En este proyecto en particular, esta norma toma una clara consideración, aunque como se verá en los diagramas de flujo y en los alcances de la planta, la regulación y el control de la arena para cumplir esta normativa es tarea de la empresa de depuración de agua con sus laboratorios independientes para el muestreo. En el siguiente apartado se detallará los ensayos de laboratorio de las muestras y como estas cumplen la normativa. [6]

Normas de Seguridad Industrial y Salud en el Trabajo: dentro de este grupo de normativas y regulaciones existe un gran abanico de leyes, normas y regulaciones que hay que tener en consideración en el ámbito industrial. Algunas de las más relevantes son la directiva *89/391/CEE* sobre Seguridad y Salud en el Trabajo y la normativa *ISO 45001*. [7][8]

Es importante destacar que existen regulaciones de carácter general y regulaciones de carácter específico para cada sector. Es importante cumplir ambos tipos de normativas como se buscaba y se consigue en el proyecto de este documento.

## 4. ANALISIS DE LA ALIMENTACIÓN

### 4.1. ENSAYOS DE LABORATORIO

Para definir el material de entrada procedente de las tres plantas de potabilización de agua, se realizó un muestreo sacado de las balsas de lodos donde se acumulaban las arenas usadas sumado a las procedentes de los filtros de arena. Para cada empresa de tratamiento de aguas se recoge una “*big bag*” (de un peso total de aproximadamente una tonelada) de arena y se le asocia una letra y un color. Tras un estudio de la granulometría presente en las muestras por parte del laboratorio de la empresa Advanced Mineral Processing, se obtiene la curva granulométrica de los diferentes productos como se puede observar en la [Figura 4](#).



PARTICLE SIZE DISTRIBUTION

SIEVES microns	Sample A (Big Bag 1)			Sample B (Big Bag 2)			Sample C (Big Bag 3)		
	% RET.	% ACCRU.	% PASS.	% RET.	% ACCRU.	% PASS.	% RET.	% ACCRU.	% PASS.
50000	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00
25000	10,31	10,31	89,69	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00
18000	2,68	13,00	87,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00
12000	1,14	14,13	85,87	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00
8000	3,06	17,19	82,81	1,36	1,34	98,66	1,88	1,86	98,14
5000	1,78	18,97	81,03	1,05	2,39	97,61	0,83	2,69	97,31
4000	1,05	20,02	79,98	0,58	2,97	97,03	0,36	3,05	96,95
2000	3,61	23,63	76,37	3,33	6,49	93,51	1,39	4,44	95,56
1000	11,89	35,52	64,48	11,84	18,33	81,67	4,18	8,61	91,39
500	29,82	65,34	34,66	34,93	53,26	46,74	23,90	32,52	67,48
250	17,54	82,88	17,12	25,54	78,80	21,20	41,12	73,64	26,36
106	7,30	90,24	9,76	10,00	89,80	11,20	18,78	92,42	7,58
Passing	9,78	100,00	0,00	11,20	100,00	0,00	7,58	100,00	0,00

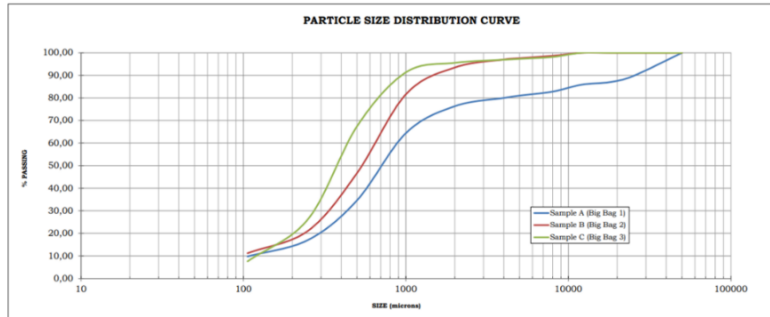


FIGURA 4: CURVA GRANULOMÉTRICA MATERIAL

Después de realizar este estudio granulométrico, se procede a realizar un estudio de la efectividad del lavado con tambor en este tipo de arena concreta. Como se observa en el producto proveniente de las plantas, existen nódulos en el material de alimentación. Para el estudio de estas muestras y como se observa en la Figura 5, AMP realizó una prueba de lavado en tambor resultando una clara influencia del lavado en la obtención de una mejor distribución del tamaño.



FIGURA 5: MUESTRA ANALIZADA EN EL LABORATORIO AMP

La composición de los nódulos es principalmente de material orgánico, arcilla y material fino (< 0,1 mm). La arena (0,1 / 4 mm) representa una pequeña fracción del total de nódulos.

Con base en los resultados de la prueba del tambor de lavado realizada por AMP, la mayoría de los aglomerados orgánicos que acompañan a las arenas valiosas se han desintegrado, pero aún quedan algunos de los que quedan después de la prueba. Se observa claramente que estos nódulos restantes son más pequeños que al comienzo de la prueba.

Las conclusiones después de ejecutar estas pruebas son que el trabajo principal realizado por el tambor de lavado no está relacionado con el lavado de arenas y granos, sino que se centró en desaglomerar los nódulos orgánicos, causando la dispersión de este tipo de material en tamaños más pequeños, que ahora tienen el tamaño equivalente a las arenas objetivo. Esto representa un efecto indeseable para las etapas posteriores, el rendimiento de todo el proceso y para la calidad del producto final requerido.

Por todas estas razones, el tambor de lavado no se incluye en el proceso, ya que su implementación aumentaría la cantidad de materia orgánica en las siguientes etapas, lo que podría comprometer la calidad del material debido a la posible presencia de estos nódulos en el material objetivo (0,1 - 4 mm).

También se estudió la posibilidad de implementar un lavador de paletas de diseño similar a la presente en la [Figura 6](#), pero en este caso, el efecto mencionado de rotura, división y dispersión del material orgánico sería incluso peor que el del uso de un tambor de lavado, debido a la mayor energía agresiva con la que trabajan los lavadores de troncos, pero los resultados en términos de lavabilidad no mejorarán. Por todo lo anterior, AMP desaconseja el uso de una lavadora de paletas para este tipo de aplicación ya que se considera sobredimensionada para el objetivo y su gran desembolso lo convertiría en un proyecto poco escalable.



**FIGURA 6: LAVADORA DE PALETAS**

Con base en la alta calidad requerida para las arenas finales producidas, se ha diseñado y estudiado una doble etapa de proceso para garantizar la máxima limpieza del producto final. Durante la separación de las arenas de alimentación de 0 - 4 mm en dos tamaños diferentes: 0 - 1 mm y 1 - 4 mm, cada fracción seguirá dos procesos diferentes para aumentar considerablemente su rendimiento de lavado.

Estas dos fracciones se unirán posteriormente para llevar a cabo la etapa final de lavado, clasificación y separación. Dado que la mayoría de los nódulos y partículas orgánicas permanecen por encima del tamaño intermedio de 1 - 4 mm, y algunas de ellas están parcialmente adheridas a los granos, esta fracción se someterá a un proceso previo de atrición de intensidad media, en el que se eliminará la mayor parte de la materia orgánica y se producirá simultáneamente un efecto de lavado. En la etapa final del proceso, ambas fracciones, 0 - 1 y 1 - 4 mm, se unirán para afrontar conjuntamente la última etapa de lavado, clasificación y separación.

La última etapa del proceso está concebida y estudiada para lograr el lavado final y la limpieza completa de las arenas objetivo (0 - 4 mm).

Este módulo final consta de una etapa de proceso que utiliza un hidrociclón AMP (Hydrovortex®) en la cabecera de la etapa de proceso para lograr dos efectos principales:

Eliminación de material < 0,1 mm (principalmente finos y arcillas indeseables) junto con material ligero (orgánicos) y un proceso de atrición de intensidad media para liberar los orgánicos adheridos a los granos finos mediante el proceso físico mostrado en la [Figura 7](#).

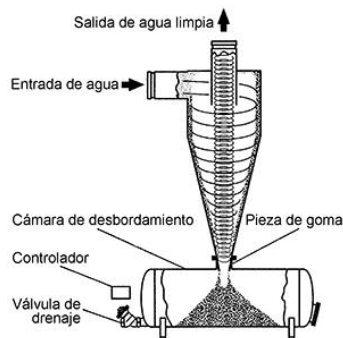


FIGURA 7: FUNCIONAMIENTO DE UN HIDROCICLÓN

Como resultado de estos ensayos de laboratorio y utilizando una planta piloto para comprobar la fiabilidad del proyecto, se ha conseguido un producto principal buscado (arena 0-4 mm lavada) de una calidad realmente alta y con un porcentaje de desclasificados muy bajos como se puede intuir observando la Figura 8.



FIGURA 8: SEDIMENTACIÓN DE LA ARENA TRAS LOS PROCESOS DE LABORATORIO

Este producto preliminar cumple las especificaciones requeridas y provee de un valor añadido al material.

En relación con la norma UNE-EN 12904:2006 a continuación, se detallan los principales parámetros exigidos por la norma, así como su comparación con los resultados obtenidos:

1. Granulometría: La arena debe presentar un intervalo granulométrico comprendido entre 0,4 mm y 2,5 mm, con una uniformidad inferior a 1,6. El resultado del laboratorio muestra que la fracción obtenida tras el tratamiento cumple con el intervalo exigido. La curva granulométrica muestra una distribución controlada, con uniformidad en torno a 1,3.
2. Contenido de finos (< 0,1 mm): El contenido de finos según normativa debe ser inferior al 1 % en masa y en el laboratorio se obtiene una próxima al 0,3 %.
3. Dureza (resistencia a la rotura): La arena debe presentar una alta dureza para evitar su descomposición en el medio filtrante, generalmente una sílice con dureza superior a 6 en la escala de Mohs. Esta arena cumple ya que presenta una composición silíceica predominante (>95 %) por lo que es adecuada mecánicamente para el uso prolongado en filtros.
4. Contenido en materia orgánica: El contenido orgánico debe ser inferior al 0,5 % en masa. Tras el lavado el contenido de materia orgánica en la fracción final de arena es inferior al 0,2 %, dentro de los límites normativos.

5. Impurezas solubles y contaminantes: No debe haber contaminantes que puedan alterar la calidad del agua tratada. Se controla el contenido en hierro, manganeso y otros elementos solubles. En los resultados del laboratorio no se detectan impurezas solubles relevantes ni metales pesados en concentraciones superiores a los límites establecidos.

Por tanto, la arena es apta para su uso como medio filtrante en sistemas de tratamiento de agua potable.

## 4.2. ALIMENTACIÓN FINAL DEL PROCESO

Como se ha observado en los ensayos de laboratorio, el producto de las tres plantas es sobradamente similar. Para el dimensionamiento de los equipos de la planta se plantea un abanico de toneladas por hora para un mínimo que será la suma de las toneladas recibidas a tratar por las plantas y para un máximo que pueda abarcar nuevos clientes sin perder eficiencia ni sobredimensionar los equipos demasiado. Para solucionar ese balance, lo primero es coger los resultados de laboratorio para definir la curva granulométrica con la que trabajar para el dimensionamiento.

Con dicha curva granulométrica, se define el material de entrada a grandes rasgos como:

1. Una cantidad despreciable de mayores de 100 mm. Se realizará un cribado de seguridad aun así para evitar intrusiones de desclasificados de las balsas de lodos.
2. 3 % de un material mayor de 4 mm.
3. 83 % de un material entre 0,1 y 4 mm (futura arena lavada para filtros de arena).
4. 8 % toneladas de un material menor de 0,1 mm.
5. 6 % de materia orgánica.

La cantidad de toneladas por hora se dividen en tres ya que se contemplan tres clientes:

Cliente A: 65 t/h con posibilidad de incrementar la producción en 5 toneladas / hora en picos de trabajo.

Cliente B: 35 t/h.

Cliente C: 15 t/h de un producto con un porcentaje de agua ligeramente menor. El proceso hay que diseñarlo con cajones de repulpado para conseguir un producto uniforme en cuanto a su concentración de agua.

Estudiando el mercado de los alrededores, se ha calculado un tonelaje por hora derivada de esos potenciales clientes. Aunque se ha supuesto un tonelaje por hora de 120, la capacidad nominal de la planta es de 140 t/h. Se ha estudiado la posibilidad de añadir adiciones de equipos a la planta que por un coste reducido aumentaría la capacidad a unas 160 t/h, aunque esta ampliación solo se estudiaría si se introduce un nuevo cliente con un tonelaje / hora mayor de 20.

## 5. PLANTAS DE TRATAMIENTO

### 5.1. INFORMACIÓN GENERAL

A modo de introducción para las plantas de tratamiento empezaremos por comentar su definición. Una planta de tratamiento es un conjunto de equipos y accesorios dispuestos armónicamente para realizar las operaciones unitarias que requiere el proceso entre las que se encuentra la liberación, la separación o concentración y el acondicionamiento de los productos.

Son multitud las técnicas provenientes de la mineralurgia que se usan en las plantas de tratamiento, pero en nuestro proyecto en concreto encontraremos las siguientes:

### 5.1.1. CRIBADO

Proceso mediante el cual se utiliza un obstáculo físico para permitir o impedir el paso de las partículas. Esta técnica a nivel industrial ha de ser económica, continua y por lo anterior imperfecta. Los principales problemas del cribado es el cegamiento de los orificios y los conocidos desclasificados.

En el cribado influyen múltiples factores entre los que destacan la inclinación de la superficie cribante, la probabilidad de paso, la vibración y la humedad a efectos generales.

En cuanto a la superficie cribante se busca que esta tenga una inclinación determinada con múltiples objetivos entre los que destacan aumentar el tiempo de residencia de los materiales asegurando un mejor cribado, reducir la cantidad de desclasificados (íntimamente ligada con la probabilidad de paso) y reducen la energía necesaria por el uso de la fuerza de la gravedad. Este proceso de cribado queda patente en cribas como la de la [Figura 9](#).

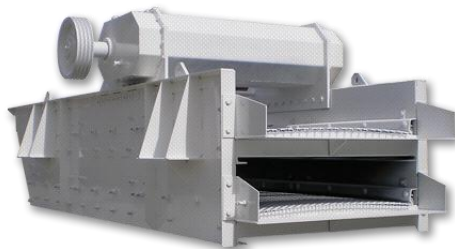


FIGURA 9: CRIBA VIBRANTE

Por otro lado, la probabilidad de paso es el factor más relevante en el diseño de las cribas. Para el cálculo de dicha probabilidad se requiere el uso de teorías como la de la probabilística del cribado. Se considera una malla de criba cuadrada de lado “A” construida con hilos de un ancho “a” estudiando así la probabilidad de paso de una partícula de diámetro medio “d”. La probabilidad de paso de una partícula D viene dada por la [Ecuación 1](#).

$$D = \frac{(A - a)^2}{A^2} \quad (1)$$

De esta probabilidad de paso nace el concepto de tamaños críticos. Se considera tamaños críticos a aquellas dimensiones del material que es más probable que provoque atascos en la malla llegando a cegarla. Dentro de este concepto se puede hacer una clara distinción en función de su tamaño:

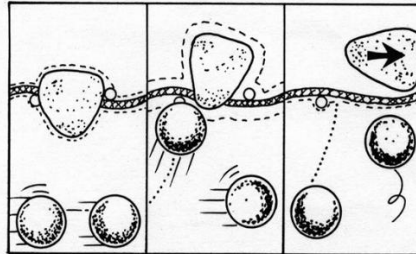
**Tamaños No Críticos:** Los tamaños no críticos son aquellos que no suponen un riesgo de atranque ni de cegado en el cribado. Consideramos estos tamaños como menores de 0.5 A.

**Tamaños Críticos Inferiores:** Los tamaños críticos inferiores son aquellos comprendidos entre 0.5 A y A. Estos cuentan con una menor probabilidad de paso y pueden provocar atascos y cegamiento de mallas.

**Tamaños Críticos Superiores:** Los tamaños comprendidos entre A y 1.5 A se consideran críticos superiores y provocan acuñaamiento y ciegan las mallas. Para evitar estos desclasificados, se realizan procesos previos de cribado y cribados de seguridad.

Los tamaños más preocupantes para una planta de tratamiento son los tamaños críticos inferiores ya que son más complicados de separar de los no críticos y pueden provocar atascos. Para luchar contra estos tamaños hay muchas medidas que se pueden usar como el riego, el material de la superficie cribante y la vibración.

Esta última es la encargada de dar nuevas oportunidades de paso a los granos al levantarlos y volverlos a dejar caer sobre la malla como refleja la [Figura 10](#). La vibración debe ser adecuada al tamaño usando para tamaños grandes gran amplitud y baja frecuencia y para tamaños pequeños una baja amplitud y gran frecuencia.



**FIGURA 10: FUNCIONAMIENTO DE LOS TAMAÑOS CRÍTICOS EN LA MALLA**

La humedad no controlada aglomera los granos, especialmente los finos, y más si hay arcillas en el producto. Para la lucha contra la humedad existen múltiples técnicas entre las que destaca el secado (sobre todo si el proceso de tratamiento va a ser en vía seca), el regado con agua a presión (barato y recomendado para procesos en vía húmeda), mallas alargadas y disparos de aire comprimido. Los dos primeros son los más extendidos, aunque cada uno tiene una mejor aplicación en función de la vía en la que se desarrolle la posterior planta.

#### 5.1.2. CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA

Los métodos de concentración gravimétrica separan minerales de diferente densidad relativa, a partir del movimiento que experimentan por aplicación de la fuerza de la gravedad y la fuerza aplicada por un fluido como el agua o el aire.

Este proceso físico se basa en las distintas trayectorias de las partículas minerales sumergidas en un fluido de un régimen determinado, según sea su masa, volumen y forma. Los fluidos pueden ser el aire, el agua y los medios densos.

El criterio de Taggart de la [Ecuación 2](#) es aplicable a fluidos en los que no se incluyen los medios densos ni los regímenes turbulentos apto para la determinación de la separabilidad de dos minerales.

$$CT = \frac{\rho_{s1} - \rho}{\rho_{s2} - \rho} \quad ( 2 )$$

Bajo dicho criterio los resultados de T se interpretan por rangos en el que los mayores o iguales a 2,50 implican una separación fácil. Si T se encuentra entre 2,50 y 1,50 se considera una separación posible si el d es mayor o igual a 0,2 mm y en el rango de 1,50 a 1,25 se considera posible una separación si d es mayor o igual de 1,65 mm. En el caso más desfavorable para la separación se encuentran los valores de T menores de 1,25 en el que concluimos una separación imposible.

Observando esta fórmula se puede deducir entonces que la densidad relativa entre minerales es menor en el aire que en el agua. Esto supone una clara desventaja del aire con respecto al agua para la separación gravimétrica debido a la dificultad de separar los distintos materiales.

En cuanto a los medios densos, esta fórmula no aplica ya que en el denominador quedaría un valor negativo lo que no aplicaría para los rangos establecidos del valor A. En cuanto a estos fluidos especiales, se suelen usar para separar gravimétricamente minerales de una densidad parecida buscando como medio un fluido de una densidad intermedia entre los dos. Esto provoca, sumado a ciclones o sacudidas del material, que el más denso caiga al fondo por diferencia de densidad y el más ligero flote pudiendo extraerlo de una manera más sencilla.

Teniendo en cuenta todos estos factores el fluido que tendría más rendimiento serían los medios densos pero debido a su mayor coste y su dificultad práctica el más extendido es el agua como fluido de separación gravimétrica.

## 5.2. VÍA HUMEDA VS VIA SECA

Existen dos maneras de diseñar una planta de tratamiento en función del fluido mayoritario con el que trabajan: vía seca y vía húmeda. En las plantas de vía húmeda, como su propio nombre indica, se trabaja con fluidos húmedos que generalmente es el agua. Este tipo de procesamiento permite aumentar el rendimiento de la planta y aumentar la calidad de la clasificación mientras que la vía seca es más económica y sirven para procesamientos que no requieren excesiva calidad. [9]

Es por ello por lo que para el procesado de minerales de media y alta valía se usa siempre la clasificación por vía húmeda si no todo el proceso en vía húmeda. En áridos o materiales con un menor precio euro por tonelada, depende de la calidad que se requiera, aunque cada vez más se opta por vías húmedas por la facilidad de tratar los lodos y un mercado cada vez más exigente.

Como más adelante se explicará, el material viene con una concentración muy alta (lo que significa un porcentaje de agua bajo) y se usan cajones de repulpado para darle la concentración buscada al lodo. En este proyecto en específico no tendría sentido un sobre coste por el secado del material inicial cuando se consigue una mejor selección en vía húmeda con los equipos que se ha dimensionado. Por todo ello se ha elegido en el presente proyecto un proceso por vía húmeda utilizando cajones de repulpado para acondicionar el material inicial con una concentración apta.

## 6. DEFINICIÓN DE LOS PROCESOS

### 6.1. BALANCE DE LA PLANTA

Una vez se definen los requerimientos de los productos de salida ([mostrado en apartado 2.2.](#)) se puede realizar un correcto dimensionamiento de la planta para estudiar los equipos que se ajusten a esas necesidades.

Hay que aclarar primero que el cálculo de balance es algo teórico, con un rendimiento simulado. Para acercarnos teóricamente a esos rendimientos que se producen en la realidad, utilizamos diversos métodos y técnicas como:

Casos Anteriores: Es muy importante contar con un bagaje de casos realizados en el pasado y estudiados una vez han sido puestos en marcha. En este proyecto se cuenta con el asesoramiento y el trasfondo de casos históricos de la empresa Advanced Mineral Processing lo que facilita una ejecución que se ajuste en la mayor medida posible a la realidad. Como demostración de la aplicación concreta de estos conocimientos adquiridos podemos por ejemplo destacar que cuando se obtiene la curva teórica de la bomba, para comprobar si nos vale para nuestro caso de bombeo, se multiplica por un factor de 1,15 y otro factor de seguridad la potencia teórica de la bomba. Con estos factores de multiplicación se calcula la potencia necesaria que debe tener el motor de la bomba para levantar el caudal requerido.

Ensayos de laboratorio y plantas piloto: Para acercarnos lo más posible a la realidad cuando realizamos el dimensionamiento de la futura planta es aconsejable realizar tanto ensayos de laboratorio como estudios en plantas piloto. En cuanto a los ensayos de laboratorio, estos nos permiten conocer fundamentalmente factores propios del material a tratar. Por otra parte, las plantas piloto nos permiten simular el desempeño del material sometido a los procesos en una escala menor y controlada, pudiendo variar las condiciones y los factores externos para ver cómo se comporta. En el presente proyecto se estudian diferentes propiedades esenciales como la granulometría o la

mineralurgia del material mediante ensayos de laboratorio y la lavabilidad o el rozamiento entre granos mediante plantas piloto.

Conocimiento de los equipos: Para el correcto dimensionamiento de las plantas es fundamental conocer las características de los equipos. Para ello se conocen las especificaciones técnicas, la funcionalidad que pueden ofrecer y cómo se comportan con otros equipos. Para dar soluciones integrales de un proceso es vital conocer las distintas relaciones que pueden realizar los equipos en sintonía, así como los puntos débiles de cada máquina.

Cabe destacar que estos son solo algunos aspectos para el dimensionamiento y que conocer un amplio abanico de ellos es lo que permite a un proyecto teórico asemejarse en mayor medida a la realidad.

## 6.2. CÁLCULOS DE DIMENSIONAMIENTO

Es realmente importante empezar por definir los procesos y continuar por definir los equipos y no al revés. Aunque puede parecer un proceso lógico se ha de entender que la secuencia de pensamiento para la resolución de un problema ha de ser: 1) plantear el problema y acotarlo, 2) definir la solución al problema y 3) elegir las técnicas y herramientas que se van a usar para darle solución. En el caso de una planta de tratamiento como puede ser la presente, debemos comenzar determinando el problema y las características de este y por eso se realizan ensayos de laboratorio iniciales. Posteriormente se define lo que se quiere realizar con ese problema y como lo vamos a convertir en soluciones determinando los procesos por lo que queremos pasar. Por último, se deben definir cómo darles soporte a esas soluciones y como realizarlas eligiendo los equipos y herramientas que nos van a permitir realizarlo.

Para comenzar el cálculo del dimensionamiento, el primer paso es esbozar una primera versión del diagrama de bloques del proceso ([mostrado en Anexo A](#)). Este diagrama de bloques nos permite reconocer de manera visual los principales procesos que se requieren en la planta, así como darles una primera linealidad y secuenciación entre ellos. En este caso se quiere eliminar la materia orgánica y realizarles un lavado a las arenas por lo que se plantea un primer proceso de clasificación acompañado de un lavado inicial de gruesos. Posteriormente se diseña una etapa de lavado de finos en la que se podrá eliminar la parte de materia orgánica para finalmente pasar a una etapa de recuperación del agua en la que se hundan los finos. Con esa agua recuperada, se procede a la recirculación para consumir menos cantidad de agua fresca.

A raíz de este diagrama de bloques del proceso se realiza un diagrama de bloques de equipos ([mostrado en Anexo B](#)) que pueden ser requeridos para empezar a trabajar en el dimensionamiento de los equipos. Este proceso es un paso previo al diagrama de flujo y se diferencia en que es una primera estimación a grandes rasgos de los equipos que se piensan incluir para dar solución a las necesidades.

Una vez definidos los procesos y un boceto de los equipos, se continua con el diagrama de flujo ([mostrado en Anexo C](#)).

Un diagrama de flujo es un conjunto de representaciones que describe un proceso o sistema. Se usan ampliamente en múltiples campos para documentar, planificar, estudiar y comunicar procesos que pueden resultar complejos. En minería su uso es altamente extendido ya que se puede agrupar de una manera muy visual los procesos de la mina o de la planta de tratamiento permitiendo que de un rápido vistazo personas familiarizadas reconozcan a grandes rasgos la filosofía de la planta.

Una vez se tiene esa versión inicial del diagrama de flujo se pasa a balancearlo con las restricciones del problema a solucionar ([mostrado en Anexo D](#)). Ese balanceo se basa en un estudio de la función cada tipo de equipo, la capacidad que pueden/van a tratar y la concentración o caudal que requieren. Todo esto sumado a estimaciones teóricas como que el hundido de un escurridor es el 10% del rebose en caudal. Una vez se tiene la parte seca de la planta balanceada, se pasa a la parte húmeda teniendo en cuenta las concentraciones requeridas de cada equipo y la concentración de los lodos/acopios finales.

Cuando se dimensiona y balancea correctamente la primera versión del proceso (que puede y suele sufrir modificaciones) se pasa a determinar el equipo en concreto que se necesita para cumplir con las especificaciones y los requerimientos.

### 6.3. FILOSOFÍA DE LA PLANTA

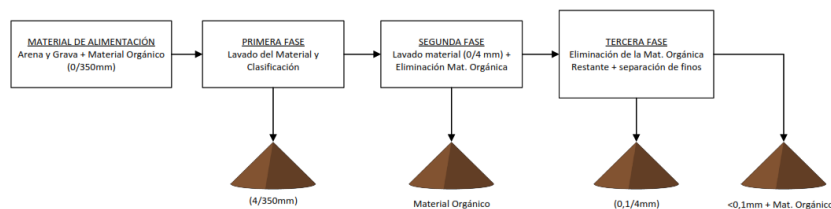
Con filosofía de la planta nos referimos a las diferentes etapas que intervienen en el proceso y que se obtiene de cada etapa. Generalmente, el diagrama de bloques de la planta ([mostrado en Anexo A](#)) es una representación gráfica de la filosofía de la planta.

Dicho esto, el proceso completo consta de tres etapas diferentes como se indica a continuación:

La primera fase del proceso, identificada en el diagrama de flujo con el prefijo 10, se centra en la alimentación del sistema, el lavado del material y su clasificación. En esta etapa se elimina de las siguientes fases el material con un tamaño superior a 4 mm. Por tanto, una vez clasificado, el material inferior a 4 mm continúa hacia la siguiente etapa del proceso, mientras que el superior a 4 mm se almacena.

La segunda fase del proceso recibe el material menor de 4 mm y su tarea es eliminar el material menor de 0,1 mm y el material orgánico. Esta fase se divide en dos etapas, según el comportamiento del material en el laboratorio AMP con una primera etapa cuyo objetivo es eliminar el material orgánico mayor de 1 mm y una segunda etapa para eliminar el material orgánico restante y el material fino (menores de 0,1 mm).

La tercera fase del proceso se refiere al tratamiento y suministro de agua para el proceso. Mediante un proceso compuesto por un tanque clarificador, un depósito de agua y una bomba se buscará la recirculación del agua para reducir la cantidad de agua dulce en el proceso. Esta agua de recirculación se añadirá únicamente en la primera fase del proceso. Todos los procesos por los que se someterá el material para su lavado se pueden ver representados en la [Figura 11](#) de una manera visual y lineal.



**FIGURA 11: MATERIALES OBTENIDOS EN EL PROCESO**

Como apunte en relación con el agua dulce se añadirá para garantizar la alta calidad de la arena requerida. Esta agua se incluirá en el proceso en la primera fase (si no llega con la obtenida de la recirculación) y en la segunda fase del proceso para garantizar que la arena, que se depositará en los estanques para filtrar el agua potable, se haya lavado y se haya tratado con agua dulce en la última fase del proceso.

## 7. DEFINICIÓN DE LOS EQUIPOS

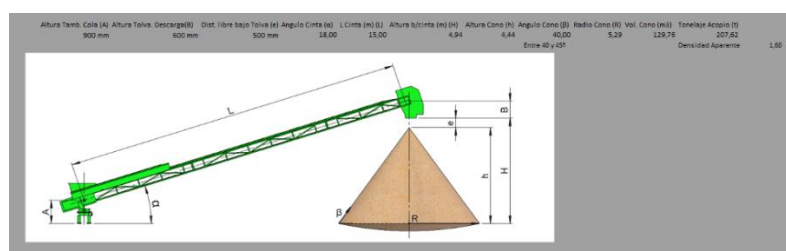
### 7.1. REQUERIMIENTOS GENERALES Y CÁLCULO DE LOS EQUIPOS

Cuando la etapa de definición de los procesos tiene su primera versión realizada, es momento de profundizar en los requerimientos generales de los equipos individuales. Un error común que se puede arrastrar hasta esta etapa es la incorrecta elección por haber entendido cada equipo como un elemento aislado y no parte de un conjunto. Por ejemplo, cuando se dimensiona la cuba que se sitúa debajo de un escurridor el tamaño del escurridor va dimensionado por muchos factores entre los que destaca el caudal de alimentación. La cuba que se sitúa debajo para recoger el pasante del escurridor no se dimensiona por el caudal (que será una comprobación solamente) sino por la superficie del escurridor. Si la cuba fuese de menor superficie, parte del material saldría de la cuba y se desperdiciaría toda esa cantidad de caudal. Como este ejemplo en concreto, hay muchos más por lo que más importante que conocer las excepciones es conocer la manera de entender el dimensionamiento.

En este proyecto se diseña la planta para una alimentación habitual de 120 t/h, con capacidad estructural para admitir hasta 140 t/h sin modificaciones de diseño de los equipos individuales. Además, se contempla la posibilidad de alcanzar una producción de 160 t/h de arenas lavadas mediante ajustes en equipos específicos. Habiendo aclarado que hay que entender la planta como un todo que contiene componentes y la alimentación con la que se diseña, es importante definir los requerimientos generales de cada equipo:

**TOLVA DE ALIMENTACIÓN:** La tolva de alimentación, que en este proyecto tiene una función de cribado de seguridad, además, debe tener una superficie de cribado suficiente para abarcar el tonelaje por hora dado. Para el presente proyecto, una superficie rectangular de unos 5 metros por 2 metros es suficientes para tratar el tonelaje. En este caso se utiliza esta primera tolva para alimentar la planta y para realizar un cribado de seguridad previo que separará bolos y elementos intrusos como metálicos y plásticos. Para un correcto dimensionamiento de esta primera criba de seguridad se ha de colocar una rejilla que permita el paso del 100 % del producto eliminando estos bolos minoritarios. Además, cuando hablamos de tolvas, es necesario dimensionar el equipo para que el material deslice por sus paredes correctamente y para que no se provoque en su interior un estrechamiento del flujo.

**CINTAS DE ALIMENTACIÓN:** en cuanto al transporte del material se puede optar por tuberías y canaletas o por cintas de alimentación. La elección de uno u otro método depende fundamentalmente de la concentración que tenga el producto final ya que si este es muy líquido no puede ser transportado por cintas. En el presente caso se colocan dos cintas de transporte, como luego se verá, y una cinta de alimentación. A efectos prácticos de funcionamiento son iguales destacando diferencias constructivas y de dimensionamiento únicamente. Las cintas transportadoras se usan para realizar acopios de material tratado y el tamaño de dicho acopio hay que calcularlo como mostrado en la [Figura 12](#).



**FIGURA 12: DIMENSIONAMIENTO DEL ACOPIO DE LAS CINTAS TRANSPORTADORAS**

Mediante el uso del software “Excel” se realiza una hoja de cálculo para el cálculo de las dimensiones del acopio final. Posteriormente se realiza un sobredimensionamiento de este por seguridad.

**CAJÓN DE REPULPADO:** El cajón de repulpado no se considera un equipo propio porque suele ir acompañando a un escurridor o una cuba, pero en el presente proyecto si se encuentra de manera independiente. El cajón de repulpado tiene el objetivo que es acondicionar el material a una concentración requerida que normalmente es menor que con la que entraba. Para esto se añade agua (normalmente procedente de recirculación) y se agita con el suficiente vigor como para integrarlo en un todo. El tamaño del cajón de repulpado (medido en litros) depende directamente de la cantidad de material a tratar y de la concentración que se busque.

**CRIBA VIBRANTE:** Las cribas son responsables de separar las fracciones granulométricas según el tamaño de partícula. En este proyecto se emplean para separar las arenas por debajo y por encima de 4 mm, además de realizar un primer desbaste de partículas no deseadas. Para el dimensionamiento de esta criba se han de tener en cuenta multitud de factores entre los que destaca el tamaño de alimentación, si se va a emplear una criba inclinada u horizontal, la densidad, la humedad y si es un sólido seco o húmedo de ahí el uso de la capacidad de cribado que muestra la [Ecuación 3](#).

$$Q = A_{ef} \cdot B \cdot C \cdot k \quad ( 3 )$$

En función de la experiencia industrial, para arena húmeda se puede asumir una eficiencia entre el 70 % y el 85 %, y una capacidad de paso de entre 80 y 120 t/h y por m<sup>2</sup> de superficie efectiva, según el tamaño de corte.

En el momento de seleccionar la criba se ha de determinar la cantidad de mallas que se va a poner (igual al número de productos a poner menos 1) y el tamaño de apertura de las mallas. En este proyecto se ha contemplado poner unas mallas finales de 40, 14 y 4 mm de apertura. Con estas mallas se obtienen tres productos que finalmente acabarán en el mismo acopio. La aplicación del triple mallado no ha sido seleccionada en este caso por los tres productos generados sino para aumentar la eficiencia de cribado para conseguir un producto mejor seleccionado. Con un cribado consecutivo se obtiene una mayor selección del producto final ya que la cantidad a tratar por la malla final suele ser menor y tiene un tiempo de residencia en la malla mayor sumado a el aumento de la posibilidad de rebote.

**GRUPO DE BOMBEO:** Entendemos un grupo de bombeo como una suma entre una cuba con su tecnología asociada y una bomba de lodos. Para el dimensionamiento de la cuba, el factor determinante es su capacidad volumétrica. Esta se suele medir en litros y debe estar de acuerdo con los requerimientos que esta requiere. Su tamaño debe ser correlativo también y estar de acuerdo con el tamaño del escurridor que lleva en su parte superior y del que se alimenta. Por otro lado, la bomba debe tener un motor suficiente para levantar el caudal requerido por los procesos sucesivos. En cuanto al dimensionamiento de la bomba hay multitud de factores relevantes que tener en cuenta.

El caudal que levante la bomba no debe ser mucho mayor que el caudal levantado ya que es un desperdicio y puede producir cavitaciones ni tampoco puede ser mucho menor ya que aumentaría la potencia consumida y existiría posibilidad de atranques.

El caudal necesario para las bombas se ha estimado a partir de la masa tratada por hora y la concentración de sólidos en la pulpa, según la fórmula del caudal mostrada en la [Ecuación 4](#).

$$Q = \frac{m}{\rho \cdot (1 - \phi)} \quad ( 4 )$$

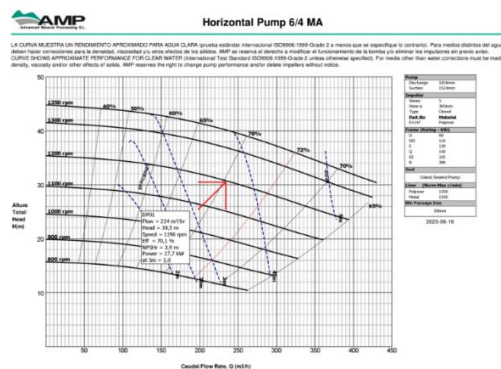
Otra de las propiedades más importantes es la abrasión del lodo a hacer fluir ya que dependiendo de su pH, el tamaño máximo de sus partículas y de más factores se debe optar por bombas de recubrimiento de poliuretano o de acero.

Si tenemos un pH muy básico, como suele ser en las plantas de depuración de agua, debemos optar por recubrimientos de acero inoxidable o de poliuretano ya que este lodo podría desgastar el acero.

Quizás la característica más relevante para su dimensionamiento requiere el cálculo de la altura manométrica total (HMT) y del caudal requerido, que determinarán la curva de trabajo óptima. Para ello se utiliza el cálculo reflejado en la [Ecuación 5](#).

$$HMT = H_{geom} + H_{fricción} + H_{presión} \quad (5)$$

Como mostrado en la [Figura 13](#), la curva característica de una de las bombas elegidas define como se va a comportar la bomba en función de todos sus parámetros relevantes.



**FIGURA 13: CURVA CARACTERÍSTICA BOMBA**

Cabe destacar que estas curvas de las bombas son cálculos teóricos los cuales hay que trasladar mediante las técnicas mencionadas con anterioridad a la realidad pasando, idealmente, por un laboratorio.

Como se muestra en la [Figura 13](#), se representa en el eje de las ordenadas la altura  $H$ . Esta Altura Manométrica Total es la altura a la que puede elevar un líquido medida en metro. Es una magnitud que expresa la energía que suministra la bomba al fluido y que, debidamente conducido, lo levanta esa cantidad de metros. Existen multitud de factores que afectan a esta altura  $H$  entre los que destacan la cantidad de tramos de tubería, la presión y los diámetros en la descarga y en la entrada y la velocidad de giro deseada.

En el eje de abscisas se observa el caudal que, como se conoce, es una relación entre las toneladas por hora y la densidad del lodo. Con estas variables calculadas y las curvas, se consigue un punto de la curva al que le corresponden valores asociados como se puede observar. Entre estos valores calculados por la intersección de las curvas encontramos las revoluciones por minuto (rpm) a las que deberá trabajar el motor, la eficiencia del motor, la potencia teórica del mismo. Con todos estos valores y una serie de cálculos asociados a la experiencia, se obtiene si la bomba con la que se ha calculado es suficiente, demasiado o escasa.

**REJILLA CURVA:** La rejilla curva es un equipo diseñado para producir un corte gradual entre las fracciones partícula, permitiendo que partículas más pequeñas que la apertura del panel pasen (parcialmente) a la fracción desbordante. Esto se logra por la fuerte inclinación de los paneles de cribado, que disminuye gradualmente hacia el lado de descarga.

**TORNILLO LAVADOR DE ARENAS:** También conocidos como tornillos sin fin, movilizan el material decantado por la rejilla curva hasta el extremo final del lavador, mientras realiza un lavado constante que retira las partículas contaminantes.

Los tornillos lavadores suelen contar con un ángulo de elevación en el final que facilita el desagüe del material. Estos equipos se encargan de remover partículas finas, arcillas y materia orgánica adherida a la arena gruesa. Su capacidad se estima en función del caudal de alimentación y del tiempo de residencia necesario acorde a la [Ecuación 6](#) mostrada a continuación.

$$Q = \rho \cdot \frac{V}{T_p} \quad (6)$$

Este equipo se selecciona considerando una velocidad de rotación tal que mantenga en suspensión las partículas finas sin arrastrar las gruesas como, correctamente, realiza el tornillo lavador que se muestra en la [Figura 14](#).



**FIGURA 14: TORNILLO LAVADOR EN FUNCIONAMIENTO**

**ESCURRIDOR VIBRANTE:** En cuanto a los escurridores vibrantes como el mostrado en la [Figura 15](#), la definición proporcionada por el catálogo de una de las principales empresas especializadas llamada Advanced Mineral Processing ilustra su funcionamiento perfectamente: “*Los Escurridores Vibrantes Vibroflux® son equipos similares a una criba convencional de alta frecuencia y baja amplitud, pero con la malla formando un fondo de ligera inclinación ascendente hacia el extremo de salida del producto. Los Escurridores Vibrantes Vibroflux® permiten reducir el contenido de agua de las arenas a valores mínimos.*” [10]

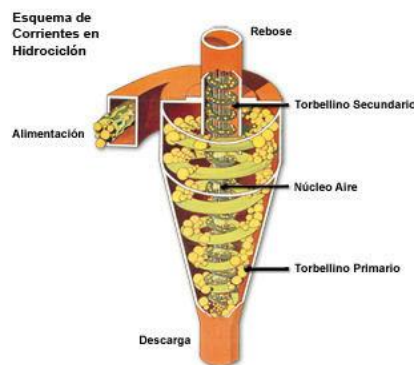


**FIGURA 15: ESCURRIDOR VIBRANTE - VIBROFLUX AMP**

Estos permiten obtener un producto final con bajo contenido de humedad (<10 %). Su capacidad depende de la superficie efectiva de cribado y del tamaño de partícula a deshidratar como refleja la [Ecuación 7](#).

$$Q = A_{dht} \cdot \rho_a \quad (7)$$

**HIDROCICLÓN:** Los hidrociclones tienen como principal función separar los sólidos de un tamaño granulométrico bajo como arcillas o pequeñas arenas de lo conocido como “descarga” que lleva en suspensión sólidos más gruesos. A nivel de funcionamiento, las partículas más gruesas giran cercanas a la pared por efecto de la aceleración centrífuga cayendo arrastradas por la superficie hacia el fondo. En la parte baja del ciclón son recogidas y circuladas al siguiente proceso de la planta mientras que las que ascienden en el conocido vértice interior secundario son consideradas ultrafinos (con tamaños menores a 0,1 mm) y pasados generalmente a procesos de recuperación de agua como refleja la [Figura 16](#).



**FIGURA 16: FUNCIONAMIENTO INTERNO DE UN HIDROCICLÓN**

Existen muchos tipos de recubrimientos interiores para los hidrociclones, pero los más extendidos son los de poliuretano (PP) y los de acero (SR). Como sucede con las bombas, dependiendo de las propiedades del lodo a tratar por el hidrociclón se optará por uno u otro recubrimiento.

En cuanto a los fondos de los hidrociclones, como coloquialmente se conoce a la parte inferior del mismo, existen fondos cónicos o planos. Los fondos cónicos son capaces de tratar partículas más grandes y pesadas con un mayor caudal.

Por otro lado, los hidrociclones de fondo plano son más estables ante variaciones en las condiciones de alimentación y permiten un corte de menor tamaño a bajos caudales.

En el presente proyecto, se tiene un caudal alto en el paso por el hidrociclón y como hay un proceso de clarificación del agua posterior, se opta por un fondo cónico.

En la minería, las arcillas y partículas de granulometrías más pequeñas son las que más problemas producen en los equipos. Estas partículas también producen un material más cohesionado y con menor selección lo que es perjudicial para los intereses económicos del producto.

**TANQUE CLARIFICADOR:** El tanque clarificador tiene como función, en los procesos de lavado de arena y tratamientos minerales por vía húmeda, el reciclar el agua sucia generada en estos procesos para obtener agua limpia para ser reutilizada nuevamente en el proceso. El producto que normalmente, y también en este proyecto, son finos se les aplica este proceso para aumentarles mucho la concentración y que los lodos que los contienen tengan la menor cantidad posible de agua.

Este equipo es fundamental en cualquier planta que tenga un añadido alto de agua en los equipos individuales ya que para esa primera etapa de segregación el agua recirculada es ideal. Esto es ya que tiene unas características muy similares a las que se querría tener y ya que reducen muchísimo el consumo de agua fresca de la planta convirtiéndola en más eficiente y menor consumidora de un bien tan necesario y escaso como es el agua.

## 7.2. EQUIPOS ELEGIDOS

Una vez teniendo los requerimientos generales de la planta y los particulares de cada equipo, la lista detallada de los equipos que se han elegido son los siguientes:

7.2.1. TOLVA DE ALIMENTACIÓN + ALIMENTADOR CINTA HO30 + FC77 - 10.01 + 10.02: Tolva de 30 m<sup>3</sup> de capacidad. Huella / boca de carga de 5.700 x 2.800 mm.

Sección superior prismática y sección inferior tronco piramidal; construida en chapa de acero de carbono con costillares de refuerzo en perfil laminado. Estructura de soporte en perfil laminado, con la boca de descarga a aprox. 1.000 mm sobre nivel del suelo similar a la mostrada en la [Figura 17](#).



FIGURA 17: TOLVA DE ALIMENTACIÓN CON ALIMENTADOR DE CINTA

7.2.2. CINTA DE ALIMENTACIÓN CT 17/800 - 10.03: Longitud entre ejes 17 m, Ángulo 18 °. Grupo motriz formado por motorreductor ortogonal con motor de 11 kW y tambor recubierto de caucho. Incluye una báscula de pesaje que controla el tonelaje de alimentación transportado similar a la mostrada en la [Figura 18](#).



FIGURA 18: CINTA DE ALIMENTACIÓN

7.2.3. CAJÓN DE REPULPADO CT 17/800 - 10.04: Cajón de Repulpado de la [Figura 19](#). Construido en acero suave revestido de caucho, tamaño 2000x400x500 mm. Recibe sólidos secos y agua y tiene como propósito del equipo es preparar una pulpa, antes de ingresar al grupo de bombeo.



FIGURA 19: CAJÓN DE REPULPADO

7.2.4. CRIBA VIBRANTE CON 3 NIVELES 1800 x 4800 + 3Ci4818 - 10.05: Criba de alta eficiencia con inclinación descendiente con movimiento vibratorio circular similar a la mostrada en la [Figura 20](#).

Esta criba consta de tres (3) bandejas con mallas de alambre de tensión lateral para realizar cortes: #40mm / #14mm / #4mm e incluye aporte de agua mediante riego. Sus componentes principales es 1 cuerpo principal criba con 1 motor de 18 kW y accionamiento por correas y poleas.



FIGURA 20: CRIBA VIBRANTE CON 3 NIVELES

7.2.5. GRUPO BOMBEO GB11R/100 + BOMBA 55 kW – 10.06: Cuba (Modelo GB11R) de forma circular. Fabricada en acero de carbono, y con componentes de desgaste revestidos en goma anti abrasiva, equipado con control de nivel. Similar a la mostrada en la [Figura 21](#).



FIGURA 21: GRUPO DE BOMBEO + BOMBA

Bomba de pulpas centrífuga horizontal AMP 6/4 D-MAR de servicio ultra-pesado con partes hidráulicas resistentes a la abrasión. La curva característica de la bomba es similar a la mostrada en la [Figura 22](#) e incluye un motor de 55 kW con transmisión por correas.



7.2.8. TORNILLO LAVADOR DE ARENAS WS01 - 20.02: El equipo consta de un tanque de sedimentación al que se envía la pulpa a tratar.

El tanque de sedimentación se encuentra en el fondo de un canal inclinado, en el que gira una hélice. La hélice agita la pulpa en el tanque de sedimentación y las impurezas o finos permanecen en suspensión en el agua, de modo que se eliminan por el rebosadero.

El tornillo sin fin arrastra la arena húmeda, sin finos, a una boca de descarga ubicada en la parte superior que queda reflejada en la parte derecha de la [Figura 25](#).



FIGURA 25: TORNILLO LAVADOR DE ARENAS

7.2.9. ESCURRIDOR VIBRANTE VF23 - 20.03: Criba de alta frecuencia y baja amplitud con ligera inclinación ascendente.

Superficie filtrante de  $8,4 \text{ m}^2$  de diseño modular, con paneles filtrantes de poliuretano. Equipado con dos motovibradores para conseguir una vibración lineal de alta frecuencia y baja amplitud que se pueden observar de verde en la [Figura 26](#).



FIGURA 26: ESCURRIDOR VIBRANTE

7.2.10. GRUPO BOMBEO PB75 + GRUPO BOMBA/MOTOR 8/6 E-MAR - 20.04: Cuba (Modelo PB75), forma rectangular, fabricada en acero de carbono, y con componentes de desgaste revestidos en goma anti abrasiva similar a la mostrada en la [Figura 27](#).

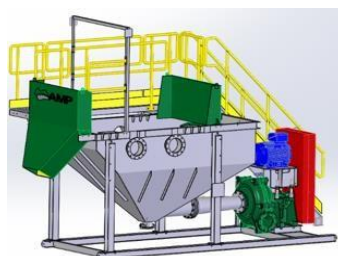


FIGURA 27: GRUPO DE BOMBEO DE MODELO RECTANGULAR

Bomba de pulpas centrífuga horizontal AMP 8/6 E-MAR de servicio ultra-pesado con partes hidráulicas resistentes a la abrasión, equipada con sello centrífugo. La curva característica se puede observar en la [Figura 28](#) e incluye motor de 90 kW con correas.



7.2.13. ESCURRIDOR VIBRANTE VF55 – 20.07: Criba de alta frecuencia y baja amplitud con ligera inclinación ascendente. Artesa construida en chapa de acero mecano-soldada, formando un conjunto rígido e indeformable.

Superficie filtrante de  $6 m^2$  con paneles filtrantes. Equipado con dos motorvibradores mostrados en verde en la [Figura 31](#).

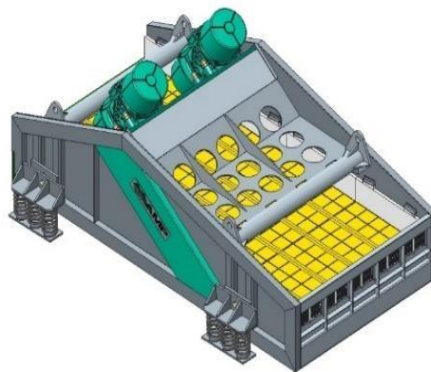


FIGURA 31: ESCURRIDOR VIBRANTE - AMP

7.2.14. CINTA TRANSPORTADORA DE ACOPIO 500/26 – 20.08: Longitud entre ejes de 15 m con un ángulo de  $18^\circ$ .

7.2.15. CAJÓN DE REPULPADO CR50 – 20.09: Cajón de Repulpado. Construido en acero suave revestido de caucho, recibe sólidos secos y agua y su propósito es preparar una pulpa.

7.2.16. DEPÓSITO DE AGUA DE  $100 m^3$  WD100 – 30.01: Depósito de agua de  $100 m^3$ , similar al de la [Figura 32](#), para el almacenamiento y la recirculación del agua limpia



FIGURA 32: IMAGEN DEPÓSITO DE AGUA EN LA PLANTA

7.2.17. BOMBA DE AGUA SUMERGIBLE GR.8107.011 – 30.02: Bomba de agua sumergible de acero con una potencia instalada de 37 kW, con una capacidad de 0 a  $600 m^3/h$ . Una bomba sumergible que cumple con los requerimientos en la mostrada en la [Figura 33](#).



FIGURA 33: BOMBA DE AGUA SUMERGIBLE

Los equipos mencionados han sido dimensionados bajo un estricto criterio técnico y elegidos del catálogo de la empresa Advanced Mineral Processing. [11]

AMP es una empresa del sector minero que destaca a nivel global como suministrador principal de sistemas y plantas de proceso eficientes para las industrias de Minería Áridos, Reciclaje y Medio Ambiente. Dentro del extenso catálogo de AMP, estos equipos individuales son los más fiables y rentables para la planta de tratamiento de arenas descrita en el proyecto.

## 8. INGENIERÍA DE DETALLE

La ingeniería de detalle es una fase del proceso de ingeniería que define los componentes de un proyecto y las especificaciones necesarias para su construcción. En una planta de tratamiento es inviable, como hemos introducido anteriormente, pensar que seleccionar los equipos aislados es la solución para resolver las necesidades de la planta. Entendiendo el proceso como algo global que involucra a todos los equipos de la planta, se debe diseñar las relaciones entre equipos para ver si estos trabajan de manera eficiente entre ellos.

### 8.1. SUMINISTRO DEL MATERIAL

En el presente proyecto se parte de un suministro inicial de material que no forma parte de la empresa. Esta parte es crítica en el funcionamiento de la planta para no disminuir ni aumentar descontroladamente la producción. Para la solución de este potencial problema se deben estipular contratos para asegurar el suministro contante y controlado de la planta por parte de los proveedores de arena. Dichos contratos deberán contemplar, al menos, los siguientes aspectos clave:

**Volumen mínimo y máximo de entrega:** Se establece cantidades específicas de material por período (diario, semanal o mensual) con el fin de mantener una operación continua sin generar acumulaciones ni desabastecimientos.

**Frecuencia y horarios de entrega:** Se definen franjas horarias y días de recepción para coordinar eficazmente la logística de entrada y evitar interferencias con otras actividades operativas de la planta. Cabe destacar también dentro del presente punto que el transporte es responsabilidad del proveedor y que se deben cumplir unas especificaciones en relación con ello.

**Especificaciones de calidad del material:** El contrato debe incluir criterios técnicos tales como la granulometría, el contenido mínimo de sílice, el nivel de humedad y la ausencia de materiales no deseados, para asegurar la idoneidad del material en el proceso de tratamiento. Esta calidad debe ser controlada por el proveedor mediante técnicas como análisis muestrales en laboratorios, pero se debe realizar catas por parte de la empresa encargada del tratamiento de arenas para comprobar los resultados recibidos desde el suministrador.

**Control de calidad a la recepción:** Se dispone de un sistema de verificación del material entrante que permita la aceptación o rechazo según los parámetros estipulados, garantizando la calidad del suministro.

**Duración y condiciones del contrato:** El contrato contempla una vigencia definida, con opciones de revisión periódica, renovación o rescisión anticipada bajo condiciones previamente pactadas. En el caso del proyecto desarrollado en este documento, se tienen tres clientes iniciales con una duración de los contratos por 10 años coincidiendo con su permiso para el tratamiento de las aguas.

Cláusulas de penalización e incentivos: Se establecen mecanismos que penalicen el incumplimiento de las condiciones pactadas, así como incentivos para aquellos proveedores que mantengan altos estándares de calidad y puntualidad. En este caso concreto, se ha dado un descuento sobre el precio por tonelada tratada previsto a los tres proveedores iniciales el cual está sujeto al cumplimiento del mencionado contrato.

Flexibilidad frente a variaciones de demanda: Se preverá la posibilidad de ajustar los volúmenes de suministro en función de paradas técnicas o fluctuaciones estacionales de la producción, asegurando así la adaptabilidad del sistema. Se contempla la ampliación del proyecto en el futuro por lo que los equipos ya tienen el anteriormente sobredimensionamiento de entorno al 20 % pero es clave asegurar un sólido suministro que pueda ser escalable en el futuro.

Este enfoque contractual tiene como finalidad asegurar la sostenibilidad operativa de la planta, permitiendo una gestión eficaz de los recursos y optimizando el rendimiento del proceso de tratamiento de arenas.

## 8.2. CARGA DEL MATERIAL

En cuanto a la carga del material, se hace directamente desde los camiones a la tolva. El transporte, así como las características de los camiones se deben dejar reflejadas en los contratos con los proveedores ya que son ellos los que se encargan de suministrar la arena. En este proceso es vital la coordinación de la planta con los camiones de suministro para no formar un cuello de botella en la tolva de alimentación. En este caso alguno de los requerimientos que se les facilitarán a los proveedores son:

*“El transporte de la arena en forma de pulpa con una concentración de 2.800 g/L (2.8 t/m<sup>3</sup>) debe realizarse mediante camiones cisterna diseñados para mezclas denso-líquidas. Si bien una cisterna estándar puede tener capacidades volumétricas de 20.000 a 30.000 litros, la densidad del material transportado condiciona fuertemente la carga máxima admisible desde el punto de vista legal.*

*De acuerdo con la Directiva 96/53/CE del Parlamento Europeo y del Consejo (relativa a las dimensiones máximas autorizadas para vehículos de transporte por carretera en la UE), y su transposición en España a través del Real Decreto 2822/1998, el peso máximo autorizado (PMA) para un camión rígido con remolque de cinco ejes es de 40 toneladas (peso total del conjunto: vehículo + carga). Considerando que el peso en vacío de un camión cisterna de estas características ronda los 12–16 toneladas, la carga útil real se limita generalmente a unas 24–28 toneladas netas.*

*Por tanto, aunque una cisterna de 30.000 litros podría teóricamente transportar hasta 84 toneladas de pulpa a 2.8 t/m<sup>3</sup>, estaría excediendo ampliamente el límite legal de peso. Esto hace imprescindible seleccionar cisternas que no solo tengan capacidad volumétrica, sino que cumplan con las restricciones de masa establecidas por la normativa.*

*Un ejemplo práctico sería el camión cisterna Renault C520 8x4 con cisterna GIL-30 (fabricación española), equipado con un depósito de 10.000 a 12.000 litros para materiales densos. Con esta configuración, y transportando pulpa de arena a 2.8 t/m<sup>3</sup>, la carga total oscilaría entre 28 y 33.6 toneladas de producto, pero cumpliendo el límite de masa si se ajusta el volumen de carga.*

*Esta estrategia garantiza el cumplimiento legal del transporte y permite adaptar el volumen cargado a las condiciones reales de densidad, distancia y tipo de vía.”*

### 8.3. RELACIÓN TOLVA - ALIMENTADOR

Para una correcta relación entre la tolva y el alimentador, la capacidad que suministra la tolva se controla con una válvula neumática. Con esto presente, hay que saber la cantidad requerida por el alimentador la cual se ha diseñado para que esté en concordancia con la tolva y a su vez con el cajón de repulpado.

### 8.4. CAJÓN DE REPULPADO Y CRIBA

En cuanto a estos dos equipos, su funcionamiento debe ir concatenado. El material debe pasar el suficiente tiempo dentro del cajón de repulpado para conseguir la concentración requerida y pasar a la criba en dichas condiciones. A su vez, la criba tiene tener el material en sus mallas el tiempo suficiente para clasificarse con la eficiencia requerida del proceso, pero no demasiado como para que sufra atranques o procese menos toneladas de las requeridas.

### 8.5. RELACIÓN GRUPOS BOMBEO – BOMBA/MOTOR

En este apartado se trata la relación entre los grupos de bombeo con los grupos bomba-motor de toda la planta. El grupo de bombeo está compuesto por muchos elementos entre los que destaca la cuba. La capacidad de dicha cuba ha de ser suficiente para alimentar al grupo bomba-motor con la concentración y caudal requeridos.

Es importante en este paso del proceso que haya una relación fluida entre lo que produce la cuba y lo que entra en el grupo bomba-motor. La bomba, como se puede observar en las curvas presentadas anteriormente, trabaja a unas revoluciones determinadas y con una potencia producida por el motor concretas por lo que una variación en su alimentación puede producir fallos en la linealidad del proceso. Para asegurar esto se realiza un correcto dimensionamiento de la cuba además de proceder a la instalación de válvulas de paso.

### 8.6. REJILLA CURVA

En cuanto a la rejilla curva, es el proceso más aislado que se tiene en la planta, aunque esto no quita que existan relaciones de este equipo con otros. En relación con el grupo bomba-motor, los dos parámetros más clave de controlar es el caudal que le llega y la presión de descarga. En cuanto a el caudal, es requerido que las partículas tengan un tiempo determinado de residencia en la rejilla. En este tiempo de residencia también tiene efecto la presión a la que se descarga sobre ella de lo cual es responsable el grupo de bombeo.

### 8.7. RELACIÓN TORNILLO/CICLÓN - ESCURRIDOR

Esta relación es una de las más importantes de toda la planta. En primera estancia encontramos el tornillo o ciclón. En cuanto al ciclo que interviene el tornillo, este se utiliza para la eliminación de la materia orgánica, pero en la que queda material productivo todavía. Combinado con un escurridor, se elimina la materia orgánica, pero reduciendo las pérdidas de producto final aprovechable.

Algo parecido sucede en el hidrociclón, pero con los finos. Los finos como las arcillas son perjudiciales para el proceso en general, pero para el producto final en específico. Es por ello por lo que se coloca un equipo como el hidrociclón para separar los finos con alta concentración de agua (que en etapas posteriores se recirculará) del producto buscado.

Esta simbiosis entre estos dos equipos produce una eficiencia mucho mayor en cada equipo individual lo que simplificado supone que aumenta el rendimiento del equipo por la instalación en armonía de otro equipo complementario.

## 8.8. RELACIÓN TANQUE CLARIFICADOR - BOMBA

El tanque clarificador debe ser suficientemente grande para albergar la cantidad de agua total que requiere el proceso completo. Además, se debe tener en cuenta que el lodo debe residir un tiempo concreto mínimo en el tanque para poderse decantar con los estándares definidos.

Una vez conseguimos separar los lodos del agua clarificada, se instala una bomba sumergible para impulsar el agua mediante tuberías al resto de la planta para su reaprovechamiento. Es importante contar con una bomba de agua que tenga capacidad para mover toda el agua necesaria y que cuente con un sobredimensionamiento suficiente para contener los indeseados golpes de ariete si estos se produjesen.

## 8.9. SUMINISTRO DEL PRODUCTO FINAL

El producto final se dejará almacenado en acopios para su futuro transporte devuelta a la planta de depuración de agua. En cuanto a este segundo transporte, se regula con el mismo contrato y normativa que el del suministro del material. En este caso no es necesario el uso de camiones cisterna, sino que se puede pasar a camiones convencionales (debido a la diferencia de concentración) para su transporte.

## 8.10. SUMINISTRO DE LOS SUBPRODUCTOS

En cuanto a los subproductos generados por la planta, son los siguientes como anteriormente se ha mencionado:

1. 3 t/h de material de granulometría mayor de 4 mm.
2. 10 t/h de material de granulometría menor de 0,063 mm.
3. 6 t/h de material orgánico.

Estos materiales pueden depender de varianzas en las condiciones de alimentación, pero, como reflejado en los contratos, se estipula unos rangos de variación determinados.

En este proyecto han utilizado técnicas de permacultura en la filosofía de la planta lo que aporta un enfoque más circular al proyecto convirtiendo posibles residuos en subproductos aprovechables.

La permacultura según Bill Mollison y David Holmgren es *“El diseño consciente de paisajes que imitan los patrones y las relaciones de la naturaleza, mientras suministran alimento, fibras y energía abundantes para satisfacer las necesidades locales”*. [12]

Para el autor de este documento la permacultura es un estilo de vida en el que se trata de volver a lo esencial, a lo simple, a la autosuficiencia. La permacultura es una forma de mirar el mundo, de observarlo reflexivo con paciencia y de actuar de la manera más natural e intuitiva posible.

El concepto de permacultura es muy amplio, pero en este proyecto ha aportado una visión distinta para la gestión de los estériles de la planta. Al volver a lo simple, a lo natural, se ha tenido en cuenta que la naturaleza no deja estériles, sino que lo que es un estéril para un componente de ella, es el producto esencial para otro.

Es por ello por lo que se ha buscado clientes locales que pudiesen utilizar los “estériles” de la planta como alimentación para cualquiera de sus procesos consiguiendo así transformar los estériles del proyecto en subproductos aprovechables que generan una rentabilidad.

El objetivo principal de los subproductos, como se ha comentado anteriormente, no es generar una gran rentabilidad sino conseguir una circularidad en el sistema siendo más respetuosos con el medio ambiente y generando una conciencia medioambiental en la industria. Este concepto es realmente interesante y altamente escalable a la industria en general y en concreto a la minería.

Cabe destacar que este, como cualquier proyecto, este está vivo lo que significa que tiene un carácter cambiante y se adapta al tiempo y a las nuevas condiciones del contexto. Las condiciones de los materiales, que se detallan a continuación, son fijas debido al proceso, aunque si se encontrasen nuevas salidas más rentables a productos producidos con los subproductos presentes, sería cuestión de estudiar los procesos para conseguir el material objetivo.

El primer subproducto generado por la planta son 3 t/h de una arena lavada de granulometría mayor de 4 mm. La composición de esta arena es principalmente cuarzo y fragmentos silíceos ya que proviene de arenas potabilizadoras. Otra de las características principales que tiene esta arena es que está libre de finos tras el lavado lo que es ideal para usos industriales o en construcción. Como propiedades físicas tiene una densidad aparente entre 1,5 – 1,8 t/m<sup>3</sup>, dependiendo de la compactación y humedad, con una alta resistencia mecánica por el cuarzo de su estructura y dispone también de una buena estabilidad química.

El segundo material obtenido por la planta es una producción de 10 t/h de arena lavada menor de 0,063 mm.

A esta arena es muy importante que se le realicen estudios de su composición ya que si supera un grado de pureza se podría emplear en laboratorios químicos y supondría un aumento de 25 veces en el precio de venta.

El tercer material es materia orgánica de lenta descomposición en natura, pero con un alto contenido en carbono lo que es vital para un gran número de cultivos. La mezcla del carbono y del nitrógeno en unas cuantías determinadas es lo que hace que se produzca un correcto compost que da como resultado un abono de calidad.

Si cambia el contexto, quizás cambien las relaciones circulares de los subproductos. Como conclusión de este pensamiento circular, se han encontrado simbiosis muy interesantes para los materiales generados como se detalla a continuación:

Para los gruesos mayores de 4 mm, se le va a dar salida como un subproducto perfectamente válido como materia prima para hormigón. A esta arena se le ha realizado una validación para comprobar que cumple los requisitos granulométricos y de limpieza recogidos en la UNE-EN 12620 y los ha cumplido. El precio de salida de dicho material se detallará en la viabilidad económica, pero cabe destacar que el precio que allí está marcado simplemente es una estimación en un plano muy desfavorable y con un contexto adverso por lo que en términos generales esta arena debería tener un valor casi 10 veces mayor en euros por tonelada.

Para los otros dos materiales se les ha pensado dar una salida como material orgánico de base en terrenos agrícolas. Se ha estudiado que la mezcla de la materia orgánica con la arena fina provoca una base realmente útil para la generación de microorganismos vitales para las explotaciones intensivas de pequeñas dimensiones. Este subproducto se vende en establecimientos especializados en agricultura, pero con el enfoque permacultural de la planta se ha conseguido obtenerlo con presuntos estériles de esta.

En el caso de la arena mayor de 4 mm se han pensado además los siguientes usos que podría tener para poder darle salida si cambia el mercado de la construcción: base para caminos o carreteras, relleno de zanjas, drenajes y cimentaciones, venta directa como árido reciclado RCD y uso decorativo o paisajístico.

El amplio abanico de los subproductos producidos sumado a la visión adaptable y adaptativa de la planta hace que se obtenga beneficio económico, medioambiental y social de un material que en otro contexto sería un estéril problemático.

## 9. EJECUCIÓN DEL PROYECTO

### 9.1. TRANSPORTE

Una vez se ha pasado por la ingeniería de detalle teniendo perfectamente definidos los equipos, sus relaciones y el funcionamiento global de la planta abarcando todos sus detalles funcionales, se procede al envío de los equipos al emplazamiento final de destino.

En el presente proyecto se han estimado 22 camiones para el transporte de los equipos a su emplazamiento final. Para calcular los camiones aproximados que se necesitan para el transporte de los equipos, se realizan simulaciones de carga como la que se observa en la [Figura 34](#).

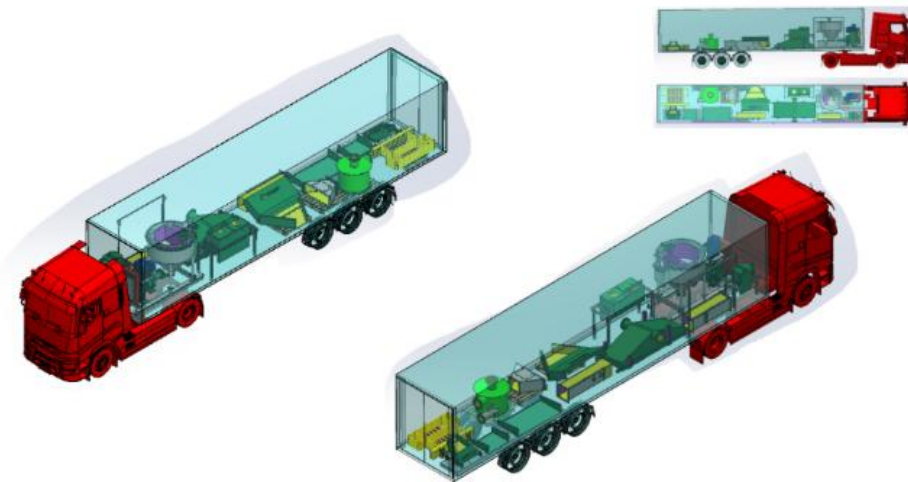


FIGURA 34: BOCETO CARGAS APROXIMADAS CAMIONES

La coordinación del cargado de los camiones y de la descarga de estos es propiedad de la empresa fabricante de los equipos, pero la contratación es parte correspondiente al proyecto por lo que se considera interesante la realización de las simulaciones de carga para la optimización de los espacios.

### 9.2. OBRA CIVIL

Una vez los equipos se encuentran en el terreno, comienza el periodo de obra civil. Este proceso no suele ser necesario más allá de un acondicionamiento de la superficie en la que se colocan los equipos o si se ha diseñado la planta con diferencias de cota para una reducción de las estructuras. En este proyecto, se ha diseñado unos muros de hormigón con múltiples funciones.

El primero de ellos es el acondicionamiento de un espacio seguro cercano a la tolva 10.01 para que se puedan colocar los camiones con el producto de alimentación para su descarga. Esto se realizó con tres paredes definidas con un espaciado en el que cabe el mayor de los camiones posibles procedentes de las depuradoras y que queda emplazado como se muestra en la [Figura 35](#).



**FIGURA 35: TOLVA CON HORMIGÓN COMO BASE ESTRUCTURAL**

Posteriormente se realizan unos muros para la separación de los acopios. Esto sirve para poder tenerlos en un espacio más reducido, pero con una separación plena y total con zonas perfectamente definidas para cada producto como se deduce en la [Figura 36](#).



**FIGURA 36: MUROS DE SEPARACIÓN PARA LOS ACOPIOS**

Por último, se ha diseñado una de las paredes para acoplar el escurridor con una inclinación que favorece las funciones del equipo. Esta pared se puede observar en la [Figura 37](#) así como el escurridor ya instalado en la misma.



**FIGURA 37: PAREDES VERTICALES PARA EL ESCURRIDOR**

### 9.3. MONTAJE

Tras las operaciones de obra civil necesarias, se procede con el montaje de los equipos de una manera ordenada. Este orden es clave diseñarlo en la etapa de ingeniería para facilitar la instalación de los equipos más críticos y complicados y para disponer de las herramientas necesarias con el menor tiempo de alquiler posible. En este caso y como viene a ser normal en las plantas compactas, se comienzan por las estructuras. Estas son sencillas de erigir, pero se ha de contar con grúas que manejen el tonelaje de las estructuras de manera adecuada como las mostradas en la [Figura 38](#).



FIGURA 38: MONTAJE DE LAS ESTRUCTURAS MEDIANTE GRÚAS

Como se puede observar en la imagen, la estructura tiene un volumen considerable y un peso relevante por lo que se ha de contar con un plan muy definido de protección a los trabajadores además de con los equipos de elevación necesarios.

Tras el montaje de las estructuras de soporte de la planta compacta, se instalan los equipos propios de la planta compacta en el siguiente orden que corresponde con su menor cota relativa: primero la cuba, tras ello el escurridor y, por último, el hidrociclón.

Después de esto se pueden montar el resto de los equipos menos las cintas transportadoras y las conexiones por tuberías e instrumentación entre los equipos que se dejan para el final. Esto es así ya que estos últimos son los equipos con mayor flexibilidad en lo referido a las posiciones y las posibles extensiones de su estructura.

Por último, es fundamental llevar a cabo pruebas mecánicas y verificaciones previas antes de la puesta en marcha, incluyendo ensayos de estanqueidad, test de funcionamiento en vacío y validación de sistemas eléctricos y de automatización.

En este proyecto los tiempos estimados para el Montaje se han estipulado como:

1. 54 días laborables con 3 soldadores/montadores cualificados.
2. 30 días laborables con 2 electricistas.

En cuanto a los equipos de elevación dimensionados para la utilización durante el montaje son:

1. Grúa de 40 toneladas, durante el tiempo estimado para el montaje similar a la que se puede observar en la [Figura 39](#).
2. Plataforma elevadora diésel todoterreno de 12 m, durante el tiempo estimado para el montaje.



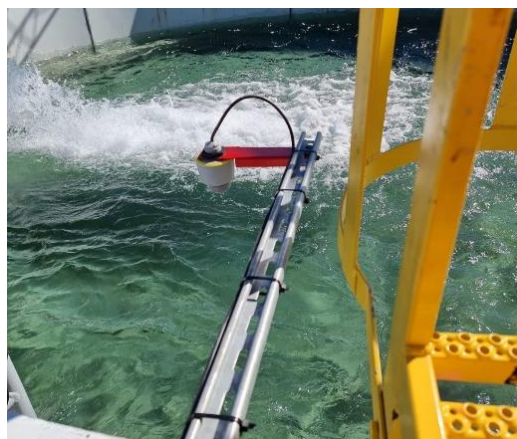
[FIGURA 39: MONTAJE DE LA CRIBA EN LA ESTRUCTURA](#)

#### 9.4. PUESTA EN MARCHA DE LA PLANTA

Cuando el montaje está plenamente completo, se pasa a realizar las puestas en marcha de la planta como paso previo al arranque efectivo de la planta. Para la puesta en marcha es fundamental conocer cómo funcionan los equipos en su conjunto además de sus funcionalidades individuales en la realidad. Para comprobar esta correcta funcionalidad, se suelen realizar una marcha mecánica y una marcha eléctrica. La puesta en marcha mecánica se refiere al proceso de preparar y configurar los componentes mecánicos de la planta de tratamiento para que puedan funcionar correctamente. La puesta en marcha eléctrica, por otro lado, implica la revisión y el ajuste de los componentes eléctricos, el cableado y los sistemas de control para asegurar el correcto funcionamiento eléctrico del sistema.

Para estas labores en este proyecto se han diseñado los siguientes tiempos:

1. 10 días laborables para la puesta en marcha mecánica (1 soldador/montador) similar a la mostrada en la [Figura 40](#).
2. 10 días laborables para la puesta en marcha eléctrica (1 electricista).



[FIGURA 40: PUESTA EN MARCHA MECÁNICA CON AGUA](#)

## 10. MATRIZ DAFO

El análisis DAFO permite identificar las fortalezas, las oportunidades, las debilidades y las amenazas de un proyecto. Se ha realizado para el proyecto presente con el fin de estudiar oportunidades competitivas de mejora y se ha representado en la [Tabla 1](#). [13]

<b>FORTALEZAS (F)</b>	<b>DEBILIDADES (D)</b>
Proyecto alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).	Dependencia de proveedores externos para el suministro de materia prima
Revalorización de residuos como recurso útil (economía circular).	Necesidad de alta calidad técnica en procesos de clasificación y lavado
Posibilidad de ingresos múltiples.	Elevada inversión inicial en equipos y puesta en marcha.
Tecnología conocida y robusta (filtros lentos, lavado, etc.).	Falta de histórico en la planta concreta, curva de aprendizaje.
Amplio abanico de productos adaptables a especificaciones.	Variabilidad de los criterios técnicos de los subproductos.
<b>OPORTUNIDADES (O)</b>	<b>AMENAZAS (A)</b>
Alta demanda de arenas silíceas en potabilizadoras y tratamiento terciario de aguas residuales.	Cambios en la normativa ambiental o en los requisitos técnicos de calidad del material.
Interés creciente de las empresas por reducir sus residuos y subcontratar este tipo de procesos.	Fluctuación en el precio del mercado de áridos y en la disposición de las empresas a pagar.
Posibilidad de acuerdos estables con múltiples depuradoras.	Competencia de otros centros de tratamiento.

**TABLA 1: MATRIZ DAFO DEL PROYECTO**

Siguiendo el orden de las siglas de la matriz, comenzaremos resaltando las debilidades del proyecto. Para un proyecto de esta envergadura es clave el análisis de las debilidades internas ya que ofrecen un punto de partida para posibles mejoras del proyecto. En este aspecto y a raíz de la detección de la siguiente debilidad "Elevada variabilidad de los criterios técnicos de los subproductos" se ha ideado una adenda del proyecto para el futuro si fuese necesaria. Esta consta de una etapa opcional para separar en dos pilas de acopio el producto obtenido o incluso clasificarlo en una arena 0,1-2 mm y una arena 2-4 mm. Estos procesos son simplemente ideas adicionales pero que demuestran la efectividad de la matriz DAFO para investigar a fondo las fortalezas y debilidades de los proyectos.

Tras las debilidades, la siguiente categoría secuencialmente que habla son las amenazas. Difieren de las debilidades en que las amenazas son externas y, por lo general, están fuera de nuestro control. Una de las amenazas más relevantes de las detectadas en el desarrollo de esta matriz ha sido la "Fluctuación en el precio del mercado de áridos y en la disposición de las empresas a pagar." Esto se ha tratado de evitar creando vínculos contractuales con las empresas de potabilización de agua. Estos contratos facilitan que el precio de procesamiento por tonelada hora sea constante durante la duración del acuerdo inicial. Tras este transcurso de tiempo pueden verse afectados los precios del procesamiento del material, pero la gran versatilidad de adaptación de los productos generados pueden ser la solución para combatir esta amenaza.

Tras la explicación de la primera parte de la matriz, se puede avanzar a las fortalezas del proyecto. Este proyecto se encuentra dentro de un marco normativo europeo, alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y con las políticas medioambientales europeas. Estas directrices hacen que el proyecto se diferencie con otros proyectos similares que no tengan este enfoque progresista y responsable. Aprovechando los conceptos de permacultura (que se desarrollarán posteriormente) se ha diseñado una circularidad del sistema que permite la revalorización de residuos convirtiéndolos en subproductos aprovechables. El concepto de residuo no se contempla en esta planta, sino que se transforma gracias a la línea de pensamiento global del proyecto en subproductos.

Por último, las oportunidades que ofrece el contexto al proyecto. Todas las oportunidades del proyecto son interesantes para su estudio y observar cómo evolucionan, pero en particular el “Interés creciente de las empresas por reducir sus residuos y subcontratar este tipo de procesos” es clave. Las empresas cada vez se encuentran más concienciadas (o presionadas) a realizar una correcta gestión de sus residuos y, cada vez más, buscan delegar estas actividades adicionales en empresas especializadas y cualificadas. En relación con estas presiones gubernamentales, el “Apoyo institucional a proyectos sostenibles e innovadores (posibles subvenciones o ayudas públicas)” es una oportunidad aprovechable para aumentar la rentabilidad del proceso de lavado de las arenas. Existen multitud de ayudas, y existirán más si continuamos con los mismos objetivos medioambientales, para los proyectos de tratamiento de residuos.

Con un análisis DAFO se puede mejorar los procesos y planificar el crecimiento del proyecto al investigar las áreas relacionadas a estas oportunidades y amenazas.



## **DOCUMENTO 2: ESTUDIO ECONÓMICO**

# 1. INTRODUCCIÓN

La viabilidad económica es una etapa crítica en la planificación de los proyectos mineros, ya que permite evaluar la rentabilidad y sostenibilidad financiera de una inversión las cuales suelen ser elevadas en este sector. En el presente documento se realiza un estudio económico-financiero para la planta de lavado de arenas orientada a la mejora de la calidad del agua para potabilización. También se estudia y analiza la escalabilidad del sistema para otras condiciones y su aplicación para países en vías de desarrollo.

Este documento se ha elaborado teniendo en cuenta los cálculos realizados mediante el software MS. Excel tras un análisis exhaustivo del aspecto económico del proyecto incluyendo los principales indicadores financieros: *Payback* del beneficio, Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR). Además, y para fortalecer el análisis se ha incluido una estimación de los costes de inversión (CAPEX), costes operativos (OPEX) y el flujo de caja proyectado. En el caso concreto de este proyecto, se conoce una aproximación bastante fiable de dichos gastos los cuales están reflejados en la hoja de cálculo.

# 2. DATOS DE PARTIDA

Los datos de partida para el cálculo de la viabilidad económica se basan en la capacidad de producción horaria de la planta. En este caso se ha calculado teniendo en cuenta el tonelaje real (120 t/h) en vez de usar el tonelaje nominal (140 toneladas por hora). Esta elección se fundamenta en el rendimiento teórico diseñado en la planta (85 %) para prevenir posibles pérdidas de este durante el funcionamiento de la planta.

Incluidos en estos datos iniciales, se tienen las toneladas por hora, las horas improductivas y de no servicio (explicadas a continuación), las toneladas teóricas producidas por subproductos, la inversión inicial de los equipos en euros y el tiempo elegido de amortización de los equipos como muestra la [Tabla 2](#).

Toneladas por hora tratadas	120
Horas Improductivas / No servicio	10 %
Toneladas por hora Subproducto 1 (> 4 mm)	3
Toneladas por hora Subproducto 2 (> 0,1 mm)	10
Toneladas por hora Subproducto 3 (Mat. Orgánica)	7
Inversión inicial de la planta	2.700.000,00 €
Amortización de la planta en años	5

**TABLA 2: PRODUCCIÓN DE LA PLANTA Y ASPECTOS ECONÓMICOS INICIALES**

Las horas improductivas son periodos de tiempo en los que un empleado no está realizando tareas que generen un resultado tangible para el proyecto. Algunos ejemplos de lo mismo en el presente proyecto son: esperar a que se complete el llenado o vaciado de un camión, asistir a reuniones innecesarias por parte del cliente o del proveedor o procrastinar. Esta improductividad aumenta los costes operativos de la planta además de disminuir la productividad general del proyecto y la eficiencia de los procesos.

En cuanto a las horas de no servicio son los periodos en los que el personal no está disponible para atender a los clientes ya sea por motivo de descanso, vacaciones, reuniones o cualquier otra razón que impida la actividad.

Dentro de este grupo de horas se encuentran las horas de descanso programadas, los periodos de baja laboral o el tiempo para cubrir demandas de clientes y proveedores. Esto puede acarrear insatisfacción en los clientes, pérdidas de ventas y daños a la reputación del proyecto.

En cuanto a la relación de ambos periodos, las horas improductivas pueden afectar a las horas de no servicio ya que una gestión ineficiente del tiempo puede provocar retrasos y problemas en la atención al cliente lo que aumenta la demanda del servicio.

La optimización de estas horas es clave para mejorar la eficiencia y la productividad de cualquier proyecto y en el presente se han adoptado las siguientes maneras para tratar de reducir el mayorado 10 % de improductividad:

## 2.1. INGENIERÍA

Estandarización de diseños: Pensado para la escalabilidad del proyecto a futuros, reutilizar soluciones ya validadas por el presente proyecto para acelerar el proceso y reducir errores.

Revisión automatizada de interferencias: Es importante detectar conflictos de diseño anticipadamente en colaboración con el departamento de proyectos para evitar la pérdida de tiempo en la gestión con los proveedores de equipos.

## 2.2. DEPARTAMENTO DE PROYECTOS

Control de cambios estricto: Se debe tratar de evitar reprocesos innecesarios por solicitudes mal documentadas o errores en la cadena de comunicación interna.

## 2.3. MONTAJE

Plan de montaje secuenciado y validado en el que se incluye la logística, seguridad, y recursos de formación previos. Además, es imprescindible disponer anticipadamente de herramientas y repuestos críticos para el proyecto.

## 2.4. PUESTA EN MARCHA

Simulación previa de operación usando *softwares* para predecir fallos además de una *checklist* de verificación mecánica y eléctrica.

## 2.5. OPERACIÓN DE LA PLANTA

Digitalización y monitoreo remoto el cual permite detectar fallos en tiempo real y anticipa paradas como el uso de básculas de pesajes como el mostrado en la [Figura 41](#). Es importante también realizar una correcta formación continua del personal y un mantenimiento predictivo y preventivo de la planta para evitar paradas imprevistas.



FIGURA 41: BÁSCULA DE PESAJE PARA EL MONITOREO EN CINTAS TRANSPORTADORAS

En este apartado de la viabilidad económica, tampoco se ha tenido en cuenta para el cálculo de la viabilidad el posible incremento de la producción a 160 t/h (nominal de 180 t/h) ya que repercute en todos los aspectos económicos del proyecto (costes, ingresos...) y se convertiría en un proyecto distinto.

### 3. CÁLCULO DE COSTES POR TONELADA TRATADA

Para el coste se han de estudiar todos los factores que influyen en el coste por tonelada tratada. Este coste se puede estudiar en el periodo de tiempo que se elija, pero para este análisis económico (y como normalmente se hace) se ha elegido periodos anuales.

Este proyecto se idea para trabajar 24 horas al día los 365 días del año. Se elige este horario debido a la inmensa cantidad de arena a tratar y que el coste de la energía por la noche es menor.

Esta manera de trabajar supone numerosos condicionantes los cuales se enumeran a continuación:

1. El primer año del proyecto se diseña como una etapa de trabajo inicial para el adecuamiento de la planta por lo que tiene unos horarios reducidos. Se reduce el horario de trabajo además de los días de trabajo anuales para controlar el desempeño de la planta en unas condiciones más controladas y de menor estrés que el trabajo ininterrumpido. Estas condiciones iniciales son 16 horas al día (dos turnos) y 22 días al mes durante 12 meses. Esto reduce las horas de marcha de la planta anuales de 7.776 a 3.802. Esta reducción es del 50% en computo de horas anuales.
2. El coste del personal es alto (teniendo en cuenta la media de coste horario de otras plantas de tratamiento de arenas) debido a que existen pluses por nocturnidad.
3. En relación con el suministro de arena, este no se ve alterado por las horas ya que las plantas de tratamiento de agua trabajan 24 horas 7 días a la semana. El coste del transporte recae en el cliente y como ventaja el transporte nocturno ofrece mayor regularidad en las cargas.

Por todas estas características se opta por el horario de 24 horas los 7 días de la semana a partir del primer año.

Con esta elección en el horario de trabajo de la planta, se calculan las toneladas de arena 0,1 – 4 mm anuales producidas como se observa en los cálculos de la [Ecuación 8 y 9](#) y en la [Tabla 3](#).

$$T_{1^{er} \text{ Año}} = \left(\frac{T}{H}\right) \text{Producto} \cdot H_{1^{er} \text{ Año}} \cdot (1 - H_{\text{Improductivas}}) \quad (8)$$

$$T_{AS} = \left(\frac{T}{H}\right) AS \cdot H_{AS} \cdot (1 - H_{\text{Improductivas}}) \quad (9)$$

Toneladas por hora	120	
Horas Improductivas / No Servicio	10 %	
Horas productivas diarias 1 <sup>er</sup> Año	16	
Días por mes 1 <sup>er</sup> Año	22	
Toneladas 1 <sup>er</sup> Año	456.192	450.000
Horas productivas diarias AS	24	
Días por mes AS	30	
Toneladas AS	933.120	930.000

TABLA 3: PRODUCCIÓN EN TONELADAS DEL PRODUCTO

Para el cálculo de las toneladas anuales por subproducto, se tiene en cuenta lo comentado en el apartado 8.10 sobre los subproductos vendibles de la planta. El cálculo de las toneladas anuales se ha realizado mediante hojas de cálculo, tal como se muestra en los desarrollos correspondientes a las [Ecuaciones 10-13](#), así como en los resultados recogidos en la [Tabla 4](#).

$$T_{\text{Relleno } 1^{\text{er}} \text{ Año}} = \left(\frac{T}{H}\right) \text{Relleno} \cdot H_{1^{\text{er}} \text{ Año}} \cdot (1 - H_{\text{Improductivas}}) \quad (10)$$

$$T_{\text{Agricultura } 1^{\text{er}} \text{ Año}} = \left(\frac{T}{H}\right) \text{Agricultura} \cdot H_{1^{\text{er}} \text{ Año}} \cdot (1 - H_{\text{Improductivas}}) \quad (11)$$

$$T_{\text{Relleno AS}} = \left(\frac{T}{H}\right) \text{Relleno} \cdot H_{\text{AS}} \cdot (1 - H_{\text{Improductivas}}) \quad (12)$$

$$T_{\text{Agricultura AS}} = \left(\frac{T}{H}\right) \text{Agricultura} \cdot H_{\text{AS}} \cdot (1 - H_{\text{Improductivas}}) \quad (13)$$

Toneladas por hora Subproducto 1 (> 4 mm)	3	
Toneladas por hora Subproducto 2 (< 0,1 mm)	10	
Toneladas por hora Subproducto 3 (Mat. Org.)	7	
Toneladas 1 <sup>er</sup> Año Árido de Relleno	11.405	11.400
Toneladas 1 <sup>er</sup> Año Producto Agricultura	64.627	64.600
Toneladas AS Árido de Relleno	23.328	23.300
Toneladas AS Producto Agricultura	132.192	132.100

**TABLA 4: TONELADAS DE SUBPRODUCTOS PRODUCIDAS**

Una vez calculadas las toneladas de producto y de subproductos anuales, podemos pasar a evaluar los costes globales anuales de la planta. Este cálculo es la suma de los costes individuales como se indica en los cálculos presentes en las [Ecuaciones 14-19](#) y reflejados en la [Tabla 5 y 6](#).

$$\text{Coste Personal } 1^{\text{er}} \text{ Año} = \text{Coste Medio } H \cdot H_{\text{Anuales } 1^{\text{er}} \text{ Año}} \quad (14)$$

$$\text{Coste Personal AS} = \text{Coste Medio } H \cdot H_{\text{Anuales AS}} \quad (15)$$

$$\text{Coste Energía } 1^{\text{er}} \text{ Año} = H_{\text{Anuales } 1^{\text{er}} \text{ Año}} \cdot P \cdot \left(\frac{\text{Euro} \cdot \text{kW}}{H}\right) \quad (16)$$

$$\text{Coste Energía AS} = H_{\text{Anuales AS}} \cdot P \cdot \left(\frac{\text{Euro} \cdot \text{kW}}{H}\right) \quad (17)$$

$$\text{Coste } 1^{\text{er}} \text{ Año} = \text{Coste Personal } 1^{\text{er}} \text{ Año} \cdot \text{Fijo } 1^{\text{er}} \text{ Año} \cdot \text{Coste Energía } 1^{\text{er}} \text{ Año} \quad (18)$$

$$\text{Coste Total AS} = \text{Coste Personal AS} \cdot \text{Coste Fijo AS} \cdot \text{Coste Energía AS} \quad (19)$$

Coste Total 1 <sup>er</sup> Año	475.000,00 €
Coste AS	960.600,00 €

TABLA 5: COSTE TOTAL

Media Coste por Hora y por Persona	40,00 €
Coste Personal 1 <sup>er</sup> Año	169.000,00 €
Coste Personal AS	345.600,00 €
Coste Fijo / Infraestructuras / Añadidos por Año	10.000,00 €
Coste de Repuestos y Paradas Planta	INCLUIDO

TABLA 6: DESGLOSE DE LOS COSTES

En cuanto al desglose del cálculo de la energía se comentará en el siguiente apartado, pero destacar que se ha tenido en cuenta para el coste total como lo indican las fórmulas.

#### 4. CÁLCULO DE LA ENERGÍA Y MEDIDAS DE OPTIMIZACIÓN

Para el cálculo de la energía es vital conocer la potencia instalada en la planta. La suma de todos los equipos individuales es lo que se contempla como “Potencia Total Instalada”. En cuanto al accionamiento de los equipos, hay algunos que requieren una potencia adicional para el arranque y es por eso y por añadir otro factor de seguridad que se ha decidido por mejorar.

Para estimar el consumo energético de la planta de lavado de arenas, se parte de una potencia eléctrica instalada de 350 kW a la hora.

La planta opera de forma continua durante 24 horas al día los 365 días del año (tras el primer año), lo que implica un consumo energético anual mostrado en las Ecuaciones 20 y 21.

$$\text{Consumo diario} = 350 \text{ kW} \cdot 24\text{H} = 8.400 \text{ kWh}/\text{H} \quad (20)$$

$$\text{Consumo Año} = 8.400 \text{ kWh}/\text{H} \cdot 365 \text{ días} = 3.024.000 \text{ kWh}/\text{H} \quad (21)$$

Para el cálculo se estima un precio medio de la energía eléctrica de 0,20 euros el kilovatio hora por lo que el coste energético anual se eleva a 605.000,00 € en los años mayores que el primero y de 296.000,00 € el primer año.

En el concepto de consumo específico de energía, como la planta trata 930.000 toneladas de arena al año, el consumo específico de energía se calcularía como la división entre el consumo y las toneladas anuales producidas por lo que en el primer año sería de 3,29 kWh/t y en los años sucesivos desciende ligeramente a 3,25 kWh/t como se observa ver en la Tabla 7.

Potencia Total Instalada (Mayorada)	350 kW
Euro por Kilovatio entre hora	0,20 €
Coste Energía 1 <sup>er</sup> Año	296.000,00 €
Coste Energía AS	605.000,00 €
Consumo Específico de Energía 1 <sup>er</sup> Año	3,29
Consumo Específico de Energía AS	3,25

**TABLA 7: ENERGÍA Y COSTE ENERGÉTICO TOTAL**

Estos valores se encuentran dentro de un rango aceptable para plantas de tratamiento.

Los valores del consumo específico son valores, pero se pueden optimizar mediante estrategias de eficiencia energética las cuales se desarrollarán a continuación:

#### 4.1. VARIADORES DE FRECUENCIA (VFD)

Permiten adaptar la velocidad de motores a la carga real del sistema, evitando consumos innecesarios especialmente en bombas y ventiladores.

#### 4.2. AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL

La integración de sensores y sistemas SCADA permite una gestión dinámica del proceso, ajustando los parámetros de operación en función del caudal y las condiciones del material.

Para esta planta se ha realizado un sistema SCADA ([mostrado en ANEXO E](#)) para el control con el armario eléctrico y la detección de cuellos de botella en el proceso.

#### 4.3. MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Equipos en mal estado pueden consumir más energía sin mejorar el rendimiento. Un mantenimiento regular asegura eficiencia y prolonga la vida útil de los componentes. Es por ello que en la filosofía de la planta se ha integrado un anexo del mantenimiento de los equipos individuales y de las conexiones de la planta diseñadas por horas de trabajo acumuladas.

#### 4.4. INTEGRACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES

Sistemas fotovoltaicos de autoconsumo podrían cubrir parte de la demanda energética diaria, reduciendo tanto el impacto económico como ambiental. Se ha contemplado en este proyecto ideas de autosuficiencia energética los cuales pueden ser implementados en el futuro como la que representa la simbiosis volquete – paneles solares de la [Figura 42](#).



**FIGURA 42: VOLQUETE MINERO DE LA COMPAÑÍA CAT CON PANELES SOLARES.**

Implementando estas medidas se estima una posible reducción del consumo energético en un 15–25 %, lo que supondría un ahorro anual de entre 91.980 y 153.300 €, y una mejora del consumo específico hasta valores cercanos a 2,5–2,8 kWh/t.

## 5. INGRESOS PREVISTOS

En cuanto a los ingresos previstos de la planta, hay que tener en cuenta el precio por tonelada del producto principal y de los subproductos como se muestran en la [Tabla 8](#).

Precio Venta Arena Lavada por Tonelada	1,25 €
Precio Venta Árido de Relleno por Tonelada	0,20 €
Precio Venta Producto Agrícola por Tonelada	0,10 €
Precio de Venta Producto 1 <sup>er</sup> Año	562.500,00 €
Precio de Venta Producto AS	1.162.500,00 €
Precio de Venta Subproductos 1 <sup>er</sup> Año	296.000,00 €
Precio de Venta Subproductos AS	605.000,00 €

**TABLA 8: PRECIO DE VENTA DE LOS PRODUCTOS Y DE LOS SUBPRODUCTOS**

Como se puede ver en la [Tabla 8](#), el precio de venta por tonelada de arena lavada es de 1,25 euros. Este precio es considerablemente más barato que la media del resto de plantas de tratamiento de arenas (el cual oscila entre 6 y 25 euros por tonelada). Este precio de venta es fruto del convenio firmado con las plantas de potabilización. Este precio se mantiene los 3 primeros años y después hay una revisión en la que se estima una subida a los 3 euros por tonelada, pero en este análisis de viabilidad se ha tenido en cuenta un precio de venta por tonelada de 1,25 euros para todos los años de contrato.

En cuanto a los subproductos, tienen un precio muy bajo también en comparación con otros materiales comerciales de funcionalidad similar. Esta estimación de precio de venta se hace teniendo en cuenta también el coste que supondría procesarlo o eliminarlo de otra manera que no fuese la venta como subproducto. En estos subproductos se ha asegurado bajo contrato es el seguro de compra por parte del cliente de las cantidades proyectadas durante los 10 años de explotación por lo que la planta se asegura no tener problemas de estériles costosos.

## 6. FLUJO DE CAJA

El flujo de caja se refiere a la información sobre los recursos que genera una empresa, tanto los flujos de entrada como de salida, en un periodo de tiempo específico. [14]

Como se puede observar en la [Tabla 9 y 10](#), primero se calcula el saldo de caja neto teniendo en cuenta solo el año que se esté calculando y posteriormente se calcula el saldo de caja acumulado que tiene en cuenta los años anteriores. El saldo de caja neto influye, lógicamente, en el saldo de caja acumulado mientras que en el otro sentido esta influencia no se da.

FLUJO DE CAJA				
AÑOS	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4
<b>GASTOS</b>	- 1.015.000,00 €	- 1.015.000,00 €	- 1.015.000,00 €	- 1.015.000,00 €
<b>INGRESOS</b>	571.240,00 €	1.180.370,00 €	1.180.370,00 €	1.180.370,00 €
<b>SALDO DE CAJA NETO</b>	- 443.760,00 €	165.370,00 €	165.370,00 €	165.370,00 €
<b>SALDO DE CAJA ACUMULADO</b>	- 443.760,00 €	- 278.390,00 €	- 113.020,00 €	52.350,00 €

**TABLA 9: FLUJO DE CAJA (NETO Y ACUMULADO) AÑOS 1 A 4**

FLUJO DE CAJA					
AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
- 475.000,00 €	- 475.000,00 €	- 475.000,00 €	- 475.000,00 €	- 475.000,00 €	- 475.000,00 €
1.180.370,00 €	1.180.370,00 €	1.180.370,00 €	1.180.370,00 €	1.180.370,00 €	1.180.370,00 €
165.370,00 €	705.370,00 €	705.370,00 €	705.370,00 €	705.370,00 €	705.370,00 €
217.720,00 €	923.090,00 €	1.628.460,00 €	2.333.830,00 €	3.039.200,00 €	3.744.570,00 €

TABLA 10: FLUJO DE CAJA (NETO Y ACUMULADO) AÑOS 5 A 10

El flujo de caja es un indicador importante de la solvencia de una empresa y de sus resultados financieros, ya que proporciona información sobre cómo gestiona sus ingresos, gastos e inversiones.

## 7. INDICADORES ECONÓMICOS

Para determinar la rentabilidad del proyecto, se emplean cuatro de las métricas más usadas: el *Payback*, el WACC, el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR).

### 7.1. PAYBACK

El *Payback* o periodo de recuperación es el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial a partir de los flujos de caja netos generados para el proyecto.

Como se ha presentado en la tabla 7, el tiempo de recuperación de la inversión es el cuarto año desde el inicio del proyecto. En ese cuarto año, el proyecto habrá conseguido poner en positiva la cuenta y a partir de ese punto se pueden proyectar otras inversiones con ese beneficio obtenido.

Que el retorno sea en el cuarto año siendo la inversión cercana a los tres millones de euros demuestra la solidez del proyecto indicado en un retorno rápido teniendo en cuenta factores de seguridad a mayores.

### 7.2. WACC

El WACC es la tasa de rendimiento que un proyecto necesita alcanzar a cubrir los costes de financiación de sus inversiones. [15]

En el presente proyecto y como se muestra en la [Tabla 11](#), se dispone de un capital propio del 80 % al que hay que retribuirle un beneficio mínimo del 12 %.

Capital Propio	80 %
Coste del Capital Propio	12 %
Deuda	20 %
Coste de la Deuda	5 %
Tasa Impositiva	25 %
WACC	10,4 %

TABLA 11: DATOS Y RESULTADOS DEL WACC

Por otro lado, se ha buscado un 20 % del proyecto como deuda con acreedores con un coste de deuda del 5 % que es considerablemente razonable para un proyecto minero.

Este indicador comprende el dinero que el proyecto ha solicitado prestado y del que tiene que devolver una rentabilidad.

En resumen, se trata del rendimiento mínimo que los inversores esperan obtener para compensar el riesgo de invertir en el proyecto.

Para el cálculo del WACC que se ha representado en la [Tabla 11](#), se ha tenido que utilizar la [Ecuación 22](#) del coste medio ponderado.

$$WACC = \frac{\sum_{i=1}^N r_i \cdot MV_i}{\sum_{i=1}^N MV_i} \quad (22)$$

Teniendo en cuenta una tasa impositiva del 25 % (la cual tiene un margen de error y variación comprendida en su interior), obtenemos un WACC del 10,4 %.

### 7.3. TIR

La TIR es la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero. Representa la rentabilidad del proyecto expresada como porcentaje. El TIR viene dado por la [Ecuación 23](#).

$$NPV = \sum_{n=0}^N \frac{C_n}{(1+r)^n} \quad (23)$$

En el presente proyecto se ha calculado la TIR y se ha obtenido un valor del 84 % lo que indica que el proyecto genera una rentabilidad interna del 84 % anual sobre el capital invertido. Es decir, si se invierte en ese proyecto, se obtendrá un rendimiento del 84 % cada año, suponiendo que los flujos de caja se reinvierten a esa misma tasa.

Este valor es sorprendentemente alto para un proyecto minero que suele asegurar confianza y regularidad por lo que es un atractivo grande para inversiones.

### 7.4. VAN

El VAN (Valor Actual Neto) representa cuánto valor genera un proyecto hoy en día (en valor presente), descontando los flujos futuros al valor actual usando una tasa de descuento (por ejemplo, el coste de oportunidad del capital) y se calcula como representado en la [Ecuación 24](#). [16]

$$VAN = \sum \frac{\text{Flujo neto de caja}}{(1+r)^t} - \text{Inversión Inicial} \quad (24)$$

Si el VAN es mayor que 0, el proyecto genera valor y si es negativo, este destruye valor. En el presente proyecto se ha calculado usando la fórmula antes mostrada y se ha obtenido un valor de 2.079.070 € lo que implica que es un proyecto que genera valor.

## 8. CAPEX vs OPEX

La inversión inicial, también conocida como *Capital Expenditure* (CAPEX), comprende todos los gastos incurridos antes de la puesta en marcha del proyecto.

Cuando hablamos de CAPEX, nos referimos a inversiones que hace la empresa pensando en el largo plazo. Son desembolsos importantes que no solo afectan bastante al flujo de caja, sino que además generan beneficios con el tiempo. Otro punto clave es que, al tratarse normalmente de activos físicos, estos se deprecian con los años. [17]

Los costes operativos, u *Operating Expenditure* (OPEX), corresponden a los gastos recurrentes para mantener la planta en funcionamiento.

Este está relacionado con los gastos corrientes de la empresa. Son necesarios para que todo funcione con normalidad: salarios, mantenimiento, suministros, etc. Lo bueno es que, si se optimizan bien los procesos, se pueden reducir bastante.

Estos dos aspectos claves para la viabilidad del proyecto quedan reflejados en las [Tablas 12 y 13](#) y representados en la [Figura 43](#).

CAPEX vs OPEX				
AÑOS	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4
GASTOS	- 1.015.000,00 €	- 1.015.000,00 €	- 1.015.000,00 €	- 1.015.000,00 €
INGRESOS	571.240,00 €	1.180.370,00 €	1.180.370,00 €	1.180.370,00 €

TABLA 12: CÁLCULO DE LOS COSTES CAPEX vs OPEX DEL AÑO 1 AL 4

CAPEX vs OPEX					
AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
- 475.000,00 €	- 475.000,00 €	- 475.000,00 €	- 475.000,00 €	- 475.000,00 €	- 475.000,00 €
1.180.370,00 €	1.180.370,00 €	1.180.370,00 €	1.180.370,00 €	1.180.370,00 €	1.180.370,00 €

TABLA 13: CÁLCULO DE LOS COSTES CAPEX vs OPEX DEL AÑO 5 AL 10

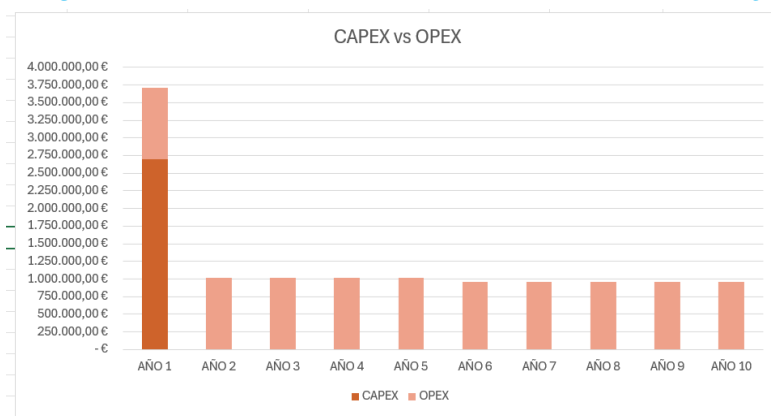


FIGURA 43: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL OPEX vs CAPEX

## 9. ESCALABILIDAD Y VALOR AÑADIDO SOCIAL

### 9.1. INDICADORES MEDIOAMBIENTALES

Como indicadores medioambientales se ha optado por cuantificar el ahorro de recursos (agua, arena) expresándolo como m<sup>3</sup> de agua reciclada y toneladas de arena no extraída anualmente.

#### 9.1.1. AHORRO DE AGUA

Como parte del análisis medioambiental global del proyecto, se ha cuantificado el volumen total de agua reciclada gracias a la implantación de un sistema de reutilización interna en circuito cerrado. La planta de lavado opera con un caudal de entrada de 262 m<sup>3</sup>/h, de los cuales se reciclan aproximadamente 215 m<sup>3</sup>/h, lo que supone una ratio de recirculación del 82 %. Considerando un régimen operativo de 3.801,6 horas en el primer año y 7.776 horas/año en los sucesivos, el sistema permite reutilizar 15.871.104 m<sup>3</sup> de agua en los 10 años de vida útil del proyecto. Esta cifra representa un ahorro masivo de recursos hídricos y una importante reducción en la extracción de agua fresca, alineándose con los principios del ODS 6 (agua limpia y saneamiento).

#### 9.1.2. REDUCCIÓN DE EXTRACCIÓN DE ÁRIDOS

Paralelamente, el proyecto permite valorizar arenas silíceas contenidas en balsas de lodos procedentes de plantas de depuración externas, evitando su desecho y, al mismo tiempo, la necesidad de extraer material virgen de canteras. Durante el primer año se estima una producción de 450.000 toneladas de arena lavada, aumentando a 930.000 toneladas anuales en los nueve años siguientes.

En conjunto, la planta evitará la extracción de aproximadamente 8.820.000 toneladas de arena natural, contribuyendo significativamente a la reducción del impacto ambiental asociado a la minería de áridos y alineando su desempeño con los principios del ODS 12 (producción y consumo responsables).

## 9.2. ESCALABILIDAD EN PAISES EN VÍAS DE DESARROLLO

El diseño de esta planta no solo responde a una necesidad local de valorización de arenas en procesos de depuración, sino que constituye un modelo de intervención escalable con impacto potencial en la mejora del acceso al agua en regiones vulnerables. Este enfoque refuerza el valor integral del proyecto desde un punto de vista técnico, económico, ambiental y social, alineando sus objetivos con las prioridades estratégicas internacionales en sostenibilidad.

El presente proyecto, además de alinearse con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en el contexto nacional y europeo, posee un alto potencial de transferencia y replicabilidad en países en vías de desarrollo. En estos territorios, el acceso a agua potable y la gestión eficiente de los recursos hídricos constituyen desafíos estructurales que comprometen la salud pública, la seguridad alimentaria y el desarrollo económico.

### 9.2.1. EJEMPLO DE APLICACIÓN EN ÁFRICA SUBSAHARIANA

En países como Etiopía, Malawi o Burkina Faso, las comunidades rurales dependen frecuentemente de fuentes de agua no tratadas o de infraestructuras rudimentarias. La falta de disponibilidad de arenas técnicas para filtros lentos limita la implantación de estos sistemas. La adaptación del presente modelo permitiría:

- La recuperación y tratamiento de arenas locales almacenadas en balsas de lodo y, sumado a un anexo del proyecto para la extracción de esta, supone una independencia de los territorios en cuanto al tratamiento de sus aguas para el consumo humano.
- La utilización de sistemas alimentados por energía solar para maximizar la autonomía operativa aprovechando los recursos abundantes y de poco coste operacional que se disfruta en estas zonas.
- La capacitación de técnicos locales en la operación y mantenimiento de los equipos lo que aumenta el nivel social del territorio avanzando en su desarrollo.
- La integración del proceso en modelos de economía social o microempresarial para aportar valor añadido a país y a la gente que lo habita.

Además, en situaciones de crisis humanitaria, como desplazamientos forzados por conflictos o catástrofes naturales, las infraestructuras tradicionales de tratamiento de agua suelen ser inexistentes o insuficientes. La implementación de plantas de lavado de arenas, basadas en este modelo, permitiría la generación rápida de medios filtrantes adecuados para sistemas de tratamiento de agua en campamentos temporales.

Al utilizar recursos locales y energía renovable, se reduce la dependencia de suministros externos y se garantiza una respuesta más ágil, eficaz y sostenible en contextos donde cada día sin agua potable tiene un alto coste humano. La estandarización y replicación del modelo en distintas regiones permitiría la creación de pequeñas unidades productivas encargadas del lavado y comercialización de arenas filtrantes. Esto abre la puerta a la generación de empleo directo e indirecto en zonas rurales, favoreciendo el arraigo territorial y la profesionalización de perfiles técnicos locales.

De este modo, el proyecto no solo contribuye a resolver una problemática técnica, sino que refuerza el tejido productivo local y mejora las condiciones de salud pública mediante el acceso a agua potable de forma sostenible y segura.

## 10. COMPARACIÓN Y CONCLUSIONES

En este apartado se busca estudiar las diferencias del proyecto con otras opciones que tendrían los clientes y, tras ello, recogerlo en la [Tabla 14](#) para reafirmar la necesidad para el cliente del proyecto.

Criterio	Planta fija de lavado	Planta móvil de tratamiento	Transporte a planta lejana	Construcción de planta (cliente)
<b>Inversión inicial (CAPEX)</b>	Alta (2,7 M€)	Media-alta (movilidad + diseño compacto)	Baja (costo externo del cliente)	Muy alta (equipos, obra civil)
<b>Costes operativos (OPEX)</b>	Moderado (personal + energía)	Altos (transporte, montaje/desmontaje)	Coste logístico	Altos (mantenimiento, energía, formación)
<b>Ingresos para tu empresa</b>	Directos (lavado + venta productos)	Medios (servicio itinerante por campaña)	Bajos o nulos (modelo solo logístico)	Nulos (cliente se independiza)
<b>Valor añadido generado</b>	Alto	Medio-alto (dependiente del lugar)	Bajo (material desaprovechado)	Variable (depende del diseño y operación)
<b>Control de calidad del proceso</b>	Alto (planta optimizada)	Medio (dependiente del terreno y logística)	Bajo (fuera de control propio)	Medio (depende de experiencia del cliente)
<b>Impacto ambiental</b>	Bajo (mercado circular)	Medio (transporte frecuente)	Alto (emisiones + vertidos)	Variable (depende de gestión interna)
<b>Logística y dependencia</b>	Mínima	Alta (permisos, tiempos)	Alta (terceros y rutas)	Nula (cliente autónomo)
<b>Requiere participación del cliente</b>	Baja (modelo de servicio completo)	Media (coordinación de campañas)	Alta (logística y planificación propia)	Muy alta (formación, operación, permisos)
<b>Aplicabilidad a ODS (agua, residuos)</b>	Muy alta	Alta (si bien intermitente)	Baja (sin valorización del residuo)	Media-alta (si se gestiona adecuadamente)
<b>Retorno económico y fidelización</b>	Alto (modelo continuo)	Medio (proyectos puntuales)	Bajo (modelo deslocalizado, sin control)	Bajo (el cliente puede dejar de necesitarte)

**TABLA 14: COMPARATIVA DE DISTINTOS PROYECTOS PARA EL LAVADO DE ARENAS**

Evaluando las diferentes opciones del mercado para los potenciales clientes de la planta se puede observar que subcontratar el lavado de arenas con una planta fija como la del proyecto es la mejor opción en casi todos los aspectos superando incluso a la propia instalación de una planta fija. La cantidad de arena a tratar por cada planta individual es insuficiente para justificar un desembolso tan grande en los equipos que componen dicha planta.

A modo de conclusiones, la planta de tratamiento de arenas propuesta en este proyecto representa una solución técnica y ambientalmente sólida para abordar simultáneamente dos desafíos clave: la gestión sostenible de residuos minerales y el suministro de materiales esenciales para la depuración de agua. Su diseño se apoya sobre pilares fundamentales como la valorización de materiales secundarios, la recirculación eficiente del agua de proceso y la producción de un subproducto con alto valor añadido como es la arena lavada de alta pureza granulométrica adecuada para filtros lentos.

Esta configuración permite convertir un residuo en una materia prima crítica para un proceso esencial como es el abastecimiento de agua potable.

La eficiencia energética y la automatización del proceso contribuyen a reducir significativamente las horas improductivas y los costes operativos lo que convierte a la planta no solo en una inversión rentable sino también en un modelo sostenible a largo plazo. El sistema de recirculación de agua permite alcanzar tasas de reutilización superiores al 80 % lo que minimiza el impacto hídrico y refuerza su alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible especialmente los ODS 6 y 12 relacionados con el agua limpia y la producción responsable. Además, el aprovechamiento de arenas descartadas en balsas de lodos reduce la necesidad de extracción de áridos naturales preservando ecosistemas y disminuyendo la huella ambiental del sector minero y de la construcción.

Este modelo de planta es fácilmente replicable y escalable en contextos geográficos distintos especialmente en países en vías de desarrollo donde la presión sobre los recursos hídricos y la necesidad de soluciones descentralizadas para el tratamiento de agua son especialmente acusadas. Su diseño modular permite adaptarlo a diferentes capacidades operativas en función del volumen de residuo disponible o la demanda de arena filtrante regional. La tecnología utilizada es madura robusta y no depende de insumos externos críticos lo cual la hace particularmente viable en zonas con infraestructuras limitadas o economías emergentes.

En conjunto esta planta no solo responde a una necesidad técnica inmediata, sino que propone una vía estratégica de desarrollo industrial basada en la circularidad de los materiales el uso eficiente de los recursos y la adaptación tecnológica a nuevos mercados. Su implementación a escala global podría suponer un cambio estructural en la forma de gestionar residuos de depuración y en la democratización del acceso a materiales clave para la potabilización del agua en regiones con alta vulnerabilidad hídrica y social.

Por último y para destacar la oportunidad económica que sería para cualquier inversor, se estima que aprovechando la simplicidad operativa de la planta y la constancia de ingresos que aseguran un flujo de caja estable, la inversión inicial se recuperaría en unos 4 años con una vida útil total de la planta de más de 20 años.



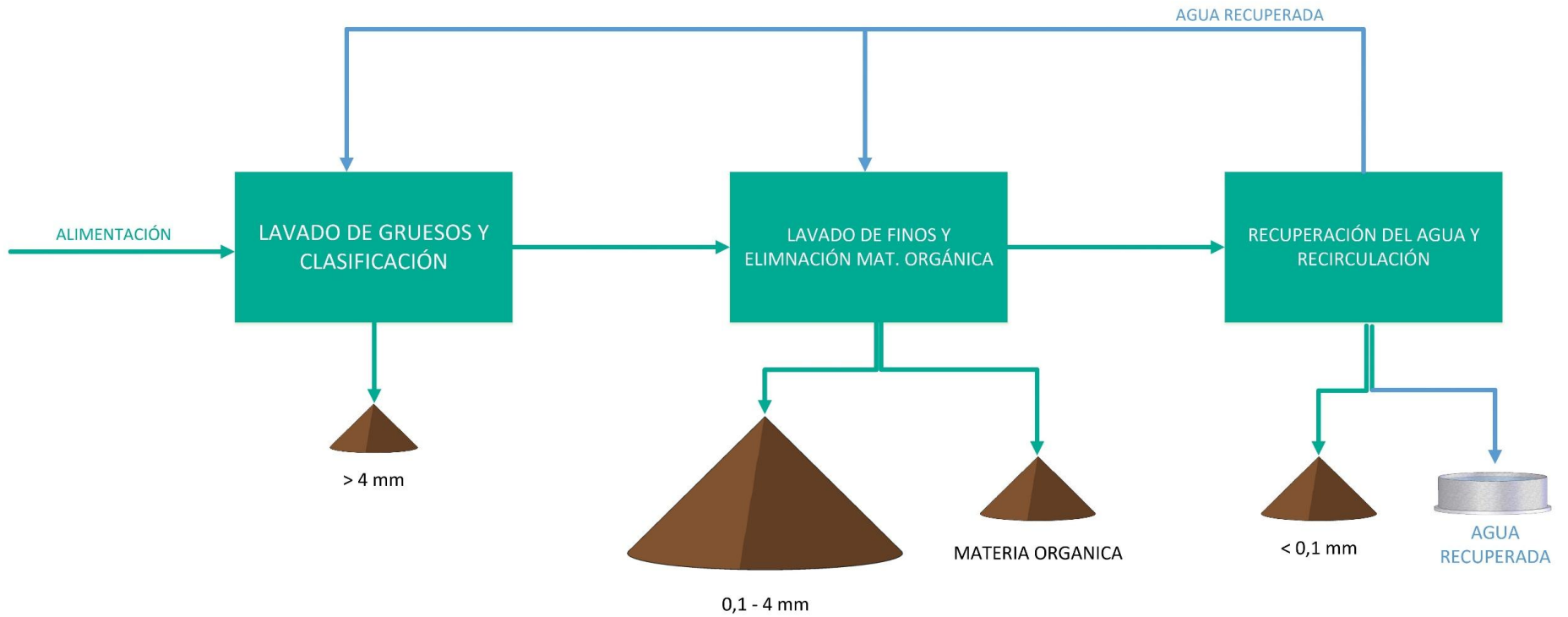
## BIBLIOGRAFÍA

- [1] World Health Organization, “Directrices sobre la Calidad del Agua Potable,” vol. Fourt Edition.
- [2] Advanced Mineral Processing, “Tanques Clarificadores AMP,” <https://ampmineral.com/eq/clarificadores-espesadores-hydrosilt/>.
- [3] Naciones Unidas, “Reporte sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible,” *Naciones Unidas - Edición Especial 2023*, pp. 1–80, 2023.
- [4] EUR-Lex, “Directiva 2014/52/UE del Parlamento Europeo,” <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2014-80824>, Apr. 2014.
- [5] EUR-Lex, “Directiva (UE) 2020/2184 ,” Dec. 2020.
- [6] Asociación Española de Normalización - UNE, “UNE-EN 12904:2006,” Feb. 2006.
- [7] European Union, “Directiva 89/391/CEE del Consejo, de 12 de junio de 1989, relativa a la aplicación de medidas para promover la mejora de la seguridad y de la salud de los trabajadores en el trabajo,” *EUR-Lex*, 2008.
- [8] “ISO 45001 de Seguridad y salud en el trabajo,” *AENOR*, 2024.
- [9] Emilio Andrea Blanco, “Proceso de Tratamiento de Mineral por Vía Seca,” Universidad de Cantabria, Santander.
- [10] Advanced Mineral Processing - AMP, “Escurridores Vibrantes Vibroflux,” <https://ampmineral.com/eq/escurridores-vibrantes-vibroflux/>.
- [11] Advanced Mineral Processing S.L., “Advanced Mineral Processing - AMP,” <https://ampmineral.com/>.
- [12] David Holmgren, *Permacultura*. Kaicron, 2020.
- [13] Alicia Raeburn, “Análisis FODA (o DAFO),” *ASANA*, Jul. 2024.
- [14] ESERP, “Flujo de Caja,” <https://es.eserp.com/articulos/que-es-el-flujo-de-caja/>.
- [15] infoautónomos, “WACC,” <https://www.infoautonomos.com/blog/que-es-wacc/>.
- [16] Víctor Velayos Morales and Andrés Sevilla Arias, “Valor actual neto (VAN),” <https://economipedia.com/definiciones/valor-actual-neto.html>, May 24, 2025.
- [17] Munich Business School, “CapEx,” <https://www.munich-business-school.de/es/l/diccionario-de-estudios-empresariales/capex#:~:text=En%20pocas%20palabras%2C%20el%20CapEx,operaciones%20diarias%20de%20la%20empresa..>



## **DOCUMENTO 3: ANEXOS**

## **ANEXO A: DIAGRAMA DE BLOQUES DE PROCESO**



<b>E.T.S. DE INGENIEROS DE MINAS y ENERGÍA</b>	
T: t/h sólido seco; M: m <sup>3</sup> /h pulpa; -x-: g/l concentración; W: m <sup>3</sup> /h agua; Peso Específico: t/m <sup>3</sup> <small>           Límites Planta de Tratamiento:            - Dentro de la línea: incluido            - Detrás de la línea: excluido         </small>	
TÍTULO DEL PROYECTO:	Autor: Pablo del Rey Respaldo Técnico: 
TÍTULO DEL PLANO:	Fecha: 08/05/2025
<b>DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO</b>	Nº de Plano:

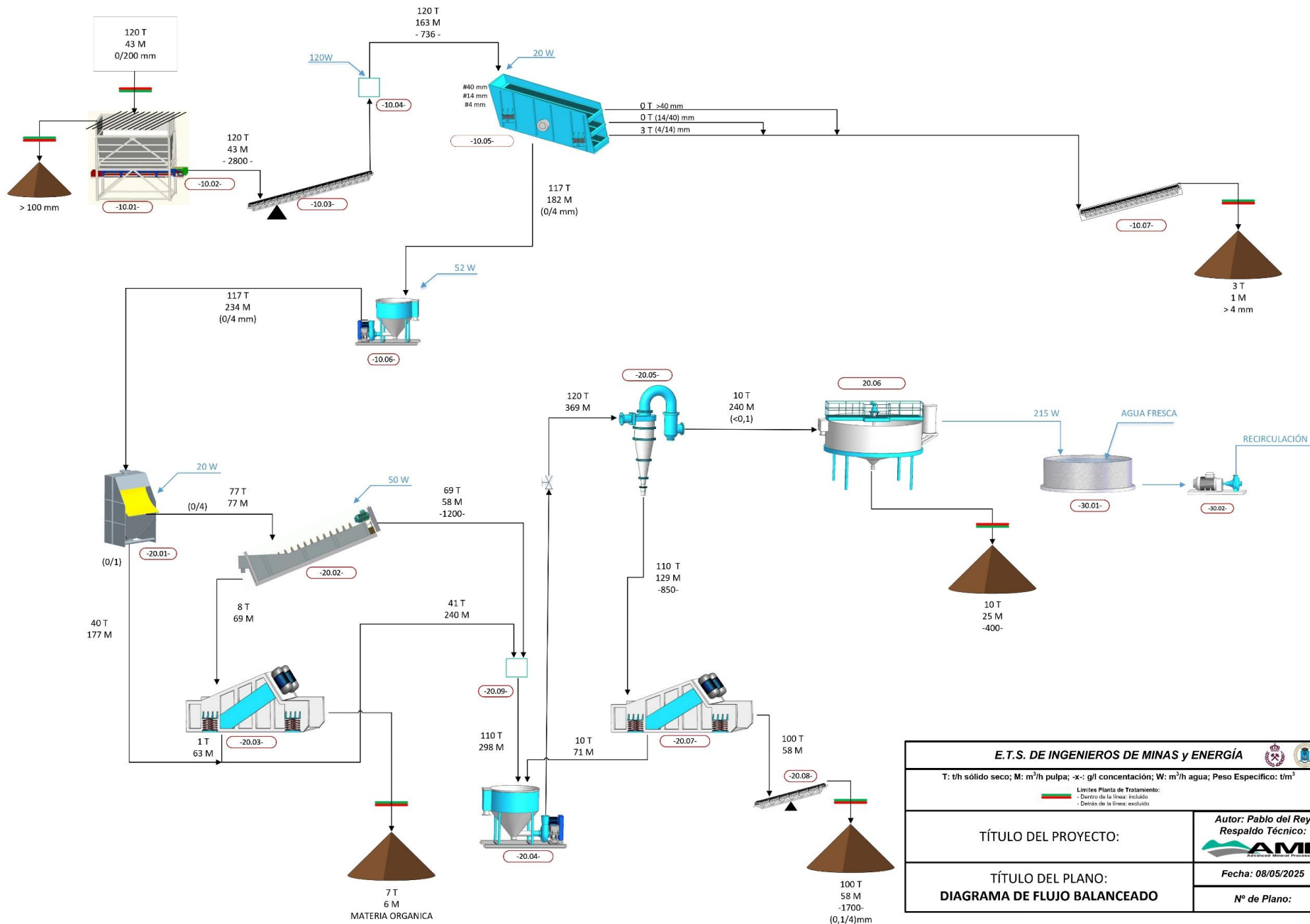
## **ANEXO B: DIAGRAMA DE BLOQUES DE EQUIPOS**



## **ANEXO C: DIAGRAMA DE FLUJO**

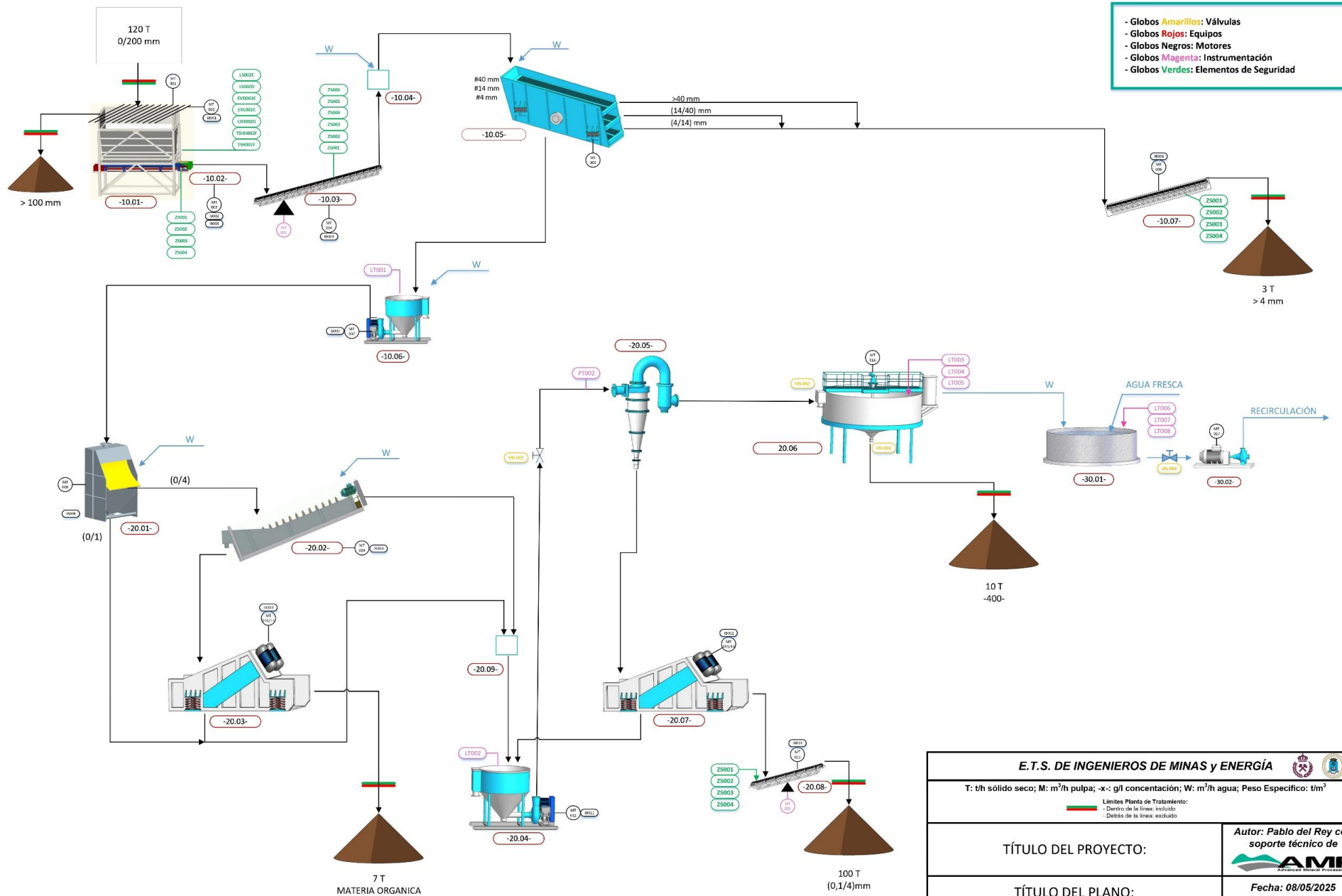


## **ANEXO D: DIAGRAMA DE FLUJO BALANCEADO**



<b>E.T.S. DE INGENIEROS DE MINAS y ENERGÍA</b>	
T: t/h sólido seco; M: m <sup>3</sup> /h pulpa; -x-: g/l concentración; W: m <sup>3</sup> /h agua; Peso Específico: t/m <sup>3</sup>	
Límites Planta de Tratamiento: - Dentro de la línea: incluido - Detrás de la línea: excluido	
TÍTULO DEL PROYECTO:	Autor: Pablo del Rey Respaldo Técnico: 
TÍTULO DEL PLANO:	Fecha: 08/05/2025
<b>DIAGRAMA DE FLUJO BALANCEADO</b>	Nº de Plano:

## **ANEXO E: SISTEMA SCADA DE LA PLANTA**



- Globos Amarillos: Válvulas
- Globos Rojos: Equipos
- Globos Negros: Motores
- Globos Magenta: Instrumentación
- Globos Verdes: Elementos de Seguridad

<b>E.T.S. DE INGENIEROS DE MINAS y ENERGÍA</b>	
T: t/h sólido seco; M: m <sup>3</sup> /h pulpa; -x-: g/l concentración; W: m <sup>3</sup> /h agua; Peso Específico: t/m <sup>3</sup> <small>           Límites Planta de Tratamiento:            - Dentro de la línea: incluido            - Del exterior de la línea: excluido         </small>	
TÍTULO DEL PROYECTO:	Autor: <b>Pablo del Rey</b> con soporte técnico de 
TÍTULO DEL PLANO:	Fecha: 08/05/2025
SISTEMA DE CONTROL DE LA PLANTA MEDIANTE SCADA	Nº de Plano: