

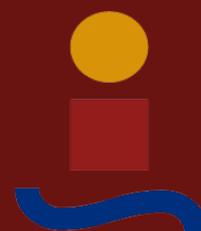
Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Química

# Valorización del rechazo de afino de las plantas de compost

Autor: José Manuel López Reche

Tutor: Antonio Morales Carrasco

**Depart. Ingeniería Química y Ambiental**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**  
**Sevilla, 2019**





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Química

# **Valorización del rechazo de afino de las plantas de compost**

Autor:  
José Manuel López Reche

Tutor:  
Antonio Morales Carrasco  
Profesor Asociado

Departamento de Ingeniería Química y Ambiental  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2019



# Trabajo Fin de Grado: Valorización del rechazo de afino de las plantas de compost

Autor: José Manuel López Reche

Tutor: Antonio Morales Carrasco

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal



# Agradecimientos

---

En primer lugar, agradecer a mis padres el apoyo incondicional que me profesan a diario, por brindarme una educación en valores y ayudarme siempre a conseguir los objetivos que me proponga.

A mi hermano, por ser un referente en todos los aspectos de mi vida y mostrarse pre-dispuesto a auxiliarme siempre que lo he requerido.

A Ana, por su empatía y comprensión durante todos estos años. Estoy seguro de que sin ti todo hubiera sido más difícil.

Por último, pero no por ello menos importante, agradecer la confianza depositada en mí para la realización de este trabajo a D. Antonio Morales, este trabajo no tendría razón de ser sin su ayuda y enseñanzas. Además, quería extender esta muestra de gratitud a todos y cada uno de los profesores que he tenido durante estos años por el buen trato recibido y por transmitirme todos los conocimientos empleados en él.



En los últimos años, la actividad antropogénica ha provocado que la cantidad de residuos generados haya aumentado. Por ello, desde los organismos europeos, nacionales y entidades locales se han estado promoviendo nuevas legislaciones con objeto de reducir, reutilizar y reciclar los residuos generados, y en definitiva, alcanzar un modelo de economía circular.

Un gran porcentaje de los residuos domésticos generados a diario son de tipo orgánico, a los que se le suele dar un tratamiento biológico para su estabilización, siendo una de las alternativas más extendidas la fermentación aerobia de estos residuos con el fin de producir compost. Sin embargo, la recogida selectiva de materia orgánica no es un modelo generalizado en Andalucía por lo que la materia orgánica se recoge mezclada con otras fracciones de impropios provocando que éstos acaben finalmente junto al compost producido. La naturaleza de estos impropios es muy variada, siendo una mezcolanza de materiales que no se han podido separar en fases previas como son por ejemplo el vidrio, trozos pequeños de plásticos o metales, material arenoso, etc.

Bajo este marco conceptual se engloba el presente trabajo, que tiene por objeto el diseño de la línea de recuperación de vidrio de una planta de compostaje. De esta forma se evita que el vidrio acabe mezclado con el compost o depositado en un vertedero junto al resto de rechazos, previniendo de los consecuentes perjuicios económicos y medioambientales que estos hechos conllevan.



In recent years, anthropogenic activity has produced that the amount of generated wastes has gone up. For this reason, European, national and local governments have been promoting new laws and legislations to reduce, reuse and recycle these generated wastes, in other words, to achieve a circular-economy model.

The organic fraction represents a high percent of daily household wastes, which is usually processed with biological treatments for its stabilization, being the production of compost from aerobic fermentation one of the most extended alternative. Nevertheless, the organic matter selective collection isn't a widespread model in Andalusia, so the organic matter is mixed with other improper fractions that finally appear in produced compost. Composition of impropers is extremely variable, a mixture of materials that hasn't been able to be separated in previous phases, such as glass, small plastic scrap or metal, sandy material, etc.

In this conceptual framework is based this work, whose aim is the design of the glass recovery line in a composting plant. By this way, it would be avoided that glass may be mixed with compost in the end, or even worse, it may be landfilled with the rest of rejections, preventing the economic and environmental drawbacks that these facts can lead.

<b>Agradecimientos</b>	<b>v</b>
<b>Resumen</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>Índice</b>	<b>x</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xii</b>
<b>1. Alcance, Justificación y Objetivos</b>	<b>1</b>
1.1 Alcance	1
1.2 Justificación	1
1.3 Objetivos	1
<b>2. Introducción</b>	<b>2</b>
2.1 Caracterización de los residuos domésticos en España	2
2.2 Los residuos orgánicos y su gestión	4
2.3 Plantas de compostaje en España	6
2.4 El proceso de compostaje	7
2.4.1 Preparación	7
2.4.2 Fermentación	8
2.4.3 Maduración	12
2.4.5 Afino	12
2.5 Recuperación del Vidrio	17
<b>3. Memoria Descriptiva</b>	<b>19</b>
3.1 Descripción del Proceso	19
3.2 Separador Magnético	21
3.3 Cribas	22
3.4 Separadores Ópticos	24
<b>4. Memoria de Cálculos</b>	<b>26</b>
4.1 Balance de Materia Previo	26
4.2 Cálculos Económicos Previos	34
4.3 Balance de Materia Completo para la Situación Óptima	42
4.4 Cálculos de Equipos	45
4.4.1 Cintas Transportadoras	45
4.4.2 Cribas	54
4.4.3 Trojes de Almacenamiento	56
<b>5. Implantación y Selección de Equipos</b>	<b>58</b>
5.1 Implantación	58
5.2 Selección de Equipos	60
<b>6. Balance Económico Final y Conclusiones</b>	<b>63</b>
6.1 Análisis de Sensibilidad	64
6.2 Conclusiones	66
<b>7. Bibliografía</b>	<b>67</b>

# Índice de Tablas

Tabla 1. Datos de cantidad de residuos recogidos por ambas modalidades	3
Tabla 2. Composición de los residuos domésticos en España	3
Tabla 3. Instalaciones de compostaje en España	6
Tabla 4. Parámetros del compost	13
Tabla 5. Categorización del compost según metales pesados	14
Tabla 6. Requisitos para el uso agrícola del material bioestabilizado	15
Tabla 7. Condiciones del vidrio recuperado	18
Tabla 8. Instalaciones con recuperación de vidrio.	19
Tabla 9. Balance de materia en el triaje de voluminosos	27
Tabla 10. Balance de materia en el trómel	28
Tabla 11. Balance de materia en el separador magnético	28
Tabla 12. Balance de materia en el proceso de compostaje	29
Tabla 13. Balance de materia en el trómel de afino	30
Tabla 14. Balance de materia en la mesa densimétrica	30
Tabla 15. Balance de materia en la separación magnética del afino	31
Tabla 16. Balance de materia en la criba vibrante	31
Tabla 17. Balance de materia en la criba de barras	32
Tabla 18. Balance de materia en el separador óptico de cabecera	32
Tabla 19. Balance de materia en el separador óptico de limpieza	33
Tabla 20. Estimación de la inversión inicial en equipos	35
Tabla 21. Flujos de caja para el escenario A	38
Tabla 22. Flujos de caja para el escenario B	39
Tabla 23. Flujos de caja para el escenario C	41
Tabla 24. Caracterización de la entrada a compostaje	43
Tabla 25. Caracterización de la entrada a la línea de recuperación de vidrio	43
Tabla 26. Caracterización de la salida de vidrio recuperado	44
Tabla 27. Cuadro resumen de las cintas transportadoras de la instalación	53
Tabla 28. Hoja de requisitos mínimos del separador magnético	60
Tabla 29. Hoja de requisitos mínimos de la criba vibrante	60
Tabla 30. Hoja de requisitos mínimos de la criba de barras	61
Tabla 31. Hoja de requisitos mínimos del separador óptico de cabecera	61
Tabla 32. Hoja de requisitos mínimos del separador óptico de limpieza	62
Tabla 33. Balance económico para la situación óptima	63
Tabla 34. VAN para las diferentes situaciones del análisis de sensibilidad	65

# Índice de Figuras

---

Figura 1. Materia orgánica previa al compostaje	4
Figura 2. Proceso de biometanización	5
Figura 3. Diagrama del proceso de compostaje	7
Figura 4. Trómel	8
Figura 5. Reacción general de fermentación	8
Figura 6. Reacción mesófila	8
Figura 7. Reacción termófila	9
Figura 8. Proceso general de fermentación	9
Figura 9. Compostaje en hileras	10
Figura 10. Compostaje en pila estática aireada	11
Figura 11. Sistema cerrado de fermentación	11
Figura 12. Compost madurando	12
Figura 13. Funcionamiento mesa densimétrica	17
Figura 14. Infografía de los destinos del vidrio generado	18
Figura 15. Diagrama de proceso completo	20
Figura 16. Diagrama de proceso de la línea de recuperación de vidrio	21
Figura 17. Separador magnético de tambor	22
Figura 18. Criba vibrante	23
Figura 19. Criba de barras	24
Figura 20. Funcionamiento de un separador óptico	24
Figura 21. Separador óptico	25
Figura 22. Balance de materia previo	33
Figura 23. Balance de materia para la situación óptima	42
Figura 24. Plano en planta de la línea de recuperación de vidrio	58
Figura 25. Vista lateral de la línea de recuperación de vidrio	59

# 1. Alcance, Justificación y Objetivos

---

## 1.1 Alcance

En este trabajo se pretende realizar el diseño básico de la línea de recuperación de vidrio en una planta de compostaje. Además, se ha hecho un estudio económico acerca de la rentabilidad de la inversión que supone la colocación de la nueva línea, calculando la cantidad de residuos que se deben tratar para que sea rentable.

## 1.2 Justificación

La mayoría de las plantas de gestión de residuos en España poseen una línea de compostaje en la que tratan los residuos de carácter orgánico, obteniendo finalmente un producto conocido como compost/material bioestabilizado. Este material tiene poco mercado y es difícil de vender debido a diversos motivos, como es la baja calidad del producto ya que se halla mezclado con una alta cantidad de impropios, principalmente vidrio. Habitualmente estos rechazos generados en la planta de compostaje se depositan en vertedero provocando el despilfarro de un material valioso.

Una de las alternativas viables para paliar esta situación es la adición de una línea que consiga el aprovechamiento de estos rechazos por lo que su análisis será el objeto y la justificación de este proyecto.

## 1.3 Objetivos

Los objetivos de este proyecto son:

- Conocer en profundidad el proceso de compostaje y las distintas configuraciones existentes en las plantas de compostaje de residuos orgánicos en masa.
- Desarrollar el balance de materia y la caracterización de todas las corrientes de la planta de compostaje, o al menos, de aquellas que estén relacionadas con el proyecto.
- Aprender el funcionamiento de todos los equipos implicados en el proceso de compostaje y en la recuperación de vidrio, atendiendo especialmente al motivo por el cual se usan.
- Realizar una búsqueda bibliográfica para estudiar la tecnología de recuperación de vidrio usada en las plantas de compostaje existentes y seleccionar aquella tecnología más adecuada para alcanzar los objetivos propuestos.
- Realizar el diseño básico y/o las especificaciones mínimas de los principales equipos utilizados en la planta de recuperación de vidrio.
- Plantear un análisis económico de la adición de la nueva línea de recuperación de vidrio, calculando los residuos que serían necesarios tratar para que la inversión fuera rentable y finalmente realizar un análisis de sensibilidad de la misma ante posibles cambios en las condiciones de diseño.

## 2. Introducción

---

### 2.1 Caracterización de los residuos domésticos en España

La ley 22/2011, 28 de julio, de residuos y suelos contaminados establece la definición de residuo doméstico como *"residuos generados en los hogares como consecuencia de las actividades domésticas. Se consideran también residuos domésticos los similares a los anteriores generados en servicios e industrias"*.

Los hábitos y estilos de vida de los ciudadanos provocan que la cantidad generada de estos desechos vaya en aumento y por lo tanto es obvio que la gestión de éstos suponga un gran reto para la sociedad actual.

En España, la competencia de la gestión de los residuos domésticos recae sobre los entes locales que habitualmente se agrupan por medio de mancomunidades para tratar estos desechos de una forma conjunta entre todas estas entidades, atendiendo al principio de proximidad, ampliamente difundido en todas las directivas europeas de residuos y que impone que los residuos deben ser eliminados lo más cerca posible a su origen.

Por norma general, estas mancomunidades instalan 4 tipos de contenedores para la recogida de los residuos domésticos:

-Contenedores de recogida selectiva: bajo esta modalidad los ciudadanos segregan en distintas fracciones los residuos que generan y posteriormente los depositan en los contenedores destinados única y exclusivamente a esa fracción. Las fracciones que se suelen recoger de esta manera son el papel y cartón, el vidrio y envases.

-Contenedor de recogida de la fracción resto: el ciudadano deposita en el contenedor colocado a tal efecto los residuos que no tienen recogida selectiva, incluyendo la fracción orgánica. Desgraciadamente, en este contenedor los ciudadanos también depositan residuos que deberían recogerse separadamente, como por ejemplo el vidrio.

Las ventajas que aporta la recogida selectiva sobre la de residuos mezclados son bastante notables. Se consigue separar los residuos sin que hayan sido mezclados con otras fracciones por lo que no están contaminados con fracciones de materiales impropios. Además, se evita que los residuos tengan que ser procesados en una planta de tratamiento de residuos, que, al fin y al cabo, su diseño y operación representan grandes inversiones con el fin de obtener rendimientos de separación pobres.

La decisión acerca de separar o no los residuos en los domicilios corresponde a los propios ciudadanos y de acuerdo a sus convicciones personales decidirán que opción escoger. En España, los datos no son muy halagüeños ya que según el Ministerio de Transición Ecológica en su memoria anual de generación y gestión de residuos de competencia municipal para el año 2016 (MITECO) [1] sólo el 16% de la totalidad de los residuos generados en España son recogidos selectivamente:

## Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost

MODALIDAD DE RECOGIDA	TONELADAS/AÑO	PORCENTAJE
Residuos mezclados	17.141.367	84%
Residuos recogidos selectivamente	3.266.518	16%

Tabla 1. Datos de cantidad de residuos recogidos por ambas modalidades  
Fuente [1].

Igualmente, es bastante relevante conocer la composición de los residuos domésticos generados en España, aunque estos datos son difíciles de cuantificar ya que están ligados a los factores socioeconómicos de las personas que generan los residuos. Los datos más fiables son los recopilados por el Plan Estatal Marco de Residuos (PEMAR, 2016-2022) [2]:

FRACCIÓN	PEMAR (2015)
Materia Orgánica	49%
Papel y Cartón	15%
Plásticos	9%
Vidrio	8%
Metales	3%
Textil	5%
Otros	11%

Tabla 2. Composición de los residuos domésticos en España  
Fuente [2].

En España se genera una cantidad aproximada de 1,35 kg de residuos domésticos por habitante y día. Esta cantidad es muy variable (período del año, nivel de vida, etc.) pero ha sido el valor tomado como referencia a la hora de realizar el balance de masa.

## 2.2 Los residuos orgánicos y su gestión

Se conocen como residuos orgánicos los desechos de carácter biodegradable procedentes de podas, jardines y restos de comida. En la tabla 2 del apartado anterior, se observa como esta fracción supone prácticamente el 50% de los residuos domésticos generados. Este hecho conlleva que su gestión sea de vital importancia, como así se indica en el Plan Director Territorial de Residuos No Peligrosos de Andalucía 2010-2019 [3]. En él, se establecen medidas para impulsar la recogida selectiva de los residuos orgánicos, fomentando el tratamiento de estos biorresiduos mediante plantas de compostaje y de biometanización e impidiendo su deposición directa en vertederos.

Por consiguiente, los procesos de tipo biológico que se utilizan para gestionar los residuos orgánicos son:

-Compostaje:

En el real decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes se define el compostaje como "*proceso controlado de transformación biológica aeróbica y termófila de materiales orgánicos biodegradables que da lugar a distintos tipos de abonos o enmiendas orgánicas*". En este proceso se somete a los residuos orgánicos a una descomposición, en presencia de aire, producida por la acción de ciertos microorganismos, obteniéndose finalmente un material higienizado, rico en materia orgánica y estable, al que se le denomina compost/material bioestabilizado.

Los residuos orgánicos susceptibles de ser utilizados en el compostaje son: la fracción orgánica de los residuos domésticos mezclados, la fracción orgánica recogida selectivamente, los lodos desecados de las estaciones depuradoras de aguas residuales y los fangos que aparecen finalmente tras un proceso previo de biometanización.



Figura 1. Materia orgánica previa al compostaje

Fuente [4].

# Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost

## -Biometanización:

A este proceso también se le denomina digestión anaerobia debido a que se consigue la transformación de la materia orgánica biodegradable en ausencia de oxígeno. Con el uso de esta tecnología se consigue la estabilización de la materia orgánica y la generación de biogás, que posteriormente se valoriza energéticamente.

El proceso biológico es bastante complejo debido a la simultaneidad de muchas reacciones y a la acción de microorganismos de distinta índole, pudiéndose reducir a la siguiente descripción:

En primer lugar, se lleva a cabo la hidrólisis de las moléculas complejas, transformándose seguidamente, gracias a la acción bacteriana, en compuestos de peso molecular medio como ácidos grasos. Estos ácidos sufren alteraciones en su naturaleza y se forman ácido acético y dióxido de carbono principalmente. Por último, del ácido acético se origina metano, siendo, este último, el componente mayoritario del biogás generado.

Este biogás producido tiene un alto poder calorífico y se usa para generar electricidad en las propias plantas de biometanización.

Los lodos estabilizados, por su parte, suelen ser desecados y sometidos a compostaje.

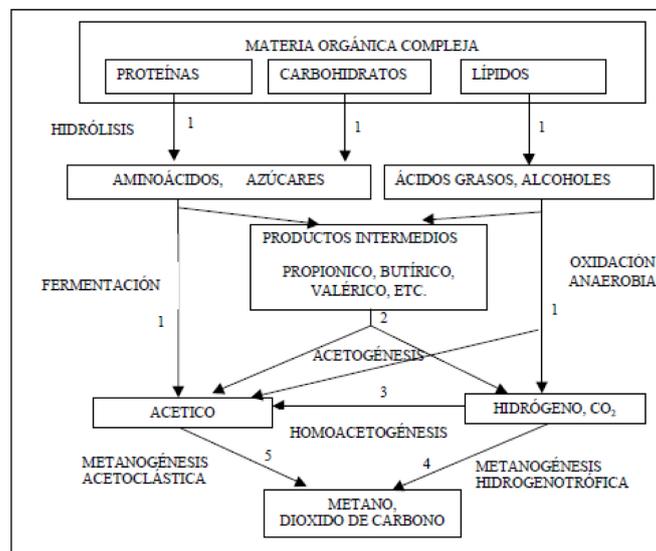


Figura 2. Proceso de biometanización

Fuente [5].

## 2.3 Plantas de compostaje en España

En España hay un total de 143 instalaciones de compostaje. De acuerdo a la memoria anual de generación y gestión de residuos de competencia municipal para el año 2016 [1], estas plantas se dividen en:

TIPO DE INSTALACIÓN	NUMERO DE INSTALACIONES	TONELADAS GESTIONADAS (2016)
Instalaciones de compostaje de fracción orgánica recogida separadamente	47	414.898
Instalaciones de triaje y compostaje	66	8.079.452
Instalaciones de triaje, biometanización y compostaje de fracción orgánica recogida selectivamente	8	260.761
Instalaciones de triaje, biometanización y compostaje	22	3.139.926

Tabla 3. Instalaciones de compostaje en España

Fuente [1].

De los datos publicados se observa como las instalaciones de triaje y compostaje son las más numerosas en todo el territorio español, gestionando una cantidad de residuos muy superior a la del resto de instalaciones. Además, se hace visible como las instalaciones de compostaje que procesan los residuos orgánicos recogidos selectivamente suponen la segunda opción en cuanto al número de instalaciones. Este hecho concuerda con las directrices promovidas por parte de la Unión Europea en la que insta a aumentar la recogida por este medio, teniendo como objetivo la adición del contenedor destinado a la recogida selectiva de materia orgánica para el año 2020. Sin embargo, en España aún no se ha generalizado este modelo, excepto en algunas zonas de Cataluña, País Vasco y Galicia, por lo que los residuos gestionados por este sistema siguen significando un porcentaje muy pequeño de la totalidad de residuos generados. En Andalucía la recogida selectiva de residuos orgánicos es minoritaria.

Las instalaciones de triaje y compostaje se caracterizan por gestionar los residuos que no proceden de la recogida selectiva, es decir, los desechos que no han sido segregados en distintas fracciones en origen. Como consecuencia de ello, el objetivo de estas plantas es separar mecánicamente los distintos materiales recuperables, como los metales, los envases de plástico o el papel y cartón, enviando al vertedero aquellos materiales que no se han conseguido diferenciar del resto. La fracción orgánica también se separa del resto y se envía a la planta de tratamiento biológico o compostaje.

## 2.4 El proceso de compostaje

El proceso de compostaje se compone de las siguientes etapas:

DIAGRAMA DE PROCESO DE COMPOSTAJE

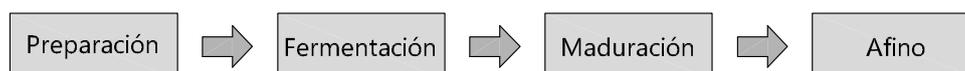


Figura 3. Diagrama del proceso de compostaje

Fuente: Elaboración propia.

### 2.4.1 Preparación

En esta primera etapa se realiza una separación previa de la fracción orgánica que será la que sufra el proceso de compostaje. Este paso es de vital importancia de cara al resultado final del compost/material bioestabilizado ya que si se evita que la materia orgánica esté mezclada con otros materiales que puedan ser compostados, se consigue que la contaminación de compost/material bioestabilizado al final del proceso sea mínima y como consecuencia se aporta mayor calidad al producto. A lo largo de los últimos años se han realizado investigaciones en este aspecto, como el de Montejo, C. (2015) [6] en los que se deduce como la recogida selectiva de la fracción orgánica con la producción de compost/material estabilizado de excelentes propiedades, pudiendo competir incluso con los compost comercializados y no provenientes de la transformación de los residuos orgánicos.

Habitualmente en las instalaciones de triaje y compostaje, los residuos domésticos entran en la planta y la adecuación previa se realiza por medio de un triaje manual en el que se separan los materiales voluminosos. Seguidamente, los residuos pasan a un trómel, que es un equipo rotatorio en el que se les criba, separándolos en dos corrientes diferenciadas: una corriente de material fino que se ha hundido a través del propio equipo, compuesta principalmente por material orgánico, y una línea de gruesos, la cual sale del equipo por rebose, que se encuentra conformada por las fracciones de mayor tamaño, como los envases, plásticos, etc. De esta forma, se consigue aislar los residuos orgánicos y separarlos del resto. También, es muy frecuente colocar, en la línea de hundidos del trómel, un equipo de separación magnética con objeto de recuperar los materiales férricos antes de que los residuos entren en el proceso de compostaje propiamente dicho.

En el trómel, debido al principio de operación del mismo, el vidrio choca contra las

paredes, se rompe y fragmenta por lo que la mayor parte pasará a la fracción fina del hundido, mezclado con la materia orgánica.



Figura 4. Trómel  
Fuente [7].

## 2.4.2 Fermentación

En el proceso de fermentación se lleva a cabo la siguiente reacción[8]:



Figura 5. Reacción general de fermentación  
Fuente [8].

Tras la fase previa de preparación, los microorganismos contenidos en los propios residuos comienzan a fermentar los restos orgánicos con mayor facilidad para degradarse. Este primer paso ocurre a temperaturas bajas y es promovido por bacterias principalmente, dándose lugar la siguiente reacción:



Figura 6. Reacción mesófila  
Fuente [8].

Rápidamente la temperatura sube, llegando a alcanzar temperaturas superiores a los 60 °C. En este punto se observa como la población microbiana ha cambiado, dando lugar a la fase termófila, donde se sigue oxidando la materia orgánica más estable, se eliminan los microorganismos patógenos y se genera CO<sub>2</sub> y Agua.

## Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost



Figura 7. Reacción termófila

Fuente [8].

A medida que pasa el tiempo, los microorganismos empiezan a quedarse sin materia orgánica susceptible para la degradación por lo que su actividad decrece, de manera paulatina la temperatura del conjunto comienza a disminuir e iniciándose la fase de enfriamiento o estabilización.

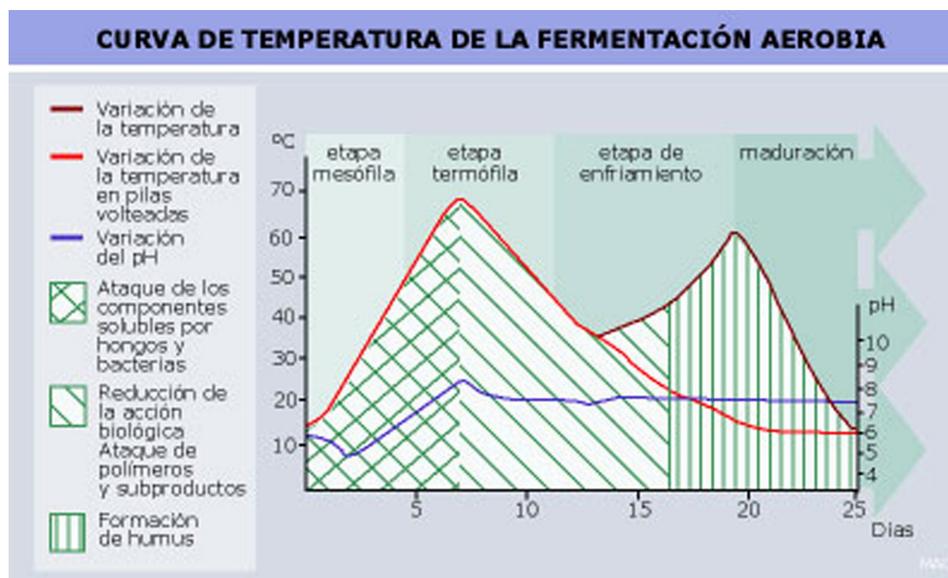


Figura 8. Proceso general de fermentación

Fuente [9].

El proceso de fermentación acaba cuando se observa que la temperatura no varía después de varios volteos sucesivos de la materia orgánica. La duración total de esta fase está íntimamente ligada a la composición de alimentación de residuos orgánicos y a la tecnología usada para tal fin, siendo usual una duración entre 2-3 semanas para sistemas cerrados y 8-10 semanas para sistemas abiertos.

Las alternativas más utilizadas para llevar a cabo la fermentación son:

-**Sistemas Abiertos:** son sistemas más rudimentarios por lo que requieren menores inversiones y menores costes operacionales. Como contrapartida, necesitan una mayor área de operación y el control de los parámetros involucrados durante el proceso (Temperatura, pH, etc) está más limitado. Dentro de estos sistemas se encuentran:

### a) Compostaje en hileras.

Es el sistema más utilizado y consiste en depositar la materia orgánica en hileras para su fermentación. Las dimensiones de la hilera vendrán impuestas por la volteadora, pero las medidas frecuentes de estas pilas suelen rondar los 2 metros de altura por 5 metros de ancho en la base. La aireación de la hilera se lleva a cabo por medio de volteos periódicos.



Figura 9. Compostaje en hileras  
Fuente [10].

### b) Compostaje en pila estática con aireación forzada.

Igualmente, se sitúan los residuos orgánicos formando una hilera de 2 metros aproximadamente, pero esta vez, la hilera se coloca sobre una serie de canalículos y tuberías, conectadas a un ventilador, que procede a inyectar aire de acuerdo a las necesidades. Como recubrimiento de la pila se emplea una capa de compost/material bioestabilizado ya maduro con el fin de controlar los olores. Además, este sistema no requiere de equipos para el volteo de la pila y el control de los parámetros del conjunto se realiza por medio de la regulación del ventilador.

## Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost



Figura 10. Compostaje en pila estática aireada  
Fuente [11].

**-Sistemas Cerrados:** al ser sistemas más complejos necesitan un mayor desembolso económico tanto para su construcción como para su operación. Sin embargo, este empleo de tecnología más sofisticada permite reducir drásticamente el tiempo de fermentación y además facilita el control continuo de todas las variables del proceso.

Entre estos sistemas se encuentran: el compostaje en tambor rotatorio, el compostaje en contenedor y el compostaje en túneles.



Figura 11. Sistema cerrado de fermentación  
Fuente [12].

Por regla general, en la toma de decisiones acerca de la tecnología que adoptar para la fermentación, se suele seleccionar aquella que es más favorable desde el punto de vis-

ta económico por lo que las opciones de sistema abierto son las comunes en España.

### 2.4.3 Maduración

Los residuos orgánicos ya fermentados se desplazan a otro lugar para que maduren. En este proceso no se voltea la mezcla, la temperatura permanece invariable y la materia orgánica tiene a degradarse aún más en componentes elementales.

La maduración se realiza, como norma general, en pilas estáticas por lo que la duración de esta fase es de 8 semanas aproximadamente.



Figura 12. Compost madurando

Fuente [13].

El vidrio, al ser un inerte, pasa inalterado tanto por la etapa de fermentación como por la etapa de maduración.

### 2.4.5 Afino

El real decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes y la ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados define el compost como "*Producto higienizado y estabilizado, obtenido mediante descomposición biológica aeróbica (incluyendo fase termofílica), bajo condiciones controladas, de materiales orgánicos biodegradables y recogidos separadamente*". Además, esta normativa impone una serie de contenidos mínimos, máximos y criterios de etiquetado que se recogen en la siguiente tabla:

## Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost

CONTENIDO MÍNIMO Y MÁXIMO	CRITERIOS DE ETIQUETADO Y DENOMINACIÓN	CONTENIDOS EN NUTRIENTES QUE DEBE DECLARARSE
<p>Materia orgánica total mínima: 35%.</p> <p>Humedad máxima: 40%.</p> <p>Relación Carbono/Nitrógeno &lt; 20.</p> <p>Las piedras y gravas eventualmente presentes de diámetro superior a 5 mm, no superarán el 2%.</p> <p>Las impurezas (metales, vidrios y plásticos) eventualmente presentes de diámetro superior a 2 mm, no superarán el 1,5%.</p> <p>El 90% de las partículas pasarán por la malla de 25 mm.</p>	<p>pH.</p> <p>Conductividad eléctrica.</p> <p>Relación Carbono/Nitrógeno.</p> <p>Humedad mínima y máxima.</p> <p>Materias primas utilizadas.</p> <p>Tratamiento o proceso de elaboración</p>	<p>Materia orgánica total.</p> <p>C orgánico.</p> <p>N total (si supera el 1%). N orgánico (si supera el 1%).</p> <p>N amoniacal (si supera el 1%).</p> <p>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total (si supera el 1%).</p> <p>K<sub>2</sub>O total (si supera el 1%).</p> <p>Ácidos húmicos.</p> <p>Granulometría.</p>

Tabla 4. Parámetros del compost

Como puede observarse, el real decreto obliga que el compost tenga una granulometría (percentil 90 < 25 mm) y una cantidad mínima de impurezas. Por ello, si se desea comercializar el compost, es necesario una etapa de afino.

En el anexo 5 del real decreto se establece una categorización en tres clases del compost de acuerdo al contenido máximo en metales pesados:

METAL PESADO	LÍMITES DE CONCENTRACIÓN EN MG/KG		
	CLASE A	CLASE B	CLASE C
Cadmio	0,7	2	3
Cobre	70	300	400
Níquel	25	90	100
Plomo	45	150	200
Zinc	200	500	1.000
Mercurio	0,4	1,5	2,5
Cromo (Total)	70	250	300
Cromo (VI)	No detectable	No detectable	No detectable

Tabla 5. Categorización del compost según metales pesados

El compost, según la normativa vigente, se puede utilizar como sustrato o soporte de cultivo, como enmienda orgánica mejorando las propiedades biológicas del suelo y como abono orgánico, aportando nutrientes a las plantas.

Como ya se ha comentado con anterioridad, la recogida selectiva de la fracción orgánica sigue significando un porcentaje muy pequeño del total de residuos orgánicos generados. Muestra de ello es que en el año 2016 675.659 toneladas se recogieron por medio de la recogida separada frente a las 8.399.269 toneladas correspondientes a los residuos de carácter orgánico mezclados con otras fracciones y que se gestionan en el resto de las instalaciones de triaje y compostaje [1] ,[2]. En términos porcentuales la recogida selectiva de la materia orgánica supone un 7,4 % respecto al total de residuos orgánicos generados. Esta situación provoca que, al resto de la materia orgánica, la cual no ha sido recogida selectivamente, no se le pueda denominar compost, aunque haya sufrido la degradación en el proceso de compostaje, pasando a denominarse en lugar material bioestabilizado, como así se hace especial mención en la ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. De acuerdo a esto, se puede inferir que la legislación vigente solo permite el uso con fines agrícolas del compost e impide el uso de material bioestabilizado debido a su procedencia (fracción orgánica de los residuos domésticos mezclado) en lugar de su calidad final (CONAMA,2016) [14]. Esta connotación legal tiene consecuencias negativas de cara a la venta del material bioestabilizado ya que limita sus posibles salidas y restringe sus futuros usos, lo que conlleva que sea una opción menos favorable para posibles compradores, hecho que se demuestra en la dificultad que tienen las plantas de triaje y compostaje para vender

## Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost

el producto obtenido, teniendo incluso que recurrir a su deposición en vertedero.

El antiguo ministerio de agricultura y medioambiente realizó en el año 2013 un decálogo (MAGRAMA, 2013) [15] acerca de los parámetros que debe tener el material bioestabilizado para su utilización en el tratamiento de los suelos que produzca una mejora ecológica de los mismos:

<b>REQUISITOS DEL MATERIAL BIOESTABILIZADO</b>	
<b>PARÁMETROS AGRONÓMICOS</b>	<b>VALOR</b>
Materia Orgánica Total	≥25%
Humedad	20-40%
Relación C/N	<20
Partículas que pasan por la malla de 25 mm	≥90%
<b>IMPUREZAS</b>	<b>VALOR</b>
Las piedras y gravas, eventualmente presente, de diámetro superior a 5mm	≤5%
Las impurezas(metales, vidrios y plásticos) eventualmente presentes de diámetro superior a 2 mm	≤3%
<b>MADUREZ</b>	<b>VALOR</b>
RotteGrade	Mínimo III
<b>HIGIENIZACIÓN</b>	<b>VALOR</b>
Salmonella	Ausente en 25g de material bioestabilizado
Escherichia Coli	<1.000 NMp/g
<b>METALES PESADOS</b>	<b>VALOR EN MG/KG DE MATERIA SECA</b>
Cadmio	<3
Cobre	<400
Níquel	<100
Plomo	<200
Zinc	<1.000
Mercurio	<2,5
Cromo (Total)	<300

Tabla 6. Requisitos para el uso agrícola del material bioestabilizado

Fuente [15].

Este decálogo establece que la decisión final acerca de la posibilidad de este uso agrícola del material bioestabilizado, recae sobre las comunidades autónomas. Sin embargo, al no existir un marco normativo claro, la mayoría de entidades autonómicas no aborda en sus legislaciones medioambientales tal uso o lo prohíbe directamente por lo que el material bioestabilizado es utilizado únicamente para la restauración de suelos degradados, como cobertura de vertederos y en menor medida para la valorización energética en plantas de coincineración [14].

Es totalmente congruente que este proceso de afino sea de gran importancia de acuerdo a la obtención de un material final con buenas propiedades y libre de impropios. Para tal fin, se suele utilizar en primer lugar un equipo que criba el material, como por ejemplo un trómel o una criba vibrante, siendo el trómel la opción más habitual. Este equipo es similar al que se utiliza en la preparación de la fracción orgánica, pero con dimensiones menores. El criterio más importante de diseño del trómel será la luz de malla ya que su función es la de dejar pasar todo el compost/material bioestabilizado y retirar el rebose de material grueso que no ha podido rebasar la malla, compuesto principalmente de materiales impropios. Es obvio que, si se selecciona una luz de malla muy grande, todo el compost/material bioestabilizado irá a la fracción hundida, pero conllevará una mayor presencia de impropios en el material hundido. Por el contrario, si se elige una luz de malla muy pequeña, el compost/material bioestabilizado de la línea de hundidos tendrá una alta pureza, pero parte de él saldrá del trómel por el rebose, hecho que no debería ocurrir ya que los reboses del trómel suelen terminar depositados en vertedero y de esta forma se enviaría compost/material bioestabilizado al mismo. De acuerdo al real decreto 506/2013, de 28 de junio, sobre productos fertilizantes, el compost/material bioestabilizado debe cumplir que el 90% del mismo pase por una malla de 25 mm, siendo ésta la medida usual de la luz de malla del trómel.

La línea de hundidos, en la que el compost/material bioestabilizado es el componente mayoritario, pasa a una mesa densimétrica. Este equipo está conformado por una criba vibrante rugosa y perforada, la cual es atravesada una corriente de aire. En su interior, el material cae sobre la criba y gracias al movimiento oscilante provoca que los materiales más pesados asciendan por la mesa. El material menos denso, en cambio, es arrastrado por la corriente de aire ascendente y por gravedad acaba cayendo en sentido contrario al de los otros materiales más densos. Los parámetros más decisivos en el diseño de estos equipos son el grado de inclinación de la mesa y el caudal de aire que impulsa el ventilador ya que están muy relacionados con el rendimiento de separación que se obtiene. Fruto de la utilización de este equipo, se consigue separar el flujo original en 3 líneas distintas: un flujo de material grueso que se envía a vertedero, un flujo de material con un tamaño y densidad pequeños que han sido arrastrados por el caudal de aire, siendo recogidos por el ciclón del equipo y una línea de compost/material bioestabilizado sin contaminantes.

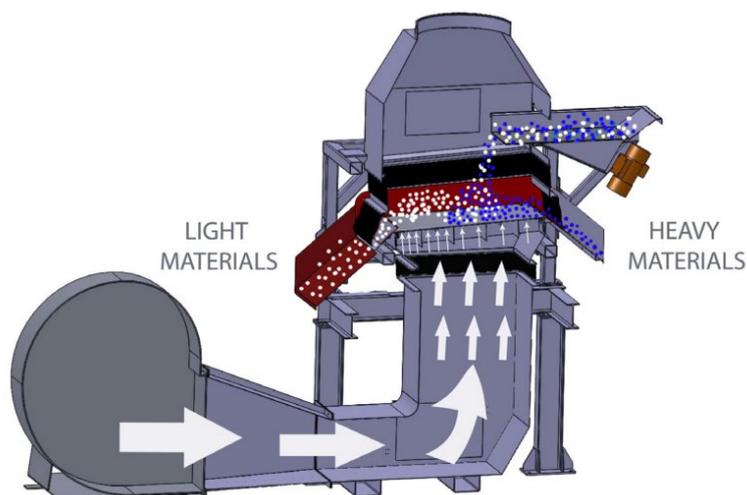


Figura 13. Funcionamiento mesa densimétrica

Fuente [16].

### 2.5 Recuperación del Vidrio

El vidrio es un material inorgánico que se produce tras la fusión a 1500 °C de arena de sílice, carbonato sódico y piedra caliza. Presenta una estructura irregular lo que lo hace bastante diferente del cristal. Además, es un compuesto 100% reciclable ya que se puede fundir cuando acabe su vida útil dando lugar a nuevo vidrio con la misma calidad que el anterior.

Muchos de los envases y recipientes que se utilizan en el día a día son de vidrio, constituyendo esta fracción el 8% del total de residuos domésticos generados. Tal y como ocurre con las demás fracciones de residuos, para gestionar el vidrio producido, el ciudadano puede optar por separar esa fracción del resto y depositarlo en el contenedor destinado a ello, o, por el contrario, puede no segregarlo y añadirlo junto al resto de fracciones en el contenedor resto.

En España, ECOVIDRIO es la administradora del sistema integrado de gestión (SIG) encargado de la recogida y reciclaje de todos los envases de vidrio. Según datos publicados en una de sus webs corporativas [17], en el año 2018 se han reciclado 893.989 toneladas de vidrios, el 6% de esta cantidad procede del vidrio recuperado en las plantas de tratamiento de residuos domésticos y el 94% restante de la recogida selectiva de vidrio. Estas toneladas de vidrio reciclado suponen que el 76,5% de todo el vidrio generado en España sea recuperado.

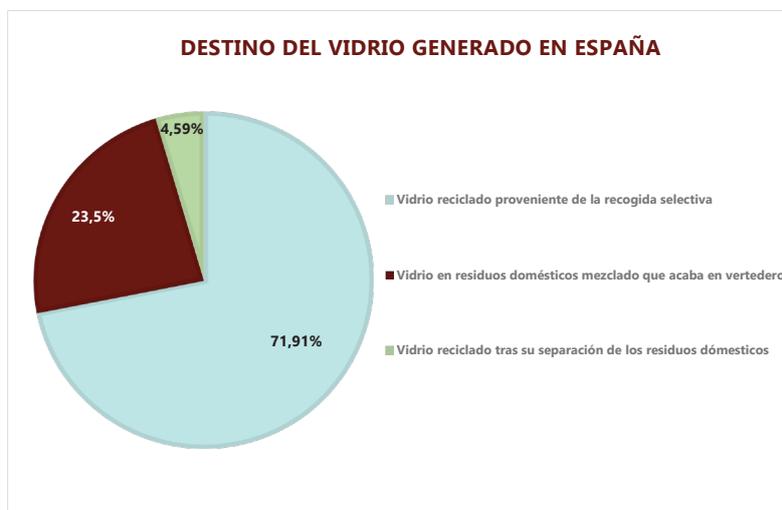


Figura 14. Infografía de los destinos del vidrio generado  
Elaboración Propia. Fuente [17].

El vidrio que no es recuperado corresponde mayoritariamente a la fracción que se encuentra en los residuos domésticos mezclados y que se gestionan principalmente en las 66 plantas de triaje y compostaje repartidas por toda España. En la mayor parte de estas plantas no hay ningún equipo encargado de la recuperación de vidrio por lo que este material no es seleccionado, contaminando otras líneas de material distinto, como es el caso del compost/material bioestabilizado, o terminando en las corrientes de rechazo, siendo consignado a su deposición en vertedero.

Resolver esta situación es uno de los objetivos del presente trabajo por lo que se utilizarán separadores ópticos con el fin de limpiar las corrientes de rechazo que se producen en la línea de afino del compost/material bioestabilizado para separar el vidrio existente y conseguir su recuperación.

La finalidad de estos equipos radica en la necesidad de alcanzar las condiciones de venta del vidrio que impone ECOVIDRIO [17]:

CONDICIONES DEL VIDRIO RECUPERADO	
Material tamaño inferior a 10 mm	< 5% (p/p)
Presencia de tierra, piedras y otros finos	Nula Presencia
Impurezas	< 4% (p/p)

Tabla 7. Condiciones del vidrio recuperado  
Fuente [17].

## 3. Memoria Descriptiva

### 3.1 Descripción del Proceso

Como se ha comentado anteriormente, el objeto de este proyecto es recuperar materiales valiosos (vidrio y metales) de la corriente de rechazo del afino. De manera general, la nueva planta de recuperación de vidrio, se plantea como una adición a la planta de afino existente en cualquier planta compostaje, aprovechando los rechazos de estos equipos para segregar los distintos materiales valiosos que contengan.

Un pequeño número de plantas de compostaje ha decidido en los últimos años realizar la incorporación de una línea de similares características a las de este trabajo. A continuación, se detallan:

<b>INSTALACIONES CON LÍNEA DE RECUPERACIÓN DE VIDRIO APROVECHANDO LOS RECHAZOS DEL AFINO DEL COMPOST</b>	
<b>NOMBRE DE LA INSTALACIÓN</b>	<b>AÑO DE INSTALACIÓN</b>
Ecocentral Granada, Alhendín (Granada)	2017
P. de Valorización de R.D., Caudete de las Fuentes (Valencia)	2017
C.T.R. El Campello, Alicante	2017
Complejo Medioambiental Costa del Sol, Casares (Málaga)	2017
Complejo Medioambiental Salto del Negro(Gran Canaria)	2018
Centro de Gestión de Residuos Lorca (Murcia)	2018
Complejo Medioambiental de Cerceda (A Coruña)	2019
Centro de Valorización de Residuos del Maresme (Barcelona)	2019

Tabla 8. Instalaciones con recuperación de vidrio.

Fuente [19],[20],[21],[22],[23] y[24].

Como consecuencia, antes de tomar cualquier decisión acerca de los equipos utilizados para afrontar el objeto del proyecto es necesario conocer el tratamiento mecánico y biológico previo que se le da a los residuos domésticos mezclados en las plantas de triaje y compostaje que se han mostrado en la tabla anterior:

## Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost

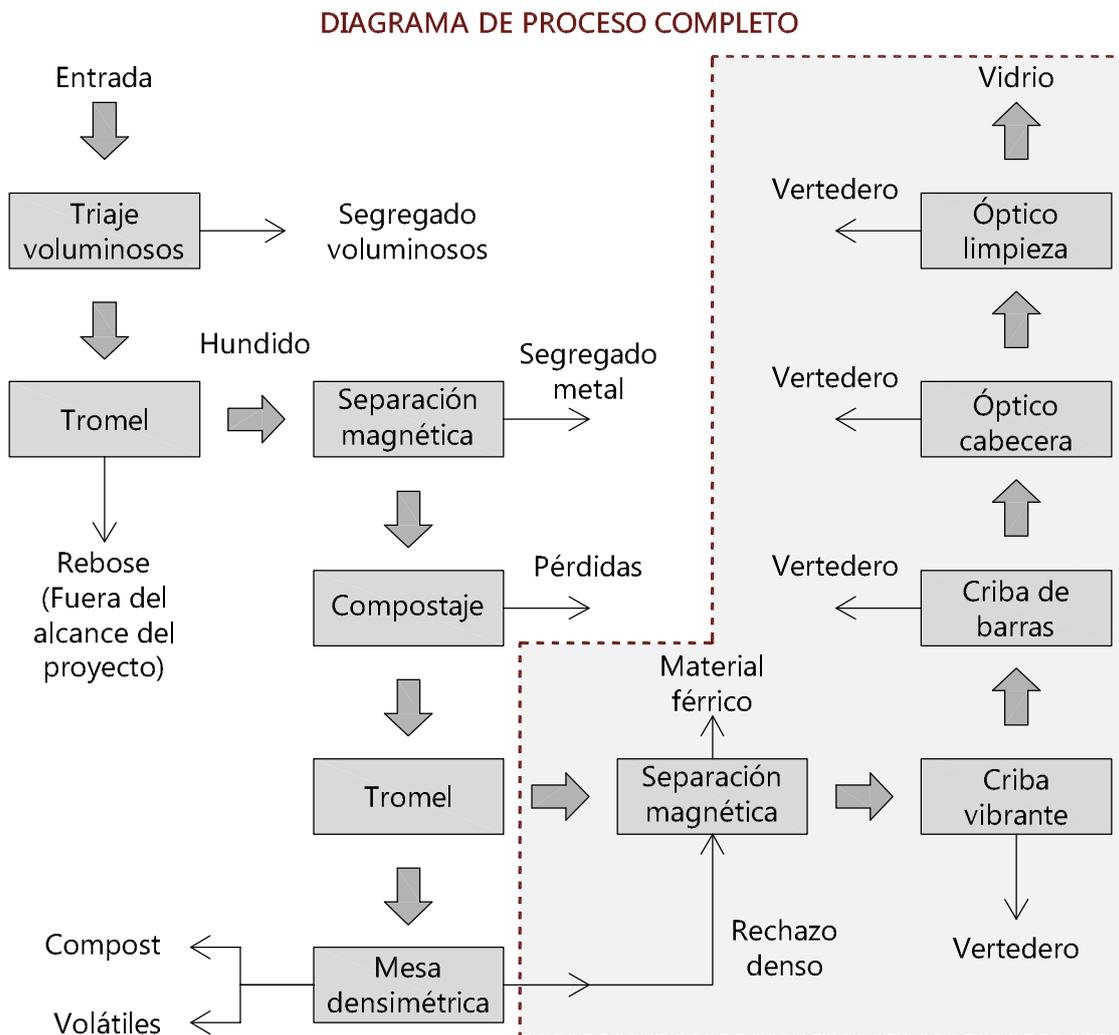


Figura 15. Diagrama de proceso completo  
Elaboración propia.

La nueva línea añadida se sitúa tras el trómel y la mesa densimétrica aprovechando sus rechazos. Idealmente, la alimentación de la línea estará compuesta por poca cantidad de compost/material bioestabilizado y mayoritariamente por las distintas fracciones de impropios que sí interesan separar en los equipos sucesivos. La granulometría del material es muy diversa ya que está formada por el rechazo de gran tamaño procedente del trómel, es decir, material de tamaño mayor a 25 mm y por la corriente densa procesada de la mesa densimétrica, que se encuentra compuesta por material que se hundió por el trómel, con tamaño menor a 25 mm. Por lo tanto, en la selección de la línea debe primar la consecución de una granulometría adecuada con objeto de disgregar los materiales con más valía (metales y vidrio preferentemente). De acuerdo a esto, se ha optado por la siguiente configuración:

DIAGRAMA DE PROCESO DE LA LÍNEA DE RECUPERACIÓN DE VIDRIO

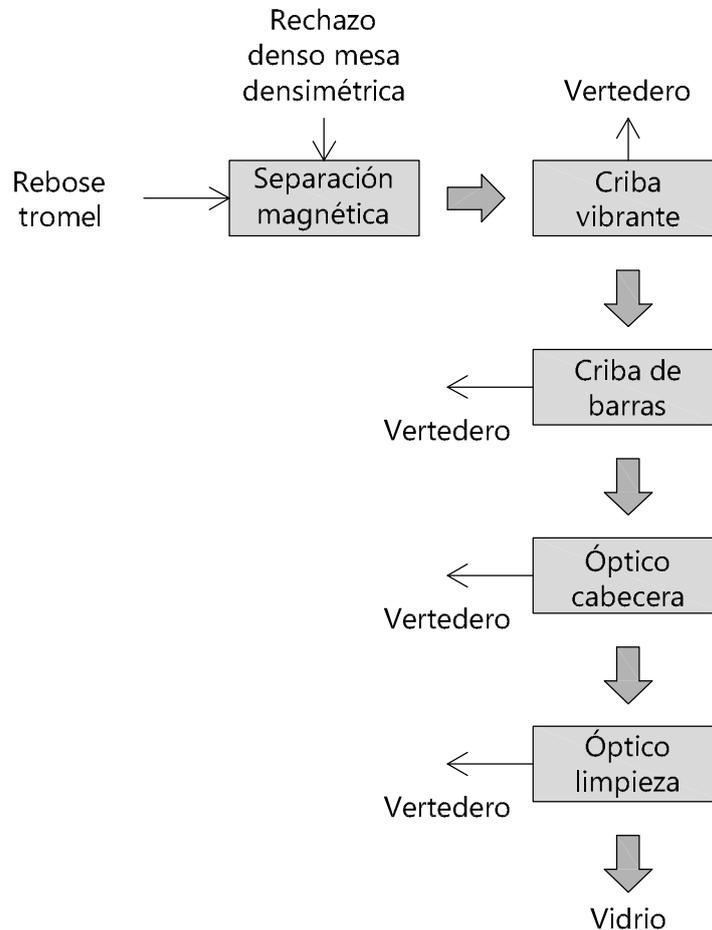


Figura 16. Diagrama de proceso de la línea de recuperación de vidrio  
Elaboración propia. Fuente [19],[20],[21],[22],[23] y [24].

Este diagrama de proceso ha sido recopilado de la información obtenida de todas las fuentes citadas, acerca de las nuevas instalaciones de este tipo que se han ido instalando en las plantas de compostaje, con una finalidad similar a la del objeto de este proyecto y que se muestran en la tabla 8.

En los próximos apartados se pasará a detallar los distintos equipos escogidos, explicando los criterios que llevan a su selección.

### 3.2 Separador Magnético

Las corrientes de rechazo del trómel y la mesa densimétrica se unen y pasan en primer lugar por el separador magnético. En este equipo se pretende separar los metales de tipología férrea mediante el uso de un tambor magnético, colocado al final de la cinta

## Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost

por donde circulan los rechazos. El equipo está formado por un cilindro magnético al que se adhieren los materiales metálicos hasta alcanzar una placa distribuidora, momento en el cual el cilindro deja de estar imantado y provoca la caída del material. Las fracciones no metálicas no son atraídas por el cilindro por lo que continuarán con su trayectoria, cayendo por el otro lado de la placa distribuidora.

Se ha seleccionado esta alternativa en vez de un separador magnético overband debido a que se estima que no se recogerá una cantidad tan grande de metal para compensar la instalación del overband.

La granulometría de la corriente tratada está dentro del rango óptimo en el cual el equipo obtiene rendimientos de separación del metal muy favorables, consiguiéndose separar el 90%-95% del material férrico [25].

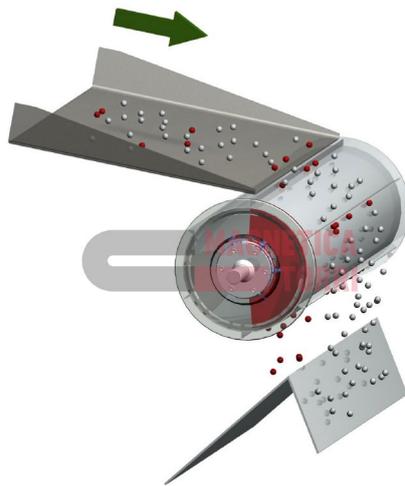


Figura 17. Separador magnético de tambor  
Fuente [26].

### 3.3 Cribas

De acuerdo a nuestro trabajo, el objetivo de la instalación de estos equipos es el de acotar la granulometría a unos rangos en los que la fracción vidrio sea mayoritaria. Según datos obtenidos de la caracterización realizada en una planta similar [23], se tiene que el rango donde predomina el vidrio que entra al proceso de afino está comprendido entre 10 - 40 mm.

Como consecuencia de ello, para acotar el límite superior de la granulometría se ha seleccionado una criba vibrante con un tamaño de malla de 40 mm. El material es seleccionado de acuerdo a su tamaño gracias a la acción del movimiento excéntrico del equipo. El material con tamaño superior a 40 mm, preferentemente con la menor cantidad de vidrio posible, no se hundirá a través de la malla, saliendo del equipo por

rebose y siendo recogido por una cinta transportada para acabar depositado junto al resto de rechazos hacia vertedero. La parte de material que tiene una granulometría menor se hundirá a través del equipo cayendo directamente sobre la siguiente criba seleccionada.

Para el límite inferior de la granulometría se ha estimado que la presencia de estos materiales menores de 10 mm es pequeña ya que se asume que la mayoría de ellos han sido recogido por el ciclón de la mesa densimétrica, impidiendo de esta forma su entrada en la nueva línea incorporada.



Figura 18. Criba vibrante  
Fuente [27].

Así, se consigue que el material presente un rango de granulometrías óptimo de cara a la fracción vidrio.

El siguiente equipo que se escoge es una criba de barras para separar aún más el vidrio de los demás materiales. Este equipo es muy similar a la criba vibrante, cambiando la malla por barras y permite seleccionar aquellos materiales que posean una dimensión mucho menor a las otras dos. Suele ser habitual que el vidrio fragmentado presente el criterio de selección de la criba por lo que prioritariamente acabará hundido a través de él. Nuevamente, el material que continuará al proceso de afino será el hundido mientras que el rebose de la criba es recogido por una cinta transportadora y depositado junto al resto de rechazos.



Figura 19. Criba de barras  
Fuente [28].

## 3.4 Separadores Ópticos

Los separadores ópticos son equipos encargados de segregar materiales utilizando como criterio de separación la reflectividad de los materiales [25]. Son equipos muy versátiles ya que en la recuperación de vidrio se pueden usar tanto para ordenar el material por colores como para separarlo de otros contaminantes. El esquema general del equipo es:

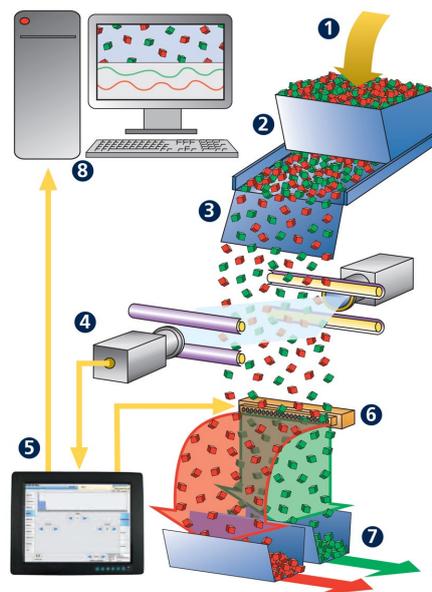


Figura 20. Funcionamiento de un separador óptico  
Fuente [29].

El material que se pretende separar se introduce en el equipo mediante un alimentador vibrante, rápidamente el material se dispersa y acelera por medio de una cinta. En cuanto ésta acaba, se encuentran una serie de emisores de ondas electromagnéticas que emiten una radiación infrarroja. El material, de acuerdo a su composición, absorberá parte de esta radiación. La radiación reflejada es captada por los sensores y seguidamente envían sus medidas a un ordenador que se encarga del control de las válvulas de aire comprimido utilizadas para la separación, que se abrirán o permanecerán cerradas de acuerdo a las medidas recibidas por los sensores. De esta forma, se consiguen separar materiales que de otra manera sería totalmente imposible.

Se ha decidido colocar dos separadores ópticos en línea similar al mostrado en [19],[20] [21],[22] y [23]. El primero de los dos separadores ópticos adquiere el nombre de separador de cabecera, encargándose de separar el vidrio de los demás materiales. Esta línea de vidrio separada se hace pasar por otro separador óptico que se denomina separador de limpieza y su función será la de eliminar todos los materiales impropios que hayan acompañado al vidrio tras el paso por el primer separador óptico. Los rechazos de ambos equipos son recogidos por una cinta transportadora y añadidos junto al resto de rechazos.

Muestra de la versatilidad de estos equipos se observa en la función tan diferente que realizan en el separador de cabecera y en el separador de limpieza. De acuerdo a la fuente [23], la eficiencia de separación de estos equipos se sitúa en torno al 90% por lo que se puede asegurar que la corriente de vidrio final obtenido de la planta cumplirá las condiciones de venta impuestas por Ecovidrio y mostradas en el apartado 2.5.

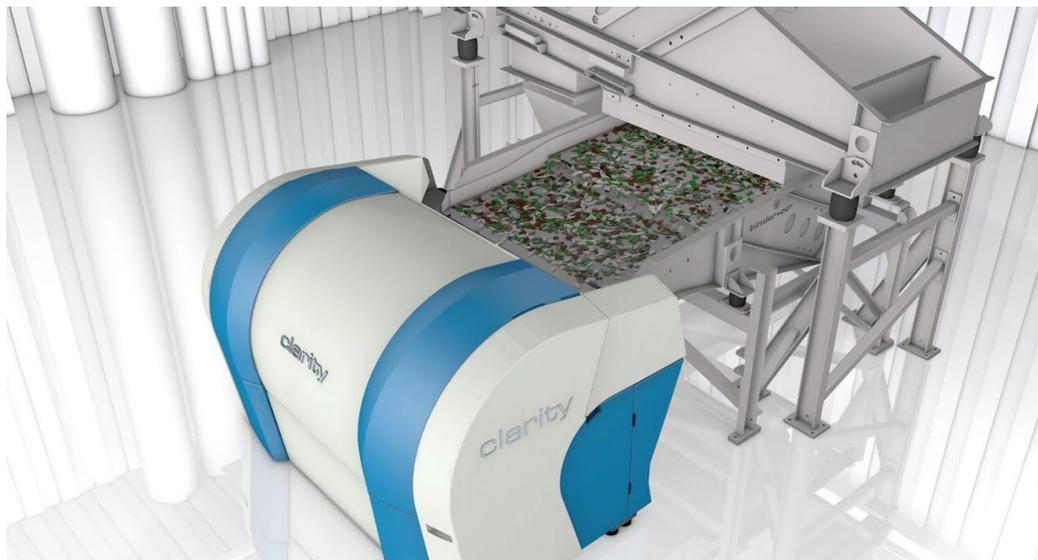


Figura 21. Separador óptico  
Fuente [30].

## 4. Memoria de Cálculos

---

En la memoria de cálculos se realizarán las operaciones necesarias para determinar todos los parámetros que conciernen a la instalación de recuperación de vidrio. Sin embargo, no se conoce la cantidad de residuos gestionada por la planta ni la caracterización de la corriente procedente de los rechazos de la zona de afino. Es por ello por lo que en primer lugar se efectuará un balance de materia previo de toda la planta de compostaje para tener conocimiento de la cantidad de material que permanece en cada línea y determinar la capacidad de la nueva línea instalada para separar los materiales valiosos (vidrio, metales, etc) con objeto de su posterior venta. De este balance se obtendrán las relaciones entre las salidas y las entradas a la instalación, que son datos imprescindibles para los siguientes cálculos.

Resuelto el balance de materia, se ejecutará un balance económico previo para distintos escenarios con la finalidad de determinar la cantidad de residuos que deben ser tratados para que la inversión realizada en la instalación de la línea del proyecto sea rentable. Consecuentemente, se calculará la población, a la cual la planta debe dar servicio, para conseguir una rentabilidad de la inversión óptima. Para esta situación óptima, se realizará el balance de materia completo, se definirán todos los equipos y se concretarán todas las líneas.

### 4.1 Balance de Materia Previo

El parámetro más importante a tener en cuenta para la realización del balance es el rendimiento de separación que consigue cada equipo, que dependerá de su funcionalidad, de la tipología del material que trate y de las condiciones en la que se encuentre este material. La mayoría de los rendimientos han sido obtenidos de bibliografía y estudios similares a los que aquí se reflejan, aunque en algunos equipos, por la falta de información encontrada, se han tenido que estimar estas eficacias de separación.

Como es lógico, es necesario determinar en primer lugar el balance de materia desde que los materiales entran en la planta de triaje y compostaje, por lo que se tomará como referencia el diagrama de proceso completo mostrado en el apartado 3.1.

Además, se tomará como base de cálculo un valor de 100 unidades másicas de residuos mezclados a la entrada de la planta. Estos residuos mezclados tendrán una caracterización idéntica a los residuos generados en España mostrados en el apartado 2.1.

#### Triaje de voluminosos

De acuerdo a [31], para este equipo el balance de materia queda:

## Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost

<b>BALANCE DE MATERIA EN EL TRIAJE DE VOLUMINOSOS</b>				
<b>FRACCIÓN</b>	<b>ENTRADA</b>	<b>RENDIMIENTO DE SEPARACIÓN %</b>	<b>SALIDA A PROCESO</b>	<b>RECHAZO VOLUMINOSO</b>
Materia Orgánica	49	0	49	0
Papel y Cartón	15	2,2	14,67	0,33
Plásticos	9	4,5	8,6	0,40
Vidrio	8	2,2	7,82	0,18
Metales	3	11	2,67	0,33
Textil	5	23,5	3,83	1,18
Otros	11	10	9,9	1,1
<b>TOTAL</b>	<b>100 U.M.</b>		<b>96,48 U.M.</b>	<b>3,52 U.M.</b>

Tabla 9. Balance de materia en el triaje de voluminosos

Los rendimientos de separación están referenciados al porcentaje de material que va a rechazo. Por ejemplo, para la fracción Otros el 10% será segregado del resto mientras que el 90% restante pasará el triaje y seguirá al proceso.

### **Trómel**

En este equipo los rendimientos de separación se han obtenido de [25] y están referenciados al porcentaje de material que se hunde a través del equipo, que mayoritariamente serán las fracciones de materia orgánica, vidrio y otros. Las demás fracciones generalmente no conseguirán atravesar el equipo y saldrán de él por rebose.

<b>BALANCE DE MATERIA EN EL TRÓMEL</b>				
<b>FRACCIÓN</b>	<b>ENTRADA</b>	<b>RENDIMIENTO DE SEPARACIÓN %</b>	<b>HUNDIDOS A PROCESO</b>	<b>REBOSE (FUERA DEL PROYECTO)</b>
Materia Orgánica	49	75	36,75	12,25
Papel y Cartón	14,67	12,5	1,83	12,83
Plásticos	8,6	10	0,85	7,73
Vidrio	7,82	85	6,65	1,17
Metales	2,67	15	0,4	2,26
Textil	3,83	10	0,38	3,44
Otros	9,9	75	7,42	2,47
<b>TOTAL</b>	<b>96,48 U.M.</b>		<b>54,3 U.M.</b>	<b>42,18 U.M.</b>

Tabla 10. Balance de materia en el trómel

El rebose seguirá a otros equipos para conseguir la separación de las distintas fracciones que la componen, pero esto queda totalmente fuera del alcance de estudio de este trabajo.

### **Separación magnética**

<b>BALANCE DE MATERIA EN EL SEPARADOR MAGNÉTICO</b>				
<b>FRACCIÓN</b>	<b>ENTRADA</b>	<b>RENDIMIENTO DE SEPARACIÓN %</b>	<b>SALIDA A PROCESO</b>	<b>SEGREGADO METÁLICO</b>
Materia Orgánica	36,75	1	36,38	0,37
Papel y Cartón	1,83	5	1,74	0,09
Plásticos	0,85	5	0,81	0,04
Vidrio	6,65	0	6,65	0
Metales	0,4	85	0,06	0,34
Textil	0,38	0	0,38	0
Otros	7,42	0	7,42	0
<b>TOTAL</b>	<b>54,3 U.M.</b>		<b>53,45 U.M.</b>	<b>0,84 U.M.</b>

Tabla 11. Balance de materia en el separador magnético

## Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost

Los rendimientos hacen referencia al porcentaje de material que se separa del resto en este equipo [25] [31].

### **Compostaje (fermentación y maduración)**

La bibliografía para este proceso es bastante limitada por lo que se ha recurrido a las estimaciones hechas en [31] y cotejadas con [8]. Se asume que la materia orgánica se degrada en un 60% en la fermentación y un 20% de lo que queda en la maduración. Además, la fracción papel y cartón se transforma un 15% en la fermentación y un 50% en la maduración. Para cerrar el balance en el proceso de compostaje se ha tenido en cuenta la reducción de humedad que se produce, ya que el material compostado pasa de tener una humedad del 50% aproximadamente a un 35%.

<b>BALANCE DE MATERIA EN EL PROCESO DE COMPOSTAJE</b>			
<b>FRACCIÓN</b>	<b>ENTRADA</b>	<b>SALIDA A AFINO</b>	<b>PÉRDIDAS</b>
Materia Orgánica	36,38	15,42	20,96
Papel y Cartón	1,74	0,61	1,13
Plásticos	0,81	0,81	0
Vidrio	6,65	6,65	0
Metales	0,06	0,06	0
Textil	0,38	0,38	0
Otros	7,42	7,42	0
<b>TOTAL</b>	<b>53,45 U.M.</b>	<b>31,37 U.M.</b>	<b>22,09 U.M.</b>

Tabla 12. Balance de materia en el proceso de compostaje

### **Trómel de afino**

Los rendimientos del equipo están referidos al porcentaje de material que no traspasa la malla del equipo, es decir, el material que entra en la línea de recuperación de vidrio.

<b>BALANCE DE MATERIA EN EL TRÓMEL DE AFINO</b>				
<b>FRACCIÓN</b>	<b>ENTRADA</b>	<b>RENDIMIENTO DE SEPARACIÓN %</b>	<b>REBOSE A PROCESO</b>	<b>HUNDIDO A MESA DENSIMÉTRICA</b>
Materia Orgánica	15,42	15	2,31	13,11
Papel y Cartón	0,61	70	0,43	0,18
Plásticos	0,81	70	0,57	0,24
Vidrio	6,65	30	1,99	4,65
Metales	0,06	60	0,03	0,03
Textil	0,38	80	0,3	0,08
Otros	7,42	40	2,97	4,45
<b>TOTAL</b>	<b>31,37 U.M.</b>		<b>8,62 U.M.</b>	<b>22,75 U.M.</b>

Tabla 13. Balance de materia en el trómel de afino

**Mesa densimétrica**

<b>BALANCE DE MATERIA EN LA MESA DENSIMÉTRICA</b>					
<b>FRACCIÓN</b>	<b>ENTRADA</b>	<b>RENDIMIENTO DE SEPARACIÓN %</b>	<b>A COMPOST/MATERIAL BIOESTABILIZADO</b>	<b>RECHAZO DENSO VUELTA A PROCESO</b>	<b>MATERIA VOLÁTIL</b>
Materia Orgánica	13,11	90	11,80	0,66	0,65
Papel y Cartón	0,18	5	0,009	0,139	0,037
Plásticos	0,24	5	0,012	0,232	0
Vidrio	4,65	3	0,139	4,28	0,23
Metales	0,03	3	0,0007	0,023	0
Textil	0,8	5	0,003	0,077	0
Otros	4,45	3	0,133	3,88	0,44
<b>TOTAL</b>	<b>22,75 U.M.</b>		<b>12,1 U.M.</b>	<b>9,29 U.M.</b>	<b>1,35 U.M.</b>

Tabla 14. Balance de materia en la mesa densimétrica

El rendimiento de separación está referido al porcentaje de material entrante que abandona el equipo en la fracción destinada a compost/material bioestabilizado.

## Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost

### Separación magnética (Entrada a la línea de recuperación de vidrio)

<b>BALANCE DE MATERIA EN LA SEPARACIÓN MAGNÉTICA DEL AFINO</b>				
<b>FRACCIÓN</b>	<b>ENTRADA</b>	<b>RENDIMIENTO DE SEPARACIÓN %</b>	<b>MATERIAL A PROCESO</b>	<b>SEGREGADO METÁLICO</b>
Materia Orgánica	2,97	0	2,97	0
Papel y Cartón	0,57	0	0,57	0
Plásticos	0,8	0	0,8	0
Vidrio	6,27	0	6,27	0
Metales	0,06	95	0,002	0,06
Textil	0,37	0	0,37	0
Otros	6,84	0	6,84	0
<b>TOTAL</b>	<b>17,91 U.M</b>		<b>17,85 U.M.</b>	<b>0,06 U.M.</b>

Tabla 15. Balance de materia en la separación magnética del afino

### Criba vibrante

<b>BALANCE DE MATERIA EN LA CRIBA VIBRANTE</b>				
<b>FRACCIÓN</b>	<b>ENTRADA</b>	<b>% DE MATERIAL A PROCESO</b>	<b>HUNDIDO A PROCESO</b>	<b>RECHAZO A VERTEDERO</b>
Materia Orgánica	2,97	90	2,67	0,3
Papel y Cartón	0,57	30	0,17	0,4
Plásticos	0,8	60	0,48	0,32
Vidrio	6,27	90	5,65	0,62
Metales	0,002	40	0,001	0,001
Textil	0,37	20	0,075	0,3
Otros	6,84	70	4,79	2,05
<b>TOTAL</b>	<b>17,85 U.M.</b>		<b>13,84 U.M.</b>	<b>4,01 U.M.</b>

Tabla 16. Balance de materia en la criba vibrante

**Criba de barras**

<b>BALANCE DE MATERIA EN LA CRIBA DE BARRAS</b>				
<b>FRACCIÓN</b>	<b>ENTRADA</b>	<b>% DE MATERIAL A PROCESO</b>	<b>HUNDIDO A PROCESO</b>	<b>RECHAZO A VERTEDERO</b>
Materia Orgánica	2,67	40	1,07	1,6
Papel y Cartón	0,17	80	0,137	0,033
Plásticos	0,48	80	0,38	0,1
Vidrio	5,65	95	5,36	0,29
Metales	0,001	40	0,0004	0,0006
Textil	0,075	10	0,007	0,063
Otros	4,79	40	1,91	2,88
<b>TOTAL</b>	<b>13,84 U.M.</b>		<b>8,88 U.M.</b>	<b>4,96 U.M.</b>

Tabla 17. Balance de materia en la criba de barras

**Separador óptico de cabecera**

<b>BALANCE DE MATERIA EN EL SEPARADOR ÓPTICO DE CABECERA</b>				
<b>FRACCIÓN</b>	<b>ENTRADA</b>	<b>% DE MATERIAL A PROCESO</b>	<b>SEGREGADO A PROCESO</b>	<b>RECHAZO A VERTEDERO</b>
Materia Orgánica	1,07	10	0,11	0,96
Papel y Cartón	0,137	10	0,014	0,123
Plásticos	0,38	10	0,038	0,342
Vidrio	5,36	90	4,83	0,53
Metales	0,0004	10	0	0,0004
Textil	0,007	10	0	0,007
Otros	1,91	10	0,19	1,72
<b>TOTAL</b>	<b>8,88 U.M.</b>		<b>5,18 U.M.</b>	<b>3,70 U.M.</b>

Tabla 18. Balance de materia en el separador óptico de cabecera

## Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost

### Separador óptico de limpieza

BALANCE DE MATERIA EN EL SEPARADOR ÓPTICO DE LIMPIEZA				
FRACCIÓN	ENTRADA	% DE MATERIAL A SALIDA DE VIDRIO	VIDRIO SELECCIONADO	RECHAZO A VERTEDERO
Materia Orgánica	0,11	10	0,01	0,1
Papel y Cartón	0,014	10	0,001	0,013
Plásticos	0,038	10	0,004	0,034
Vidrio	4,83	90	4,34	0,49
Metales	0	0	0	0
Textil	0	0	0	0
Otros	0,19	10	0,019	0,171
<b>TOTAL</b>	<b>5,18 U.M.</b>		<b>4,38 U.M.</b>	<b>0,8 U.M.</b>

Tabla 19. Balance de materia en el separador óptico de limpieza

Se añade a modo de resumen la figura del diagrama de proceso con el valor de la cantidad de material de cada línea expresado en unidades másicas:

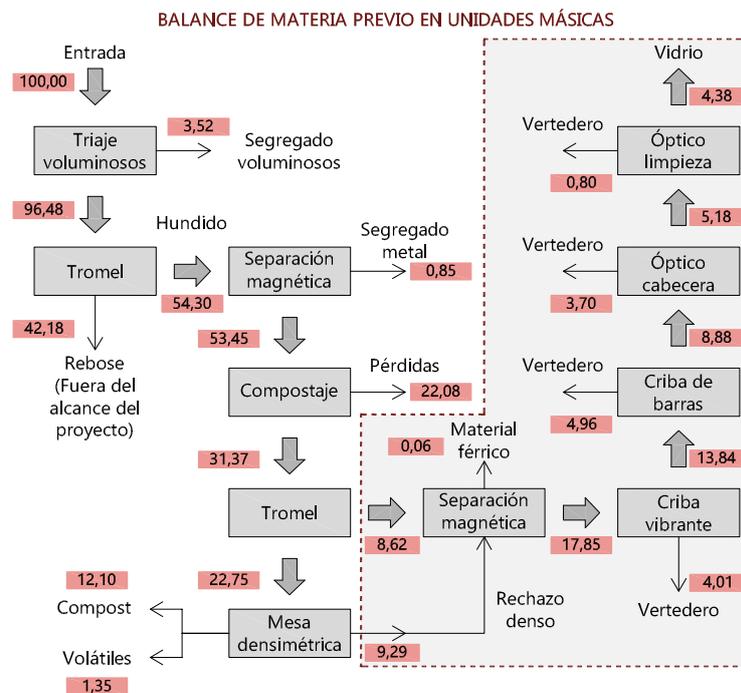


Figura 22. Balance de materia previo

### 4.2 Cálculos Económicos Previos

Se realizará un estudio de la rentabilidad de la inversión utilizando para ello el método del Valor Actual Neto con el que se obtendrán los valores actualizados de los flujos de caja futuros que se generan. Sólo se tendrán en cuenta aquellos aspectos que afecten a los flujos de caja producidos por la instalación de la nueva línea y que estén dentro del límite de batería del proyecto, por lo que no se toma en consideración elementos, por ejemplo, la compra de los equipos previos a la línea incorporada o la venta de compost/material bioestabilizado ya que son cuestiones que se encontraban previamente en la instalación.

El objetivo de este balance previo es determinar la cantidad de habitantes, a la que la planta de triaje y compostaje donde se instalará la línea objeto del proyecto, dará servicio, para conseguir que el Valor Actual Neto sea nulo al final de la vida útil de la nueva línea, imponiendo como tasa de actualización la rentabilidad mínima exigida de acuerdo al mecanismo de financiación escogido.

Los principales factores a tener en cuenta son:

#### **Ingresos**

##### *Venta de productos seleccionados*

El vidrio y el metal recuperado se asumen que son vendidos en su totalidad a final de año. Estas ventas provocan aumentos de los flujos de caja. Se estima que el vidrio será vendido a un precio de 20 €/tonelada y el metal recuperado por 100 €/tonelada.

Para tener en cuenta el tiempo que transcurre desde que se realiza la inversión hasta que se instalan los equipos y la línea comienza a operar con normalidad, se ha estimado que las ventas de material el primer año serán un 30% menores a la del resto de años siguientes.

##### *Gestión de rechazos a vertedero*

Se ha de contabilizar como un ingreso la cantidad total ahorrada por no tener que trasladar y depositar el material seleccionado por la planta objeto del proyecto en el vertedero. Se toma en consideración que los costes asociados a tales hechos son de 30€/tonelada por lo que esa cantidad sería evitada por cada tonelada de material seleccionado en la nueva línea.

## Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost

### **Inversión inicial**

#### *Inversión en obra civil*

La nueva línea se confina en una nave techada de 35 metros x 20 metros. De acuerdo a las indicaciones del Colegio de Arquitectos de Sevilla para 2019 [32], el precio del m<sup>2</sup> es de 250€/m<sup>2</sup>. Como la nave tiene una superficie de 700 m<sup>2</sup>, se requerirán 175.000 € para su construcción.

Además, se destinarán 25.000 € más con el fin de sufragar todas las instalaciones eléctricas que requieran los equipos.

Por lo tanto, la inversión en obra civil se estima en 200.000 €.

#### *Inversión en equipos*

Se estiman las siguientes partidas en este concepto:

<b>INVERSIÓN EN EQUIPOS</b>			
<b>EQUIPO</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>€/UD</b>	<b>TOTAL</b>
Separador Magnético	1	15.000 €	15.000 €
Criba 40 mm	1	45.000 €	45.000 €
Criba de barras	1	25.000 €	25.000 €
Separador Optico	2	130.000 €	260.000 €
Cinta transportadora	6	10.000 €	60.000 €
<b>TOTAL</b>			<b>405.000 €</b>

Tabla 20. Estimación de la inversión inicial en equipos

### **Gastos**

#### *Gastos en personal*

Se deduce que los operarios de la planta de afino inicial serán capaces de gestionar la nueva instalación por lo que estos gastos no se han tenido en cuenta a la hora de realizar los flujos de caja.

#### *Gastos en mantenimiento*

De acuerdo a [33], los gastos en mantenimiento anual serán del 3% de la inversión inicial de los equipos y el 1,5% de la inversión inicial de la obra civil. Los gastos de

mantenimiento anual corresponderán a 15.150 €.

### *Gastos eléctricos*

Los equipos estarán en funcionamiento durante un turno de trabajo diario. Por convenio, esto se traduce en 1.776 horas al año. La potencia consumida por todos los equipos funcionando simultáneamente se estima en 53 kW. Asimismo, se conoce el precio de la energía eléctrica industrial, 0,16 €/kWh. Multiplicando todos estos conceptos arrojan un gasto eléctrico anual de 13.500 €.

### *Gastos financieros*

Se tendrán en cuenta los gastos financieros en caso de que la inversión no pueda ser sufragada íntegramente por los recursos propios y se deba acudir a la financiación bancaria. Se pagará una cuota anual fija de acuerdo a la amortización por el método francés [34].

### **Vida útil de la línea**

Se ha comentado en apartados anteriores que desde los organismos gubernamentales se están imponiendo medidas para instaurar la recogida selectiva de la materia orgánica, aunque aún sin mucho éxito en el territorio español. Como consecuencia de ello en un horizonte como mínimo de 10 años las plantas de triaje y compostaje seguirán recibiendo los residuos mezclados por lo que como mínimo (en el caso más desfavorable para este trabajo) la nueva planta instalada tendrá una vida útil de 10 años antes de quedar obsoleta.

### **Amortización**

Se establece una amortización lineal con un período de amortización de 15 años para los equipos y de 20 años para la obra civil. Este hecho conlleva que al final de la vida útil de la línea, los equipos y la obra civil aún no hayan sido amortizados completamente por lo que su valor residual final será añadido como flujo de caja positivo al final de la vida útil.

Las amortizaciones de estos elementos se contabilizan como flujos de caja negativos antes de impuestos y como flujos de caja positivos tras éstos.

### **Impuestos**

Solamente se computará el Impuesto de Sociedades que repercutirá en un 25% sobre los beneficios obtenidos. Otros impuestos como el IVA no se han tenido en cuenta ya que todo el IVA repercutido será devuelto a la Tesorería General de la Seguridad Social mientras que por el contrario se recibirá todo el IVA soportado, es decir, desde el punto de vista de este balance económico el Impuesto al Valor Añadido no aporta nada.

### **Financiación**

Los mecanismos de financiación del proyecto pueden proceder de varias alternativas:

## Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost

### *Recursos Propios*

El capital invertido para la realización de la nueva línea será sufragado por la propia empresa que gestiona la instalación.

### *Subvenciones*

Para este proyecto se ha encontrado una subvención de la Junta de Andalucía con objeto de aumentar la competitividad industrial de las empresas y amparadas por los fondos FEDER [35]. En caso de obtener dicha subvención, ésta se encargará de sufragar entre el 25% y el 75% de la inversión, estableciendo un máximo de un 10% de subvención referida a la obra civil. Para empresas del sector de la gestión de residuos es obligatorio que no perciban más de un 20% de su facturación de fondos públicos si quieren optar a esta subvención, por lo que sería un criterio que cumplir para una empresa similar a la del objeto de este trabajo.

### *Financiación externa. Línea de Crédito*

En caso de que no se disponga de recursos propios ni se concedan subvenciones suficientes para afrontar la inversión, se podría recurrir a la financiación externa a través de crédito. La línea de crédito que se ha encontrado más interesante es la Línea REINDUS, dedicada a conceder préstamos a largo plazo para incentivar la inversión industrial. La cantidad mínima concedida es de 100.000 €, amortizados en 10 años y con una carencia de 3 años. El interés fijo anual oscila entre el 1,2% y el 4% de acuerdo a la valoración económica que posea la empresa beneficiaria.

### **Tasa de Actualización**

La tasa de actualización será el coste de oportunidad o la rentabilidad mínima exigida para cada tipo de financiación. Se ha supuesto que esa rentabilidad es del 10% para la financiación a través de recursos propios y del interés anual para la financiación externa a través de préstamo. Se hará una media ponderada entre los medios de financiación para cada opción y su rentabilidad, obteniendo de esta forma una tasa de actualización acorde.

A continuación, se plantean tres escenarios posibles sobre los que se realiza el balance económico:

### **Escenario A**

- No se percibe ninguna subvención.
- La empresa gestora acomete toda la inversión a través de recursos propios.
- No se recurre a la concesión de un préstamo.
- La tasa de actualización será igual a la rentabilidad mínima exigida, por lo que será del 10% ya que no hay financiación externa.

El balance económico para utilizar el método del VAN queda:

BALANCE ECONÓMICO ESCENARIO A	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
<b>INGRESOS</b>											
Venta de vidrio		37.646 €	53.780 €	53.780 €	53.780 €	53.780 €	53.780 €	53.780 €	53.780 €	53.780 €	53.780 €
Venta de compost		0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Venta de Chatarra		2.422 €	3.459 €	3.459 €	3.459 €	3.459 €	3.459 €	3.459 €	3.459 €	3.459 €	3.459 €
Ahorro Vertedero		57.195 €	81.707 €	81.707 €	81.707 €	81.707 €	81.707 €	81.707 €	81.707 €	81.707 €	81.707 €
<b>GASTOS</b>											
Personal		0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Gastos Eléctricos		-13.427 €	-13.427 €	-13.427 €	-13.427 €	-13.427 €	-13.427 €	-13.427 €	-13.427 €	-13.427 €	-13.427 €
Gastos de Mantenimiento		-15.150 €	-15.150 €	-15.150 €	-15.150 €	-15.150 €	-15.150 €	-15.150 €	-15.150 €	-15.150 €	-15.150 €
Gastos financieros		0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
<b>INVERSIÓN INICIAL</b>											
Recursos propios		-605.000 €									
<b>AMORTIZACIONES</b>											
Amortización de Equipos		-27.000 €	-27.000 €	-27.000 €	-27.000 €	-27.000 €	-27.000 €	-27.000 €	-27.000 €	-27.000 €	-27.000 €
Amortización de Obra Civil		-10.000 €	-10.000 €	-10.000 €	-10.000 €	-10.000 €	-10.000 €	-10.000 €	-10.000 €	-10.000 €	-10.000 €
<b>VALORES RESIDUALES</b>											
Valor Residual Equipos											135.000 €
Valor Residual Obra Civil											100.000 €
<b>Beneficio Antes de Imp.</b>											
Impuesto de Sociedades		-7.921 €	-18.342 €	-18.342 €	-18.342 €	-18.342 €	-18.342 €	-18.342 €	-18.342 €	-18.342 €	-77.092 €
<b>Beneficio Después de Imp.</b>											
Amortización de Equipos		23.764 €	55.027 €	55.027 €	55.027 €	55.027 €	55.027 €	55.027 €	55.027 €	55.027 €	231.277 €
Amortización de Obra Civil		10.000 €	10.000 €	10.000 €	10.000 €	10.000 €	10.000 €	10.000 €	10.000 €	10.000 €	10.000 €
<b>FLUJOS DE CASH</b>											
		-605.000 €	60.764 €	92.027 €	92.027 €	92.027 €	92.027 €	92.027 €	92.027 €	92.027 €	268.277 €

Tabla 21. Flujos de caja para el escenario A

Para conseguir recuperar la inversión con la tasa de actualización se precisa la venta de 2.689 toneladas de vidrio al año y 35 toneladas de material férreo recuperado en la instalación. Extrapolando estos resultados al balance de materia implica que la planta completa debe dar servicio a **143.000 habitantes**.

## Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost

### Escenario B

BALANCE ECONÓMICO ESCENARIO B	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
<b>INGRESOS</b>											
Venta de vidrio		23.156 €	33.081 €	33.081 €	33.081 €	33.081 €	33.081 €	33.081 €	33.081 €	33.081 €	33.081 €
Venta de compost		0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Venta de Chatarra		1.490 €	2.128 €	2.128 €	2.128 €	2.128 €	2.128 €	2.128 €	2.128 €	2.128 €	2.128 €
Ahorro Verdadero		35.182 €	50.259 €	50.259 €	50.259 €	50.259 €	50.259 €	50.259 €	50.259 €	50.259 €	50.259 €
<b>GASTOS</b>											
Personal		0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Gastos Electricos		-13.427 €	-13.427 €	-13.427 €	-13.427 €	-13.427 €	-13.427 €	-13.427 €	-13.427 €	-13.427 €	-13.427 €
Gastos de Mantenimiento		-15.150 €	-15.150 €	-15.150 €	-15.150 €	-15.150 €	-15.150 €	-15.150 €	-15.150 €	-15.150 €	-15.150 €
Gastos financieros		-16.632 €	-16.632 €	-16.632 €	-16.632 €	-16.632 €	-16.632 €	-16.632 €	-16.632 €	-16.632 €	-16.632 €
<b>INVERSIÓN INICIAL</b>											
Recursos propios		-353.925 €									
<b>AMORTIZACIONES</b>											
Amortización de Equipos		-27.000 €	-27.000 €	-27.000 €	-27.000 €	-27.000 €	-27.000 €	-27.000 €	-27.000 €	-27.000 €	-27.000 €
Amortización de Obra Civil		-10.000 €	-10.000 €	-10.000 €	-10.000 €	-10.000 €	-10.000 €	-10.000 €	-10.000 €	-10.000 €	-10.000 €
<b>VALORES RESIDUALES</b>											
Valor Residual Equipos											135.000 €
Valor Residual Obra Civil											100.000 €
<b>Beneficio Antes de Imp.</b>											
		-353.925 €	-22.381 €	3.260 €	3.260 €	3.260 €	3.260 €	3.260 €	3.260 €	3.260 €	238.260 €
<b>Impuesto de Sociedades</b>											
		0 €	-815 €	-815 €	-815 €	-815 €	-815 €	-815 €	-815 €	-815 €	-59.565 €
<b>Beneficio Después de Imp.</b>											
		-353.925 €	-22.381 €	2.445 €	2.445 €	2.445 €	2.445 €	2.445 €	2.445 €	2.445 €	178.695 €
<b>Amortización de Equipos</b>											
		27.000 €	27.000 €	27.000 €	27.000 €	27.000 €	27.000 €	27.000 €	27.000 €	27.000 €	27.000 €
<b>Amortización de Obra Civil</b>											
		10.000 €	10.000 €	10.000 €	10.000 €	10.000 €	10.000 €	10.000 €	10.000 €	10.000 €	10.000 €
<b>FLUJOS DE CAJA</b>											
		-353.925 €	14.619 €	39.445 €	39.445 €	39.445 €	39.445 €	39.445 €	39.445 €	39.445 €	215.695 €

Tabla 22. Flujos de caja para el escenario B

La venta anual de vidrio será de 1.654 toneladas y de 22 toneladas de material metálico, lo que requiere que la planta gestione los residuos domésticos mezclados de **88.000 habitantes**.

Las variables que afectan a la financiación en este escenario son:

- Se recibe una subvención del 25% de la inversión inicial= 151.250 €.
- Se solicita un préstamo de 100.000 €.
- El resto de la inversión recae sobre la financiación propia = 353.925 €.
- Se asume que el interés anual del préstamo será el más desfavorable, un 4% de interés.
- De esta forma, la tasa de actualización será:

$\% \text{ Financiación subvención} \times \text{Rentabilidad exigida subvención} + \% \text{ Financiación externa} \times \text{Rentabilidad exigida financiación externa} + \% \text{ Financiación recursos propios} \times \text{Rentabilidad exigida recursos propios} = 25\% \times 0\% + 16,25\% \times 4\% + 58,5\% \times 10\% = 6,5\%$

### Escenario C

- Se recibe una subvención del 50% de la inversión inicial= 302.500 €.
- El 40% de la inversión inicial será costado por un préstamo = 242.000 €.
- El 10% restantes proviene de recursos propios= 60.500 €.
- La tasa de actualización para este caso corresponde a:

$\% \text{ Financiación subvención} \times \text{Rentabilidad exigida subvención} + \% \text{ Financiación externa} \times \text{Rentabilidad exigida financiación externa} + \% \text{ Financiación recursos propios} \times \text{Rentabilidad exigida recursos propios} = 50\% \times 0\% + 40\% \times 4\% + 10\% \times 10\% = 2,6\%$

Analizando los flujos de caja mostrados en la siguiente página, se obtiene que la instalación debe recuperar 1.186 toneladas anuales de vidrio y 16 toneladas de material férreo, es decir, dar servicio a una población de **63.000 habitantes**.

## Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost

BALANCE ECONÓMICO ESCENARIO C	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
<b>INGRESOS</b>											
Venta de vidrio		16.595 €	23.707 €	23.707 €	23.707 €	23.707 €	23.707 €	23.707 €	23.707 €	23.707 €	23.707 €
Venta de compost		0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Venta de Chatarra		1.067 €	1.525 €	1.525 €	1.525 €	1.525 €	1.525 €	1.525 €	1.525 €	1.525 €	1.525 €
Ahorro Vertedero		25.213 €	36.018 €	36.018 €	36.018 €	36.018 €	36.018 €	36.018 €	36.018 €	36.018 €	36.018 €
<b>GASTOS</b>											
Personal		0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Gastos Electricos		-13.427 €	-13.427 €	-13.427 €	-13.427 €	-13.427 €	-13.427 €	-13.427 €	-13.427 €	-13.427 €	-13.427 €
Gastos de Mantenimiento		-15.150 €	-15.150 €	-15.150 €	-15.150 €	-15.150 €	-15.150 €	-15.150 €	-15.150 €	-15.150 €	-15.150 €
Gastos financieros		-40.320 €	-40.320 €	-40.320 €	-40.320 €	-40.320 €	-40.320 €	-40.320 €	-40.320 €	-40.320 €	-40.320 €
<b>INVERSIÓN INICIAL</b>											
Recursos propios		-60.500 €									
<b>AMORTIZACIONES</b>											
Amortización de Equipos		-27.000 €	-27.000 €	-27.000 €	-27.000 €	-27.000 €	-27.000 €	-27.000 €	-27.000 €	-27.000 €	-27.000 €
Amortización de Obra Civil		-10.000 €	-10.000 €	-10.000 €	-10.000 €	-10.000 €	-10.000 €	-10.000 €	-10.000 €	-10.000 €	-10.000 €
<b>VALORES RESIDUALES</b>											
Valor Residual Equipos											135.000 €
Valor Residual Obra Civil											100.000 €
<b>Beneficio Antes de Imp.</b>											
Impuesto de Sociedades		0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	-47.588 €
<b>Beneficio Después de Imp.</b>											
Amortización de Equipos		-60.500 €	-63.021 €	-44.646 €	-44.646 €	-44.646 €	-44.646 €	-44.646 €	-44.646 €	-44.646 €	142.765 €
Amortización de Obra Civil		10.000 €	10.000 €	10.000 €	10.000 €	10.000 €	10.000 €	10.000 €	10.000 €	10.000 €	27.000 €
<b>FLUJOS DE CAJA</b>											
		-60.500 €	-26.021 €	-7.646 €	-7.646 €	-7.646 €	-7.646 €	-7.646 €	-7.646 €	-7.646 €	179.765 €

Tabla 23. Flujos de caja para el escenario C

Si se analizan las distintas opciones parece razonable que el escenario A sea el más realista e interesante desde el punto de vista ingenieril ya que es la opción más desfavorable a priori. Sin embargo, la tasa interna de retorno (TIR) corresponde sucintamente a la tasa de actualización seleccionada, siendo igual al 10%. Para contrarrestar este hecho, se procederá a dar servicio a una población mayor que la tomada en la opción A, y que además, sirva como criterio de diseño de todos los equipos de la nueva línea instalada. Esto provocará, por consiguiente, que la TIR del proyecto sea superior a la

rentabilidad mínima exigida conllevando que el VAN sea positivo al final de la vida útil de la línea. De esta manera, se cumplen todos los parámetros que posibilitan una decisión afirmativa de cara a la realización de la inversión.

Por lo tanto, la situación óptima para esta opción debe corresponder a la gestión de los residuos domésticos mezclados generados por **175.000 habitantes**. Éste será el parámetro de diseño en el que se basan los cálculos siguientes.

### 4.3 Balance de Materia Completo para la Situación Óptima

Se asume que cada habitante genera una cantidad de residuos de 1,35 kg/día y que el 84% de ella acaba depositada en el contenedor como residuo mezclado, es decir, siendo susceptible de ser procesada en una planta de triaje y compostaje. El balance de materia de la planta que gestiona los residuos de la situación óptima es:

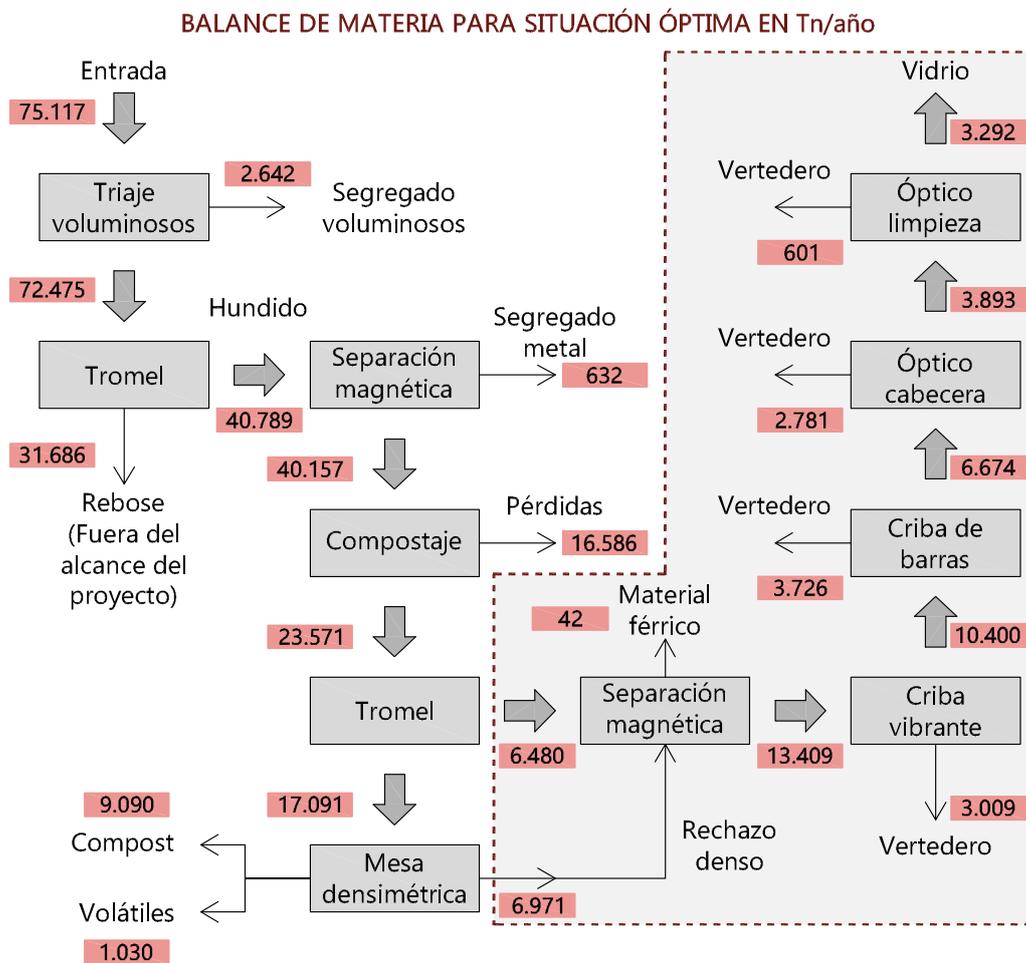


Figura 23. Balance de materia para la situación óptima

A continuación, se caracterizan algunas de las líneas del proceso:

## Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost

<b>CARACTERIZACIÓN DE LA LÍNEA ENTRANTE A COMPOSTAJE</b>		
<b>FRACCIÓN</b>	<b>TONELADAS/AÑO</b>	<b>% PESO</b>
Materia Orgánica	27.330	68
Papel y Cartón	1.309	3,25
Plásticos	613	1,52
Vidrio	4.996	12,44
Metales	45	0,11
Textil	287	0,78
Otros	5.577	13,9
<b>TOTAL</b>	<b>40.157 Tn/AÑO</b>	<b>100 %</b>

Tabla 24. Caracterización de la entrada a compostaje

Comparando los datos con los porcentajes de cada fracción entrante a la planta se observa que el trómel previo consigue concentrar la materia orgánica, que pasa de un 49% a un 68%, y la fracción de vidrio, que incrementa en 4 puntos porcentuales su valor.

<b>CARACTERIZACIÓN DE LA ENTRADA A LA LÍNEA DE RECUPERACIÓN DE VIDRIO</b>		
<b>FRACCIÓN</b>	<b>TONELADAS/AÑO</b>	<b>% PESO</b>
Materia Orgánica	2.231	16,6
Papel y Cartón	430	3,2
Plásticos	604	4,5
Vidrio	4.716	35
Metales	44	0,33
Textil	284	2,17
Otros	5.142	38,2
<b>TOTAL</b>	<b>13.451 Tn/AÑO</b>	<b>100 %</b>

Tabla 25. Caracterización de la entrada a la línea de recuperación de vidrio

A la entrada de la nueva línea instalada el vidrio ya representa la fracción mayoritaria

aunque aún se precisa su separación del resto de materiales. La composición final de la corriente de vidrio a la salida es:

<b>CARACTERIZACIÓN DE LA SALIDA DE VIDRIO RECUPERADO</b>		
<b>FRACCIÓN</b>	<b>TONELADAS/AÑO</b>	<b>% PESO</b>
Materia Orgánica	8	0,24
Papel y Cartón	1	0,03
Plásticos	2,89	0,08
Vidrio	3.266	99,2
Metales	0	0
Textil	0	0
Otros	14,4	0,45
<b>TOTAL</b>	<b>3.292 Tn/AÑO</b>	<b>100 %</b>

Tabla 26. Caracterización de la salida de vidrio recuperado

En consonancia con esta última tabla se puede concluir que el vidrio recuperado por la instalación cumplirá con las especificaciones impuestas por ECOVIDRIO para su venta ya que contiene menos de un 4% de impurezas.

La eficiencia de recuperación de vidrio de la planta de triaje y compostaje completa es de un 54,8% ya que se consigue la separación de 3.292 toneladas anuales de las 6.009 (8% de la cantidad total de residuos de entrada) que entran. El 45,2% restante acaba desafortunadamente contaminando otras salidas de material o depositadas en vertedero.

Analizando en concreto la línea objeto del proyecto, se atestigua que de las 4.716 toneladas anuales que entran, 3.292 son seleccionados, lo que implica un rendimiento general del 70% para la fracción vidrio. A priori puede parecer una eficiencia baja pero esto se debe a que los rendimientos individuales estimados para los equipos han sido propuestos a la baja, intentando modelar de una manera conservadora esas operaciones básicas.

## 4.4 Cálculos de Equipos

### 4.4.1 Cintas Transportadoras

Para el diseño de las cintas transportadoras hay que determinar previamente las propiedades físicas del material que circula por ella. El flujo másico que circula por cada cinta se ha calculado estimando que la línea de recuperación funciona 3 horas diarias durante 225 días al año [36], es decir, los equipos trabajan durante 675 horas al año. Además, la composición de la línea es un parámetro conocido del balance de materia por lo que para cada cinta se deben definir de manera ponderada la densidad aparente del conjunto, el ángulo de talud natural ( $\alpha$ ), el ángulo de sobrecarga del material ( $\beta$ ) y la granulometría. Como criterio general se establece una porosidad del conjunto de 0,8.

Con todos estos datos definidos se impondrán, de acuerdo a [37], el ancho de banda mínimo y la velocidad máxima de la cinta. Dependiendo de estos valores y respondiendo a criterios de seguridad en el diseño se establece una velocidad de operación de la cinta transportadora, con la cual se determina la capacidad teórica de la banda.

Con el fin de cerrar el diseño se debe recurrir al catálogo del fabricante de la cinta con objeto de seleccionar aquella que se adecue más a las características necesarias.

Cuando la cinta se encuentra inclinada hay que tener en cuenta que la inclinación de ésta no debe superar el valor del ángulo de sobrecarga más bajo (parámetro relacionado con la fricción del material y la banda) ya que si se cumple este criterio se asegura que ninguna fracción de material caiga hacia detrás por la cinta. Para tener en cuenta este hecho, se define un factor de aminoración que modela dichas pérdidas [38]:

$$k_e = 1 - 1,64 \times \left( \frac{\text{Ángulo Inclinación cinta} \times \pi}{180} \right)^2$$

Se establece una velocidad normal de trabajo de 0,5 m/s, velocidad similar a la del material dentro de los equipos para evitar que se produzcan retenciones que afecten al funcionamiento de la línea. De esta manera, se calculará la capacidad teórica de la cinta como:

$$\dot{m} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right) = \text{Capacidad teórica} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) \times \text{velocidad} \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \times k \times \text{densidad aparente} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

Para determinar la potencia requerida por la cinta en CV se recurre a la siguiente expresión:

$$W_m = (W1 + W2 + W3 + W4) \times (1 + \beta) \times (1 + K)$$

donde W1 es un dato tabulado que representa la potencia neta necesaria para el movimiento de la banda en vacío horizontal, expresado para una velocidad de 0,5 m/s. W2 se define como la potencia neta necesaria para el transporte horizontal de la carga. W3 es la potencia requerida para elevar el material. W4 modela la potencia añadida por cada *tripper* de descarga. El factor  $\beta$  varía en función del tipo de polea, su accionamiento y de los cojinetes. El coeficiente K depende del arco de contacto de la cinta y el tensor seleccionado.

### CT-01

La cinta recoge las salidas de material pertenecientes al rebose del trómel y al rechazo denso de la mesa densimétrica.

Flujo másico real = 19,92 Tn/h.

Flujo másico de diseño = 22 Tn/h = 22.000 kg/hora.

De acuerdo a su composición y a los datos de [39] se tiene:

Peso específico = 296,75 kg/m<sup>3</sup>.

Ángulo de talud natural = 35 °.

Ángulo de sobrecarga más desfavorable = 25°.

Granulometría = 0-80 mm.

Con estos datos se selecciona un ancho de banda mínimo igual a 350 mm y una velocidad máxima de operación de 2 m/s.

La cinta tiene que vencer una distancia de 16 metros en planta y 6,5 metros de altura por lo que la longitud total de la cinta es de 17,35 m. Además, se comprueba que el ángulo de inclinación de la cinta es de 22°, cumpliéndose que el ángulo de sobrecarga más desfavorable es superior a la inclinación.

Para este ángulo de inclinación el factor k es igual a 0,76.

La velocidad de operación de la cinta es de 0,5 m/s.

$$\text{Capacidad teórica} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = \frac{\text{m} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{\text{velocidad} \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \times k \times \text{densidad aparente} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} = \frac{22000 \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{0,5 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \times 0,76 \times 296,75 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} = 195 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$$

Atendiendo a los datos del fabricante, la cinta más adecuada es:

#### **Cinta de 850 mm de ancho de banda con artesa de 20°.**

Longitud de los rodillos que forman la artesa = 332 mm.

Capacidad de la cinta (para 1 m/s) = 220 m<sup>3</sup>/h.

La cinta posee una incorporación de materiales procedente de otra cinta por el lateral por lo que se refuerza la cinta disminuyendo la distancia entre rodillos un 10% del obtenido en tablas, siendo 1,3 m su valor.

La velocidad real de la cinta es el cociente entre el caudal volumétrico y la capacidad

## Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost

teórica suministrada por el fabricante, arrojando un valor de 0,34 m/s.

Se selecciona además un tipo de accionamiento simple con poleas recubiertas, tensor automático horizontal de contrapeso, cojinetes de bolas y arco de contacto de 210°.

Los parámetros para calcular la potencia del equipo son:

$$W1 = W1 \text{ tabulado} \times (0,34/0,5) = 0,71 \text{ CV} \times 0,68 = 0,48 \text{ CV.}$$

$$W2 = 0,16 \text{ CV.}$$

$$W3 = 0,48 \text{ CV.}$$

$$W4 = 0 \text{ CV.}$$

$$\beta = 0,103.$$

$$K = 0,4.$$

$$\text{Potencia requerida} = 1,73 \text{ CV} = \mathbf{1,27 \text{ kW.}}$$

### **CT-02**

Esta cinta se encarga de recoger el rechazo denso de la mesa densimétrica y deposita el material en la cinta CT-01.

$$\text{Caudal másico real} = 10,32 \text{ Tn/h.}$$

$$\text{Caudal de diseño} = 12 \text{ Tn/h.}$$

$$\text{Peso específico} = 345 \text{ kg/m}^3.$$

$$\text{Ángulo de talud natural} = 35^\circ.$$

$$\text{Ángulo de sobrecarga más desfavorable} = 25^\circ.$$

$$\text{Granulometría} = 0-40 \text{ mm.}$$

$$\text{Longitud cinta} = 5 \text{ m.}$$

$$\text{Altura que debe superar la cinta} = 0 \text{ m.}$$

Se cumple que la inclinación de la cinta es menor que el ángulo de sobrecarga más desfavorable.

$$\text{Ancho de banda mínimo recomendado} = 350 \text{ mm.}$$

$$\text{Velocidad máxima de operación recomendada} = 2 \text{ m/s.}$$

$$\text{Velocidad normal de operación} = 0,5 \text{ m/s.}$$

$$\text{Factor de inclinación (k)} = 1.$$

$$\text{Capacidad teórica} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) = \frac{\text{m} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{\text{velocidad} \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \times k \times \text{densidad aparente} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} = \frac{12000 \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{0,5 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \times 1 \times 345 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} = 69,5 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right)$$

La cinta más acorde a esta capacidad teórica calculada es:

**Banda plana de 700 mm.**

$$\text{Distancia entre rodillos en el tramo de ida} = 1,5 \text{ m.}$$

Capacidad de la cinta (para 1 m/s) = 81 m<sup>3</sup>/h.

Velocidad real de la cinta = 0,43 m/s.

Accionamiento simple con poleas recubiertas.

Tensor automático horizontal de contrapeso.

Rodamientos de bolas.

Arco de contacto de 210°.

Los parámetros para calcular la potencia del equipo son:

$W1 = W1 \text{ tabulado} \times (0,43/0,5) = 0,4 \text{ CV} \times 0,86 = 0,34 \text{ CV}.$

$W2 = 0,1 \text{ CV}.$

$W3 = 0 \text{ CV}.$

$W4 = 0 \text{ CV}.$

$\beta = 0,103.$

$K = 0,4.$

Potencia requerida por la cinta = 0,68 CV = **0,5 kW.**

### **CT-03**

La cinta transportadora recoge la fracción hundida a través de las dos cribas y la vierte en el separador óptico de cabecera.

Caudal másico real = 9,88 Tn/h.

Caudal de diseño = 12 Tn/h.

Peso específico ponderado = 375 kg/m<sup>3</sup>.

Ángulo de talud natural = 35°.

Ángulo de sobrecarga más desfavorable = 25°.

Granulometría = 0-40 mm, mayoritariamente planos.

Longitud cinta plano = 11 m.

Longitud cinta real = 12 m.

Altura que debe superar la cinta = 4 m.

Inclinación = 20°.

Se cumple que la inclinación de la cinta es menor que el ángulo de sobrecarga más desfavorable.

Ancho de banda mínimo = 350mm.

Velocidad máxima de operación = 2 m/s.

Velocidad normal de operación = 0,5 m/s.

Factor de inclinación (k) = 0,8.

## Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost

$$\text{Capacidad teórica} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = \frac{m \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{\text{velocidad} \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \times k \times \text{densidad aparente} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} = \frac{12000 \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{0,5 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \times 0,8 \times 375 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} = 80 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$$

La banda seleccionada corresponde a:

**Banda de 550 mm con artesa de 20° y longitud de rodillo de 216 mm.**

Capacidad de la cinta (para 1 m/s) = 87 m<sup>3</sup>/h.

Distancia entre rodillos = 1,5 m.

Velocidad real de la cinta = 0,37 m/s.

Accionamiento simple con poleas recubiertas.

Tensor automático horizontal de contrapeso.

Rodamientos de bolas.

Arco de contacto de 210°.

Los parámetros para calcular la potencia del equipo corresponden a:

W1 = W1 tabulado x (0,37/0,5) = 0,4 CV x 0,74 = 0,25 CV.

W2 = 0,12 CV.

W3 = 0,14 CV.

W4 = 0 CV.

β = 0,103.

K = 0,4.

Potencia requerida por la cinta = 0,78 CV = **0,58 kW**.

### **CT-04**

La cinta transporta el vidrio recuperado en los separadores ópticos, depositando el material en su correspondiente troje.

Caudal másico real = 4,88 Tn/h.

Caudal de diseño = 6 Tn/h.

Peso específico ponderado = 490 kg/m<sup>3</sup>.

Ángulo de talud natural = 35°.

Ángulo de sobrecarga más desfavorable = 25°.

Granulometría = 0-40 mm, mayoritariamente planos.

Longitud cinta en plano = 8,5 m.

Longitud cinta inclinada = 9 m.

Altura que debe superar la cinta = 3 m.

Inclinación de la cinta = 20°.

Se cumple que la inclinación de la cinta es menor que el ángulo de sobrecarga más

desfavorable.

Ancho de banda mínimo = 350mm.

Velocidad máxima de operación = 2 m/s.

Velocidad normal de operación = 0,5 m/s.

Factor de inclinación (k) = 0,8.

$$\text{Capacidad teórica} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = \frac{\text{m} \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{\text{velocidad} \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \times k \times \text{densidad aparente} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} = \frac{6000 \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{0,5 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \times 0,8 \times 490 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} = 30,6 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$$

**Banda plana de ancho de banda igual a 500 mm.**

Capacidad de la cinta (para 1 m/s) = 38 m<sup>3</sup>/h.

Distancia entre rodillos en el tramo de ida = 1,5 m.

Velocidad real de la cinta = 0,32 m/s.

Accionamiento simple con poleas recubiertas.

Tensor automático horizontal de contrapeso.

Cojinetes de bolas.

Arco de contacto de 210°.

Los parámetros para calcular la potencia del equipo son:

W1 = W1 tabulado x (0,32/0,5) = 0,35 CV x 0,64 = 0,22 CV.

W2 = 0,08 CV.

W3 = 0,08 CV.

W4 = 0 CV.

β = 0,103.

K = 0,4.

Potencia requerida para el funcionamiento de la cinta = 0,58 CV = **0,43 kW**.

**CT-05**

La cinta recupera el material que va a vertedero de la criba vibrante y de la criba de barras, evacuando el contenido sobre el troje delimitado para tal fin.

Caudal másico real = 9,97 Tn/h.

Caudal de diseño = 12 Tn/h.

Peso específico ponderado = 218 kg/m<sup>3</sup>.

Ángulo de talud natural = 35°.

Ángulo de sobrecarga más desfavorable = 25°.

Granulometría = 0-80 mm.

Longitud de la cinta en plano = 12,5 m.

## Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost

Longitud cinta inclinada = 13 m.

Altura que debe superar = 4 m.

Inclinación = 18°.

Se cumple que la inclinación de la cinta es menor que el ángulo de sobrecarga más desfavorable.

Ancho de banda mínimo recomendado = 350mm.

Velocidad máxima de operación recomendada = 2 m/s.

Velocidad normal de operación = 0,5 m/s.

Factor de inclinación (k) = 0,84.

$$\text{Capacidad teórica} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right) = \frac{m \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{\text{velocidad} \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \times k \times \text{densidad aparente} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} = \frac{12000 \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{0,5 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \times 0,84 \times 218 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} = 131 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right)$$

### Cinta de 700 mm de ancho de banda con artesa de 20°.

Capacidad de la cinta (para 1 m/s) = 148 m<sup>3</sup>/h.

Longitud de los rodillos que forman la artesa = 266 mm.

Distancia entre rodillos en la ida = 1,3 m.

Velocidad real de la cinta = 0,37 m/s.

Accionamiento simple con poleas recubiertas.

Tensor automático horizontal de contrapeso.

Rodamientos de bolas.

Arco de contacto de 210°.

Los parámetros para calcular la potencia del equipo son:

W1 = W1 tabulado x (0,37/0,5) = 0,48 CV x 0,74 = 0,35 CV.

W2 = 0,1 CV.

W3 = 0,16 CV.

W4 = 0 CV.

β = 0,103.

K = 0,4.

Potencia exigida por el equipo = 0,94 CV = **0,69 kW**.

### CT-06

La cinta transporta el material rechazado por los separadores ópticos y los deposita en el troje junto al resto de material a vertedero.

Caudal másico real = 5,01 Tn/h.

Caudal de diseño = 6 Tn/h.

Peso específico ponderado = 256 kg/m<sup>3</sup>.

Ángulo de talud natural = 35°.

Ángulo de sobrecarga más desfavorable = 25°.

Granulometría = 0-40 mm, mayoritariamente plano.

Longitud de la cinta plana = 12,5 m.

Longitud cinta inclinada = 13 m.

Altura que debe alcanzar la cinta = 4 m.

Inclinación = 18°.

Se cumple que la inclinación de la cinta es menor que el ángulo de sobrecarga más desfavorable.

Ancho de banda mínimo recomendado = 350mm.

Velocidad máxima de operación = 2 m/s.

Velocidad normal de operación = 0,5 m/s.

Factor de inclinación (k) = 0,84.

$$\text{Capacidad teórica} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) = \frac{m \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{\text{velocidad} \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \times k \times \text{densidad aparente} \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} = \frac{6000 \left( \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right)}{0,5 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \times 0,84 \times 256 \left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)} = 55,8 \left( \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right)$$

### **Banda plana de ancho de banda igual a 650 mm.**

Capacidad de la cinta (para 1 m/s) = 69 m<sup>3</sup>/h.

Distancia entre rodillos = 1,5 m.

Velocidad real de la cinta = 0,34 m/s.

Accionamiento simple con poleas recubiertas.

Tensor automático horizontal de contrapeso.

Rodamientos de bolas.

Arco de contacto de 210°.

Los parámetros para calcular la potencia del equipo son:

W1 = W1 tabulado x (0,34/0,5) = 0,45 CV x 0,68 = 0,32 CV.

W2 = 0,07 CV.

W3 = 0,12 CV.

W4 = 0 CV.

β = 0,103.

K = 0,4.

Potencia de la cinta = 0,79 CV = **0,58 kW**.

## Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost

A continuación, se muestra una tabla resumen con todas las características de las diferentes cintas seleccionadas:

<b>CUADRO RESUMEN DE LAS CINTAS DE LA INSTALACIÓN</b>						
	<b>CT-01</b>	<b>CT-02</b>	<b>CT-03</b>	<b>CT-04</b>	<b>CT-05</b>	<b>CT-06</b>
Flujo másico real (Tn/h)	19,9	10,32	9,9	4,9	9,9	5,01
Flujo másico diseño (Tn/h)	<b>22</b>	<b>12</b>	<b>12</b>	<b>6</b>	<b>12</b>	<b>6</b>
Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	296,75	345	375	490	218	256
Longitud (m)	17,5	5	12	9	13	13
Altura entre extremos (m)	6,5	0	4	3	4	4
Inclinación	22°	0°	20°	20°	18°	18°
Banda seleccionada	<b>Artesa 20°</b>	<b>Plana</b>	<b>Artesa 20°</b>	<b>Plana</b>	<b>Artesa 20°</b>	<b>Plana</b>
Ancho de banda	<b>850</b>	<b>700</b>	<b>550</b>	<b>500</b>	<b>700</b>	<b>650</b>
Capacidad teórica calculada	195	69,5	80	30,6	131	55,8
Capacidad seleccionada (m <sup>3</sup> /h)	220	81	87	38	148	69
Distancia entre rodillos ida (m)	1,3	1,5	1,5	1,5	1,3	1,5
Velocidad operación (m/s)	0,34	0,43	0,37	0,32	0,37	0,34
Accionamiento	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple
Poleas	Recubiertas	Recubiertas	Recubiertas	Recubiertas	Recubiertas	Recubiertas
Tensor	Horizontal Automático					
Arco de Contacto	210°	210°	210°	210°	210°	210°
Potencia requerida (CV)	1,73	0,68	0,78	0,58	0,94	0,79
Potencia requerida (kW)	<b>1,27</b>	<b>0,5</b>	<b>0,58</b>	<b>0,43</b>	<b>0,69</b>	<b>0,58</b>

Tabla 27. Cuadro resumen de las cintas transportadoras de la instalación

#### 4.4.2 Cribas

Los parámetros que hay que definir en el diseño de una criba son la superficie de cribado del equipo y su ancho.

La superficie de cribado se calcula como:

$$A(m^2) = \frac{T\left(\frac{tn}{h}\right)}{C\left(\frac{tn}{hm^2}\right) \times M \times K \times H \times D \times S \times P}$$

donde A es la superficie de cribado en m<sup>2</sup>.

T son las toneladas/hora de alimentación al equipo.

C es el factor de capacidad base, obtenidos de tablas.

M es el factor de sobretamaño que se determina de los datos tabulados en tabla de acuerdo al porcentaje de material superior a la luz de malla).

K, también es un valor tabulado, que se conoce como factor de subtamaño y se determina una vez conocido el material inferior a la mitad de la luz de malla.

H es el factor de humedad. Variará en función de la humedad del material cribado.

D se obtiene de tablas y representa el factor de densidad.

S es el factor de superficie que se calcula utilizando la superficie útil de malla.

P es el factor de piso que tiene un valor de 1 para las cribas de un solo paso.

#### **Criba Vibrante 40 mm**

Caudal másico real = 19,9 Tn/h.

Caudal de diseño = 22 Tn/h.

Para una luz de malla de 40 mm el factor de capacidad base C = 70.

Del balance de materia tenemos que el 28,9 % del material queda retenido en la malla por lo que el material superior a la luz de malla se estima en 22%, el 6,9% restante es material con menos tamaño que no ha pasado por la malla. Por lo tanto, para este porcentaje, M= 0,9.

El material inferior a la mitad de la luz de malla se estima como el 50% del material hundido por la malla, es decir, 35%. Con esto se acude a las tablas y K vale 0,9.

Se supone una humedad del 10% por lo que H es igual a 0,2.

La densidad aparente del material es la misma que se calculó para el diseño de la cinta CT-01, 296,75 kg/m<sup>3</sup>, conllevando que el factor de densidad D sea 0,2.

Se selecciona una malla de paso cuadrado con 40 mm de abertura y 3,4 mm será el diámetro del alambre. El % de superficie útil de malla se calcula como  $L^2 / (L+D)^2 \times 100$ ,

## Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost

arrojando un valor de 85% por lo que  $S=1,7$ .

Factor de piso (P) = 1.

Introduciendo los datos en la fórmula mostrada anteriormente se obtiene que el área de cribado necesario es de **5,7 m<sup>2</sup>**.

Seguidamente, se calcula el ancho de la criba como:

$$L(m) = \frac{R\left(\frac{tn}{h}\right)}{D\left(\frac{kg}{dm^3}\right) \times U(\text{factor de luz de malla})}$$

L corresponde al ancho de la criba expresado en metro.

R son las toneladas a la hora que salen como rechazo del equipo = 4,45 Tn/h.

D es la densidad aparente en  $kg/dm^3 = 0,295 kg/dm^3$ .

U es el factor de luz de malla que se determinada por medio de tablas. Para la luz de malla seleccionada, este factor corresponde a 45,72.

Aplicando la fórmula, el ancho de criba mínimo estimado es de **0,33 m**.

### **Criba de barras**

Se repite el proceso análogamente al diseño de la criba vibrante.

Flujo de material a procesar = 15,4 Tn/h.

Flujo de diseño = 18 Tn/h.

Densidad aparente = 315  $kg/m^3$ .

Se estima que la abertura de las barras es de 15mm.

Factor de capacidad base (C) para la hendidura seleccionada = 47.

M = 0,92 para un porcentaje de sobretamaño igual a 36%.

Se interpreta un porcentaje del 32% de material inferior a la mitad de la separación de las barras por lo que (K) = 0,85.

Factor de humedad (H) = 0,2.

Factor de densidad (D) = 0,25.

Se supone que el porcentaje de malla útil del 70% por lo que  $S = 1,4$ .

Factor de Piso (P)=1

Se calcula que se precisa un área total de cribado igual a **7 m<sup>2</sup>**.

El ancho de criba se calcula como:

Toneladas seleccionadas como rechazo por el equipo = 5,52 Tn/h.

Densidad aparente del material = 0,315  $kg/dm^3$ .

Factor de luz de malla (U) = 45,72

Por lo que el ancho de criba mínimo debe ser igual a **0,38 m**.

#### 4.4.3 Trojes de Almacenamiento

##### Material a vertedero

En este troje se vierte el material que lleva la cinta CT-05 y CT-06.

Se asume que las cintas descargarán su contenido de manera natural formando un cono de material bajo el equipo. El conjunto formará un ángulo con el suelo de acuerdo a su ángulo de reposo y además se tendrá en cuenta que el material disminuirá su porosidad a un valor de 0,5.

Para el material de la cinta CT-05 se estima que la altura máxima del cono formado será 3 m y su ángulo de reposo 35°. Utilizando las relaciones trigonométricas se obtiene el radio de la sección triangular del cono como:

$$R(m) = \frac{H(m)}{\tan(\text{ángulo de reposo})} = \frac{3 \text{ m}}{\tan(35^\circ)} = 4,28 \text{ m}$$

Conocido el radio y la altura del cono es trivial obtener el volumen que ocupa dicho elemento:

$$V(m^3) = \frac{1}{3} \times \pi \times R^2 \times H = \frac{1}{3} \times \pi \times 4,28^2 \times 3 = 57,54 \text{ m}^3$$

Se tiene la densidad aparente del material relacionándola con la porosidad del conjunto y su valor es de 550 kg/m<sup>3</sup>. De esta manera se deduce que el cono de material puede almacenar un total de 31,7 Tn. Como el caudal másico real por la cinta es de 9,9 tn/h, que equivale a que cada **3,2 horas** aproximadamente haya que retirar el material almacenado con el fin de dejar libre el troje, es decir, habría que retirar el cono formado al final de la jornada laboral.

Se repite el mismo procedimiento para el cono que forma el material depositado por la cinta CT-06.

La altura máxima del cono es 3 metros por lo que el radio que forma el material es idéntico al de la otra cinta ya que el ángulo de reposo es el mismo.

El volumen del material formado es 57,54 m<sup>3</sup>. La densidad aparente del material es 632,6 kg/m<sup>3</sup>. Esto provoca que se puedan almacenar 36,4 tn de material y como se sabe que el caudal másico de la cinta es 5,01 tn/h conlleva que podrá almacenarse el material generado durante **7,26 horas** de trabajo antes de ser retirado. Cada dos días y medio habría que retirar el cono formado por esta cinta.

De manera general, se deduce que el troje de almacenamiento de estos materiales necesita un área de **130 m<sup>2</sup>**.

## Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost

---

### Troje de metal

El cono formado por la deposición de esta fracción será de 2 metros de altura y el ángulo de reposo natural de 32°. Consecuentemente el radio será de 3,2 m. El volumen del cono formado es igual a 21,5 m<sup>3</sup>.

La densidad aparente del material se sitúa en el entorno de 1200 kg/m<sup>3</sup> por lo que podrá almacenarse material suficiente como para no colmatar el troje hasta pasados **7 meses**.

Se destina una superficie para este troje de **25 m<sup>2</sup>**.

### Troje de vidrio

Altura máxima del cono = 3 m.

Ángulo de reposo = 37°.

Por medio de las relaciones trigonométricas se obtiene que el radio debe valer 4 m.

El volumen del cono formado será igual a 50 m<sup>3</sup>.

Densidad aparente del material = 1250 kg/m<sup>3</sup>.

En consecuencia el troje podrá almacenar 62,5 Tn de vidrio recuperado y como el flujo másico de la línea es de 4,9 Tn/h, entonces harán falta **12,75 horas** para llenar el troje de almacenamiento. Cada 4 días aproximadamente se requiere el vaciado del troje.

Se destina una superficie de **55 m<sup>2</sup>** para albergar dicho troje.

# 5. Implantación y Selección de Equipos

## 5.1 Implantación

### Planta

#### IMPLANTACIÓN DE LA LÍNEA DE RECUPERACIÓN DE VIDRIO

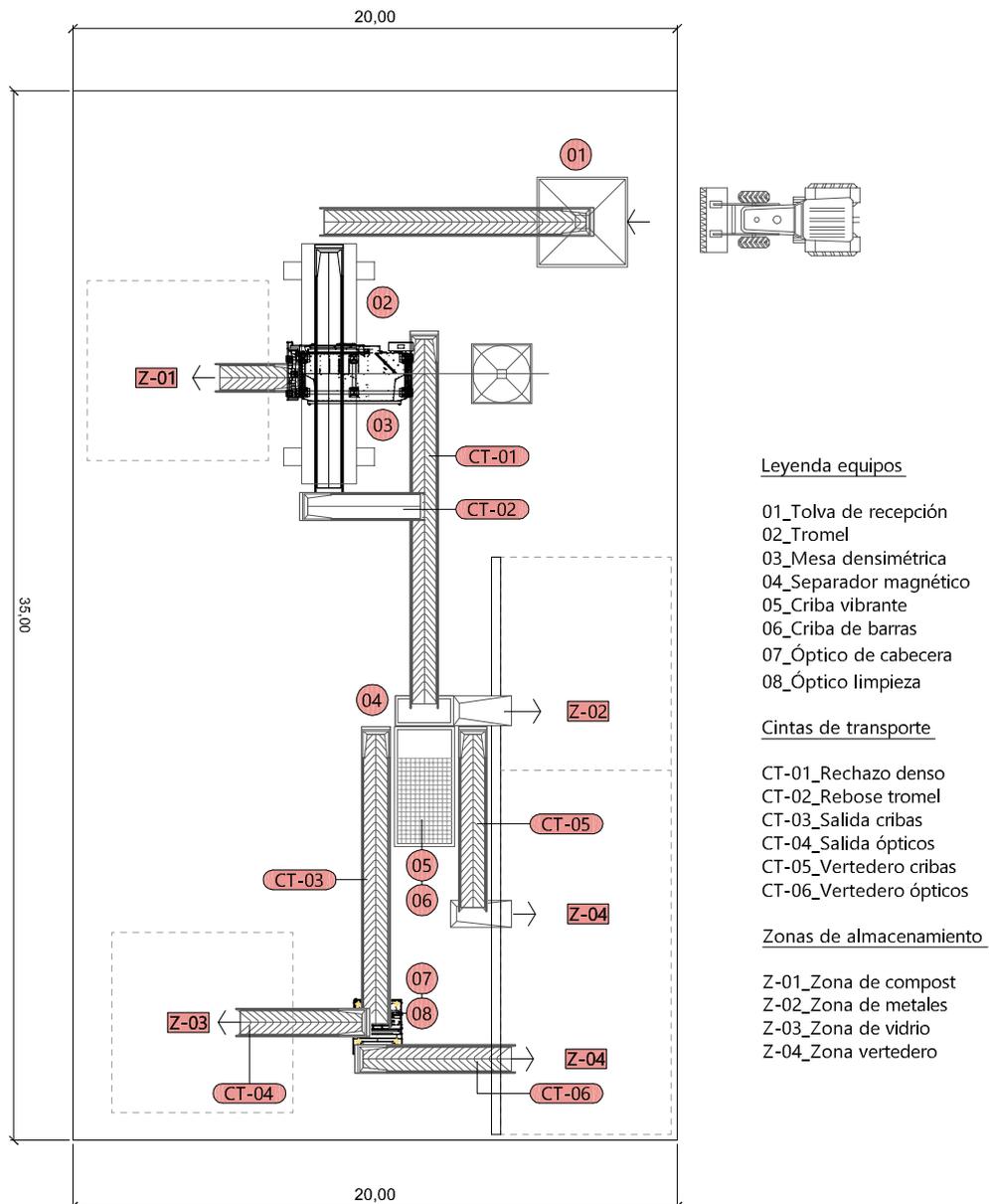


Figura 24. Plano en planta de la línea de recuperación de vidrio

# Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost

## Perfil

VISTA LATERAL DE LA LÍNEA DE RECUPERACIÓN DE VIDRIO

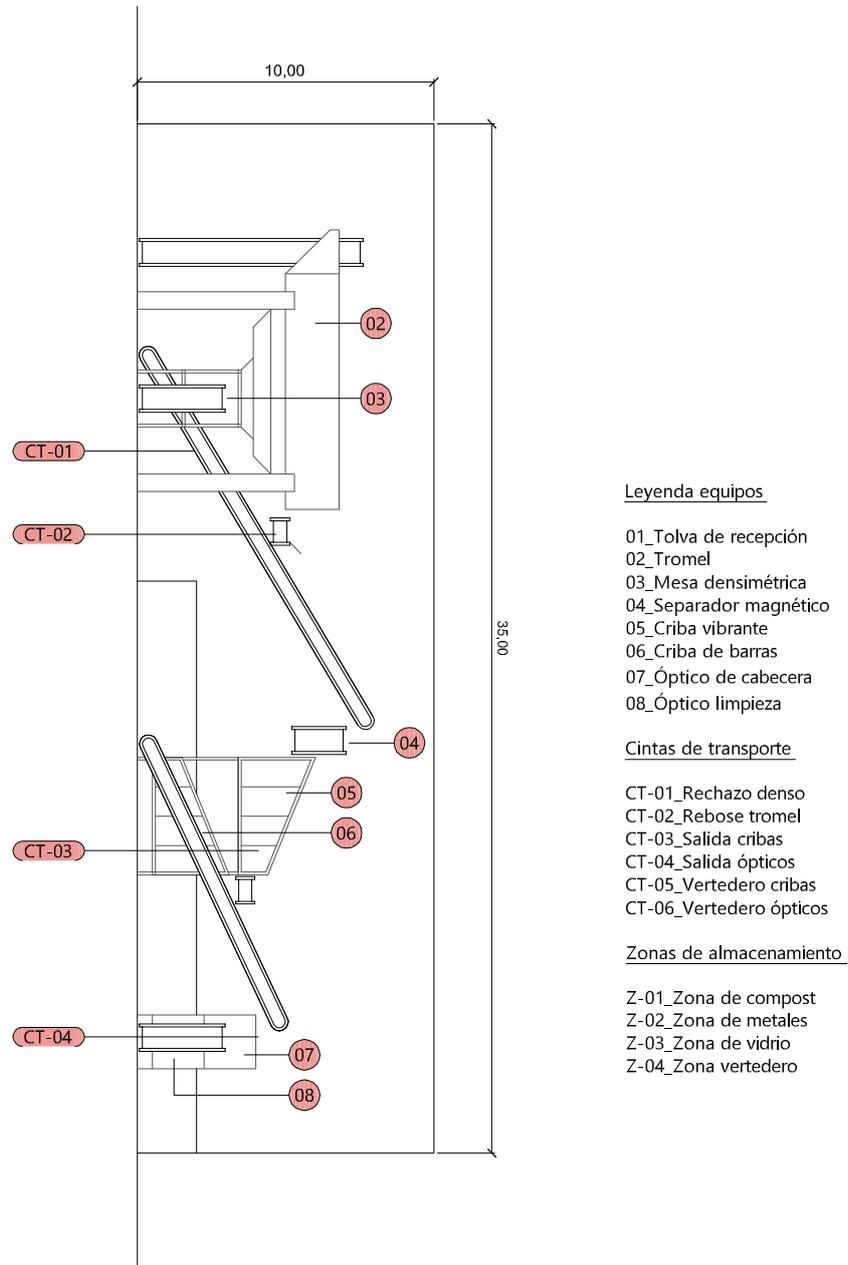


Figura 25. Vista lateral de la línea de recuperación de vidrio

## 5.2 Selección de Equipos

En este apartado se establecen las hojas de requisitos mínimos que deben tener los equipos seleccionados en la línea de recuperación de vidrio:

### Separador Magnético

<b>HOJA DE REQUISITOS MÍNIMOS DEL SEPARADOR MAGNÉTICO</b>	
<b>TIPOLOGÍA</b>	
Tambor Magnético	
<b>DIMENSIONES MÍNIMAS</b>	
800 mm de ancho para colocación al final de cinta CT-01	
<b>CAPACIDAD DE TRATAMIENTO NOMINAL</b>	
22 Tn/h ó 75 m <sup>3</sup> /h para material con peso específico 296,75 kg/m <sup>3</sup>	
<b>POSIBLES EMPRESAS PROVEEDORAS</b>	
Eriez, Drago Electrónica, Felemamg, Regulator - Cetrisa, Steinert, Sollau	

Tabla 28. Hoja de requisitos mínimos del separador magnético  
Fuente [40].

### Criba Vibrante

<b>HOJA DE REQUISITOS MÍNIMOS DE LA CRIBA VIBRANTE</b>	
<b>CAPACIDAD DE TRATAMIENTO NOMINAL</b>	
22 Tn/h ó 75 m <sup>3</sup> /h para material con peso específico 296,75 kg/m <sup>3</sup>	
<b>ÁREA DE CRIBADO REQUERIDA</b>	
6 m <sup>2</sup>	
<b>LUZ DE MALLA</b>	
40 mm	
<b>TIPOLOGÍA DE LA MALLA</b>	
Malla de paso cuadrado y recubierta de material resistente al desgaste	
<b>POSIBLES PROVEEDORES</b>	
Binder +Co, Dartek, Urbar, Rollier	

Tabla 29. Hoja de requisitos mínimos de la criba vibrante

## Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost

### **Criba de Barras**

<b>HOJA DE REQUISITOS MÍNIMOS DE LA CRIBA DE BARRAS</b>
<b>CAPACIDAD DE TRATAMIENTO NOMINAL</b>
22 Tn/h ó 68 m <sup>3</sup> /h para material con peso específico 296,75 kg/m <sup>3</sup>
<b>ÁREA DE CRIBADO</b>
7 m <sup>2</sup>
<b>TIPOLOGÍA DE BARRAS</b>
Barras recubiertas con material antidesgaste
<b>POSIBLES EMPRESAS SUMINISTRADORAS DEL EQUIPO</b>
Binder +Co, Dartek, Urbar, Rollier

Tabla 30. Hoja de requisitos mínimos de la criba de barras

### **Separador Óptico de Cabecera**

<b>HOJA DE REQUISITOS MÍNIMOS DEL SEPARADOR ÓPTICO DE CABECERA</b>
<b>CAPACIDAD DE TRATAMIENTO NOMINAL</b>
12 Tn/h ó 32 m <sup>3</sup> /h para material con peso específico 375 kg/m <sup>3</sup>
<b>MATERIAL SELECCIONADO</b>
Vidrio
<b>RENDIMIENTO MÍNIMO EXIGIDO</b>
90% para la fracción vidrio
<b>SALIDAS DEL EQUIPO</b>
2, 1 línea de vidrio y 1 línea de material no seleccionado
<b>POSIBLES PROVEEDORES</b>
Binder +Co, Pellenc ST, Picvisa, Steinert, Tomra

Tabla 31. Hoja de requisitos mínimos del separador óptico de cabecera  
Fuente [40].

**Separador Óptico de Limpieza**

<b>HOJA DE REQUISITOS MÍNIMOS DEL SEPARADOR ÓPTICO DE LIMPIEZA</b>
<b>CAPACIDAD DE TRATAMIENTO NOMINAL</b>
7 Tn/h ó 15 m <sup>3</sup> /h para material con peso específico de 470 kg/m <sup>3</sup>
<b>MATERIAL SELECCIONADO</b>
Material impropio al vidrio
<b>EFICIENCIA EXIGIDA</b>
90% sobre la fracción de material seleccionado
<b>SALIDAS DEL EQUIPO</b>
2, 1 de material seleccionado a vertedero y 1 de vidrio
<b>POSIBLES PROVEEDORES</b>
Binder +Co, Pellenc ST, Picvisa, Steinert, Tomra

Tabla 32. Hoja de requisitos mínimos del separador óptico de limpieza  
Fuente [40].

## 6. Balance Económico Final y Conclusiones

En este apartado se realiza el análisis de la inversión para la situación óptima. Como ya se dedujo en un apartado anterior, el escenario de diseño fijado correspondía a la gestión de los residuos domésticos producidos por **175.000 habitantes**. Esto conlleva que la línea de recuperación separe 3.292 toneladas de vidrio y 42 toneladas de metal al año. De esta manera, procediendo igual que en apartados anterior, el balance queda:

BALANCE ECONOMICO SITUACIÓN ÓPTIMA	AÑO 0	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10
<b>INGRESOS</b>											
Venta de vidrio		46,088 €	65,840 €	65,840 €	65,840 €	65,840 €	65,840 €	65,840 €	65,840 €	65,840 €	65,840 €
Venta de compost		0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Venta de Chatarra		2,965 €	4,235 €	4,235 €	4,235 €	4,235 €	4,235 €	4,235 €	4,235 €	4,235 €	4,235 €
Ahorro Vertedero		70,021 €	100,031 €	100,031 €	100,031 €	100,031 €	100,031 €	100,031 €	100,031 €	100,031 €	100,031 €
<b>GASTOS</b>											
Personal		0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Gastos Electricos		-4,336 €	-4,336 €	-4,336 €	-4,336 €	-4,336 €	-4,336 €	-4,336 €	-4,336 €	-4,336 €	-4,336 €
Gastos de Mantenimiento		-15,150 €	-15,150 €	-15,150 €	-15,150 €	-15,150 €	-15,150 €	-15,150 €	-15,150 €	-15,150 €	-15,150 €
Gastos financieros		0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
<b>INVERSION INICIAL</b>											
Recursos propios		-605,000 €									
<b>AMORTIZACIONES</b>											
Amortización de Equipos		-27,000 €	-27,000 €	-27,000 €	-27,000 €	-27,000 €	-27,000 €	-27,000 €	-27,000 €	-27,000 €	-27,000 €
Amortización de Obra Civil		-10,000 €	-10,000 €	-10,000 €	-10,000 €	-10,000 €	-10,000 €	-10,000 €	-10,000 €	-10,000 €	-10,000 €
<b>VALORES RESIDUALES</b>											
Valor Residual Equipos											135,000 €
Valor Residual Obra Civil											100,000 €
<b>Beneficio Antes de Imp.</b>											
Impuesto de Sociedades		-605,000 €	62,588 €	113,619 €	113,619 €	113,619 €	113,619 €	113,619 €	113,619 €	113,619 €	113,619 €
Beneficio Después de Imp.		-605,000 €	46,941 €	85,215 €	85,215 €	85,215 €	85,215 €	85,215 €	85,215 €	85,215 €	85,215 €
Amortización de Equipos			27,000 €	27,000 €	27,000 €	27,000 €	27,000 €	27,000 €	27,000 €	27,000 €	27,000 €
Amortización de Obra Civil			10,000 €	10,000 €	10,000 €	10,000 €	10,000 €	10,000 €	10,000 €	10,000 €	10,000 €
<b>FLUOS DE CAJA</b>											
		-605,000 €	83,941 €	122,215 €	122,215 €	122,215 €	122,215 €	122,215 €	122,215 €	122,215 €	122,215 €
											298,465 €

Tabla 33. Balance económico para la situación óptima

## Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost

Se observa como los gastos de consumo eléctrico se han visto reducidos respecto a los mostrados en los escenarios anteriores. Esto se debe a que en las estimaciones propuestas se estimaban en 1.776 las horas de funcionamiento anual de la línea, mientras que para el diseño de los equipos se ha visto necesaria reducir esta carga horaria a 675 horas al año, adaptando de esta forma la instalación a lo que ocurre en las plantas características similares.

Las estimaciones referentes a la inversión inicial en equipos y obra civil fueron bastante precisas por lo que tras la búsqueda de los costes de equipos seleccionados se concluye que esta inversión es la misma que la mostrada en los balances económicos previos.

Se plantea el balance económico de manera conservadora ya que se asume que no se recibe ninguna subvención por lo que toda la financiación es sufragada por los recursos propios y no hace falta recurrir a ninguna línea de crédito. De esta manera, la tasa de actualización para el cálculo del Valor Actual Neto corresponde a la rentabilidad mínima exigida por la empresa que es igual al 10%.

El V.A.N. para n años se calcula como:

$$\text{V.A.N(€)} = - \text{Inversión inicial} + \sum_{i=1}^n \frac{(\text{Flujos de Caja})_i}{(1+k)^i} = -I_0 + \frac{FC_1}{1+k} + \frac{FC_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{FC_n}{(1+k)^n}$$

Utilizando los flujos de caja mostrados en la tabla anterior, se obtiene un valor positivo del V.A.N de **162.830 €**.

Además, se ha determinado el valor de la tasa interna de retorno o rentabilidad que se define como la tasa de actualización que provoca que el VAN sea 0 al final del proyecto, arrojando un resultado de **15,7%**.

Como el VAN tiene un valor positivo y la TIR está por encima de la rentabilidad mínima exigida para el proyecto (10%) se puede concluir que la realización de la inversión que supone la instalación de la nueva línea de recuperación es **FAVORABLE**.

### 6.1 Análisis de Sensibilidad

Se plantea un análisis de sensibilidad para deducir cómo reacciona la inversión ante posibles cambios en algunos de los parámetros que lo componen. Las variables estudiadas son: el precio de venta de la tonelada de vidrio y la cantidad de habitantes cuyos residuos debe tratar la planta.

A continuación, se realiza una tabla, donde se muestran los datos de Valor Actual Neto de la inversión con una tasa de actualización igual a la de la situación óptima (10%), para el rango +-50% en las variables estudiadas:

## Balance Económico Final y Conclusiones

MAGNITUD	PRECIO VIDRIO										
	+50 %	+40 %	+30 %	+20 %	+10 %	ÓPTIMO	-10 %	-20 %	-30 %	-40 %	-50 %
+50 % HABITANTES	640.943 €	651.404 €	611.865 €	572.326 €	532.787 €	493.249 €	453.710 €	414.171 €	374.632 €	335.093 €	295.554 €
+40 % HABITANTES	615.360 €	578.367 €	541.375 €	504.382 €	467.389 €	430.397 €	393.404 €	356.412 €	319.419 €	282.426 €	245.434 €
+30 % HABITANTES	533.214 €	498.444 €	464.674 €	430.404 €	396.134 €	361.864 €	327.593 €	293.323 €	259.053 €	224.783 €	190.513 €
+20 % HABITANTES	453.785 €	422.149 €	390.513 €	358.878 €	327.242 €	295.606 €	263.970 €	232.334 €	200.698 €	169.062 €	137.426 €
+10 % HABITANTES	374.356 €	345.354 €	316.353 €	281.357 €	258.350 €	229.348 €	200.347 €	171.345 €	142.343 €	113.342 €	84.340 €
ÓPTIMO	294.626 €	268.267 €	241.907 €	215.548 €	189.189 €	162.830 €	136.471 €	110.111 €	83.752 €	57.393 €	31.034 €
-10 % HABITANTES	215.250 €	191.525 €	167.801 €	144.076 €	120.351 €	96.626 €	72.901 €	49.176 €	25.451 €	1.726 €	-21.998 €
-20 % HABITANTES	135.848 €	114.757 €	93.667 €	72.576 €	51.486 €	30.395 €	9.305 €	-11.785 €	-32.876 €	-53.966 €	-75.057 €
-30 % HABITANTES	56.172 €	37.724 €	19.275 €	827 €	-17.620 €	-36.068 €	-54.517 €	-72.965 €	-91.413 €	-109.861 €	-128.310 €
-40 % HABITANTES	-22.983 €	-38.805 €	-54.627 €	-70.448 €	-86.270 €	-102.092 €	-117.914 €	-133.736 €	-149.558 €	-165.380 €	-181.202 €
-50 % HABITANTES	-102.659 €	-115.838 €	-129.018 €	-142.198 €	-155.377 €	-168.557 €	-181.737 €	-194.916 €	-208.444 €	-222.100 €	-235.755 €

Tabla 34. VAN para las diferentes situaciones del análisis de sensibilidad

### 6.2 Conclusiones

-La inversión es más sensible ante cambios en el número de habitantes, cuyos residuos han de ser gestionados por la planta, que ante fluctuaciones en el precio de venta de vidrio.

-En la situación óptima aún se tiene cierto margen de maniobra antes de que la inversión no sea rentable, aproximadamente debería caer la cantidad óptima de habitantes un 25% y algo más de un 50% el precio de venta óptimo del vidrio.

-Se da la circunstancia de que es mayor el ahorro que se consigue por no tener que gestionar y trasladar los materiales seleccionados al vertedero que los ingresos obtenidos por la venta de éste.

-Todos los rendimientos de equipos y las magnitudes que afectan al balance económico han sido seleccionados desde un punto de vista conservador. Este hecho conlleva que, si se obtienen rentabilidades buenas de la inversión con estas suposiciones, aún serán más favorables en el caso de que los equipos obtengan mejores eficiencias de separación o de que se perciba alguna contribución financiera por parte de algún ente gubernamental, por ejemplo.

-Extrapolando los resultados obtenidos a la provincia de Sevilla [41] se puede concluir que una instalación de este tipo sería muy favorable para la planta de residuos de Montemarta-Cónica (gestiona residuos de 1,38 millones de habitantes) y para la planta de la mancomunidad de La Vega (gestiona los residuos de 330.000 habitantes) ya que ambas podrían generar mucha más cantidad de material valioso seleccionado que las situaciones aquí calculadas. Para las otras dos plantas de la provincia la inversión estaría en el límite de la rentabilidad debido a que gestionan los residuos domésticos de 115.000 habitantes cada una, por lo que se requeriría de alguna subvención con el fin de conseguir que la inversión fuera asumible.

-Si todas las plantas de compostaje de España instalaran una planta de recuperación de vidrio semejante a la de este proyecto, la tasa de reciclaje de vidrio aumentaría en un 13%.

## 7. Bibliografía

---

- [1] Ministerio para la Transición Ecológica. (2016). *Memoria anual de generación y gestión de residuos. Residuos de competencia municipal*.
- [2] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. (2015). *Plan estatal marco de gestión de residuos (PEMAR) 2016-2022*. Madrid.
- [3] BOJA. (2010). *Decreto 397/2010, de 2 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Director Territorial de Residuos No Peligrosos de Andalucía 2010-2019*. Sevilla.
- [4] Recurso web. Consultado el 13/05/2019. <https://eu.delawareonline.com/story/news/local/2014/04/23/civic-groups-look-for-action-compost-plant-odors/8077513/>
- [5] Pavlostathis, S.G., Giraldo-Gómez, E. (1991). *Kinetics of anaerobic treatment*. Water Science & Technology, 24(8), págs. 35-59.
- [6] Montejo Méndez, C. (2015). Tesis doctoral: *Optimización en el tratamiento de las fracciones orgánica y de rechazo procedente de residuos urbanos*. Departamento de Ingeniería Química y Textil. Universidad de Salamanca.
- [7] Recurso web. Consultado el 20/06/2019. [http://www.tusa.es/tromel\\_clasificadores.html](http://www.tusa.es/tromel_clasificadores.html)
- [8] Barrena Gómez, R. (2006). Tesis doctoral: *Compostaje de residuos sólidos urbanos. Aplicación de técnicas respirométricas en el seguimiento del proceso*. Departamento de Ingeniería Química. Universidad Autónoma de Barcelona.
- [9] Recurso web. Consultado el 13/06/2019. [https://www.ambientum.com/enciclopedia\\_medioambiental/suelos/mecanismos\\_fermentacion\\_aerobia.asp](https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/suelos/mecanismos_fermentacion_aerobia.asp)
- [10] Recurso web. Consultado el 13/06/2019. <https://croppobster.com/alert/part-time-position-composting-technician-at-srjc-shone-farm/>
- [11] Recurso web. Consultado el 20/03/2019. <http://www.compostandociencia.com/2015/02/sistemas-de-compostaje/>
- [12] Recurso web. Consultado el 19/03/2019. <https://imaginaburgos.es/visita-al-eco-parque-de-cortes-y-al-vertedero-de-abajas/tuneles-xa-elaborar-compost-2/>
- [13] Recurso web. Consultado el 13/05/2019. [https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/Compost\\_FINAL.pdf](https://www.ams.usda.gov/sites/default/files/media/Compost_FINAL.pdf)
- [14] Congreso Nacional de Medio Ambiente, CONAMA. (2016). *Documento del grupo de trabajo GT 15, El desafío de la gestión de la materia orgánica*.

## Valorización del Rechazo de Afino de las Plantas de Compost

- [15] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Secretaría de Estado de Medio Ambiente. (2013). *Decálogo para la utilización del material bioestabilizado y del compost no inscrito en el registro de productos fertilizantes mediante la operación R10*. Madrid.
- [16] Skako Vibration. *Catálogo Skako Densimetric Tables*.
- [17] Recurso web. Consultado el 10/06/2019. <https://hablandoenvidrio.com/datos-de-reciclaje-espana-2018/>
- [18] Retema.(2017). *Nuevo módulo de recuperación de residuos de vidrio del ecoparque de Toledo*. Retema 201, Especial Bioenergía 2017, pág 86.
- [19] Retema. (2017). *Nueva línea de recuperación de vidrio del complejo medioambiental de la Costa del Sol, Casares (Málaga)*. Retema 197, Marzo/Abril 2017, págs. 18-22.
- [20] Retema. (2017). *Nuevo sistema de recuperación de residuos de vidrio del Centro de Tratamiento de Residuos de El Campello*. Retema 200, Julio/Agosto 2017, págs.76-83.
- [21] Retema. (2017). *Nueva instalación de recuperación de vidrio de Ecocentral Granada, Alhendín (Granada)*. Retema 198, Especial reciclaje 2017, págs.32-35.
- [22] Retema. (2018). *Nueva línea de recuperación de vidrio del Ecoparque Gran Canaria Norte*. Retema 211, Noviembre/Diciembre 2018, págs.58-63.
- [23] Tragsa. (2018). *Pliego de prescripciones técnicas para la contratación del suministro, montaje, programación y puesto en marcha de equipos y maquinaria de la planta de afino en el C.G.R. de Lorca*.
- [24] Recurso web. Consultado el 29/06/2019. <https://www.retema.es/noticia/el-centro-de-valorizacion-de-residuos-del-maresme-dispara-un-42-la-cantidad-de-materi-K9Bxb>
- [25] A. Morrell, W., Aarne Vesilind, P. (2012). *Solid Waste Engineering*. 2ª Edición. Cengage Learning.
- [26] Recurso web. Consultado el 01/07/2019. <https://www.magneticatorri.it/es/separadores-solidos-polvo/tambor-magnetico-tm/>
- [27] Recurso web. Consultado el 20/05/2019. <http://www.mopsarecambios.com/maquinaria-GRANIER/Cribas-Vibrantes-CVN>

- [28] Telsmith. *Catálogo criba vibratoria de clasificación*.
- [29] Mogensen, Allgaier Group. *Catálogo M-Sort, Clasificación de materiales a granel*.
- [30] Binder +Co. *Catálogo Binder+Co glass sorting*.
- [31] Garrido Ibáñez, A. M. (2015). Trabajo Fin de Grado : *Ingeniería básica de una planta de compostaje en túneles*. Universidad de Sevilla.
- [32] COAS. (2019). *Método para cálculo simplificado de los presupuestos estimativos de ejecución material de los distintos tipos de obras*. Colegio Oficial de Arquitectos de Sevilla.
- [33] García Garrido, S. (2009). *Ingeniería del Mantenimiento*. Renovetec.
- [34] *Apuntes asignatura Organización y gestión de empresas*. 4º Curso Grado en Ingeniería Química. Universidad de Sevilla.
- [35] BOJA. (2017). *Orden de 5 de junio de 2017, por la que se aprueban las bases reguladoras para la concesión de subvenciones en régimen de concurrencia no competitiva a las empresas para el desarrollo industrial, la mejora de la competitividad, la transformación digital y la creación de empleo en Andalucía durante el período 2017-2020*. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía. Sevilla.
- [36] BOE. (2019). *Resolución de 19 de marzo de 2019, de la Dirección General de Trabajo, por la que se registra y publica el Convenio colectivo de recuperación y reciclado de residuos y materias primas secundarias*. Madrid.
- [37] *Apuntes asignatura Operaciones básicas con sólidos y fluidos*. 3º Curso Grado en Ingeniería Química. Universidad de Sevilla.
- [38] Amela Felipe, E. (2016). Proyecto Fin de Grado : *Diseño de una cinta transportadora en una instalación de carga automática de coque*. Universidad Jaume I. Castellón.
- [39] Beakawi Al-Hashemi, H.M., Baghabra Al-Amoudi, O.S. (2018). *A review on the angle of repose of granular materials*. Powder Technology 330, págs. 397-417.
- [40] Futurenviro. (2017). *Tablas comparativas y guías técnicas de los separadores magnéticos y de los separadores ópticos*. Revista Futurenviro, Marzo 2017
- [41] Diputación de Sevilla. (2018). *Redacción del Plan de Residuos No Peligrosos de la Provincia de Sevilla*.