

05-014

### **DESIGN OF AN SRF FACILITY USING REJECTS FROM A MECHANICAL AND BIOLOGICAL TREATMENT PLANT**

Muzaber, Victor Gamal (1); Gallardo Izquierdo, Antonio (1); Colomer Mendoza, Francisco José (1); Carlos Alberola, Mar (1)

(1) Universitat Jaume I

The Mechanical and Biological Treatment Plant (MBTP) processes mixed municipal solid waste (MSW) in most of the Autonomous Communities of Spain. This work consists of analyzing a plant in the Autonomous Community of Valencia, which processes a total of 144.037 [t / year]. According to estimates arising from the mass balance for the year 2020, the rejection produced is 120,501 [t / year], unusable waste that is deposited in a landfill. Faced with this situation, it's necessary to find a solution for the management of these rejections, among which is energy recovery, in order to reduce these amounts of materials sent to landfills and study the possibility of their use to the generation of thermal energy. Considering the above, an industrial project is proposed for the manufacture of two kinds of SRF (Solid Recovered Fuel), one consisting entirely of organic matter, and the other with a high content of plastics and textiles. The raw material used are those rejects generated in the MBTP, whose physical-chemical properties were determined through a research work carried out by the INGRES group of the Universitat Jaume I. Finally, the results of economic viability analysis, that justifies the required investment, are presented.

Keywords: municipal solid waste; biowaste; solid recovered fuel

### **DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN INDUSTRIAL DE CSR A PARTIR DE RECHAZOS PROCEDENTES DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO MECÁNICO Y BIOLÓGICO**

Las Plantas de Tratamiento Mecánico y Biológico (PTMB) tratan los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) mezclados en la mayoría de las Comunidades Autónomas de España. En este trabajo se ha analizado una planta de la Comunidad Valenciana, que procesa un total de 144.037 [t/año]. Según las estimaciones que surgen del balance de masas del año 2020, el rechazo producido es de 120.501 t/año, residuos inaprovechables que se depositan en vertedero. Ante esta situación, surge la necesidad de idear una solución para la gestión de estos rechazos, entre las que se encuentra la valorización energética, con la finalidad de reducir esas cantidades de materiales enviados a vertederos y estudiar la posibilidad de su aprovechamiento, destinándolos a la generación de energía térmica. A partir de aquí, se ha planteado un proyecto industrial para la fabricación de dos tipos de CSR (Combustible Sólido Recuperado), uno compuesto completamente por materia orgánica, y otro con alto contenido de plásticos y textiles. La materia prima utilizada son aquellos rechazos generados en la PTMB, cuyas propiedades físico-químicas fueron determinadas mediante un trabajo de investigación desarrollado por el grupo INGRES de la Universitat Jaume I. Por último se presenta el análisis de viabilidad económica que justifique la inversión propuesta.

Palabras clave: residuo sólido urbano; biorresiduo; combustible sólido recuperado

Correspondencia: Victor Gamal Muzaber. Correo: al403304@uji.es

Agradecimientos: A la empresa RECIPLASA (Castellón) por su colaboración en el proyecto.



©2022 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Introducción

Las plantas de tratamiento mecánico biológico (PTMB) de residuos sólidos urbanos (RSU) son instalaciones donde se aplican dos procesos de forma diferenciada: uno mecánico, para separar y clasificar los materiales reciclables, y otro biológico, aplicado a la fracción orgánica para estabilizarla y así obtener compost o material bioestabilizado. La eficiencia en la recuperación de los materiales reciclables dependerá del grado de heterogeneidad de los RSU mezclados que ingresan, del nivel de automatización y de la tecnología aplicada en el proceso. Los materiales que no fue posible separar durante las diferentes líneas de proceso pasan a formar parte del rechazo generado por la planta, el cual es transportado y depositado en vertederos.

La aparición de nuevas directivas europeas busca evitar el crecimiento sin freno de enormes vertederos, por lo que este tipo de disposición final se enfrenta a diferentes exigencias legislativas y técnicas, tales como: contención al máximo de la contaminación, biogás, lixiviado, rechazo social, disminución de materia orgánica vertida y la aplicación de nuevas tecnologías. En función de esto, y a partir de la Directiva Marco de Residuos, los Estados Miembros deben aplicar medidas para asegurar que todos los RSU sean aprovechados antes de ser vertidos, surgiendo así la valorización energética como alternativa para utilizar el contenido de energía de los residuos.

Desde la aprobación en España del Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022, el desafío principal es considerar los residuos como un recurso a incorporar en el sistema productivo, por lo que se propone un nuevo modelo de empresa encargada de la gestión y tratamiento de los RSU que pondere la valorización energética sobre el vertido, siguiendo la jerarquía de gestión de los residuos establecida por la Unión Europea. En función de esto, una forma de recuperar el valor aprovechable de los rechazos de las PTMB es desarrollar plantas industriales para la producción de combustible sólido recuperado (CSR).

La tecnología existente para la producción de CSR consiste principalmente en eliminar los materiales no combustibles de los rechazos, tales como metales férricos y no férricos, vidrios, cerámicos, piedras, etc. (Nasrullah et al., 2017). La fracción combustible contiene una parte considerable de materiales orgánicos renovables, como por ejemplo restos de alimentos, papel/cartón y madera, y otra parte de origen fósil, compuesta principalmente por plásticos. Teniendo en cuenta la Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo, la fracción biodegradable de los RSU debe ser considerada fuente de energía renovable, por lo tanto, el uso de CSR con alto contenido de carbono biogénico reduce el cómputo de emisiones netas de CO<sub>2</sub>, y las emisiones de otros tipos de contaminantes debido a su bajo contenido en nitrógeno y azufre (Velis et al., 2010; Gallardo et al., 2014).

## 2. Objetivos

El objetivo de este trabajo ha sido diseñar un proyecto industrial para la fabricación de CSR generados en una PTMB ubicada en la Comunidad Valenciana. Para ello se plantean los siguientes objetivos específicos:

Conocer en detalle las etapas del proceso de tratamiento y la tecnología aplicada en la PTMB, así como el balance de masa en las diferentes corrientes de entrada y salida.

Caracterizar las corrientes involucradas con el fin de conocer sus propiedades fisicoquímicas, con el fin de determinar los flujos valorizables energéticamente para destinarse a la producción de CSR a escala industrial.

Definir la ingeniería de proceso respecto al diseño de la planta productora de CSR, especificando las operaciones y procesos unitarios involucrados, además del equipamiento y la maquinaria.

Analizar la viabilidad económica que justifique la inversión por parte de la empresa y asegure

un periodo de retorno razonable.

### 3. Metodología y Caso de estudio

Para la realización del trabajo, el primer paso es conocer en detalle cada etapa del tratamiento aplicado a las RSU mezclados que alimentan la PTMB y así poder definir las corrientes del proceso en las que realizar el muestreo y caracterización. Una vez determinados en el laboratorio los parámetros fisicoquímicos de importancia, se analiza qué corrientes son las más adecuadas para utilizar como materia prima en la producción industrial de CSR. A partir de los resultados obtenidos, se procede a la etapa de diseño e ingeniería de la planta de CSR.

#### 3.1 Análisis del proceso productivo de la PTMB estudiada

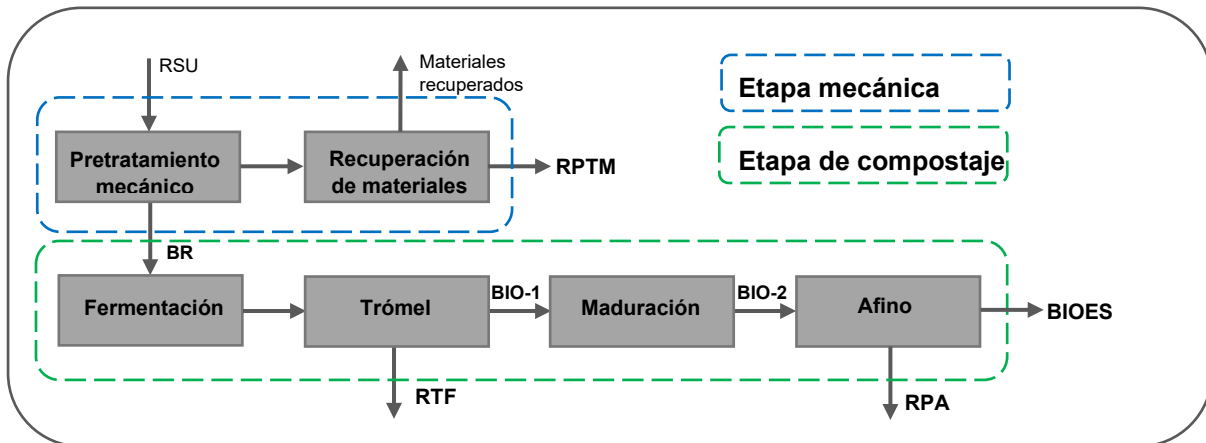
En este trabajo se ha analizado una planta de la Comunidad Valenciana, que procesa un total de 144.037 t/año. Según el balance de masas del año 2020, el rechazo producido es de 120.501 t/año. Estos son residuos inaprovechables que se depositan en vertedero.

Como se observa en la figura 1, en la primera etapa de la PTMB se aplica un pretratamiento mecánico que consiste en un triaje primario manual donde se retiran voluminosos, para seguir hacia un trómel de 80 mm de diámetro que genera dos corrientes: la fracción fina, compuesta principalmente de materia orgánica (biorresiduo), a la cual se le extrae el contenido de metales para ser dirigida hacia el proceso biológico, y la fracción gruesa, a la que se le aplican distintas operaciones mecánicas para la recuperación de materiales reciclables. La corriente compuesta por material no recuperable y no recuperados constituye el rechazo de gruesos (RPTM), el cual es compactado con una prensa hidráulica y enviado a vertedero.

En la segunda etapa, el biorresiduo (BR) ingresa al túnel de fermentación aerobia. Una vez transcurrido el tiempo necesario para que se produzca este proceso biológico, el material se extrae y se hace pasar por un trómel de 30 mm, dando un rechazo (RTF) compuesto por elementos con diámetros de entre 30 y 80 mm, mientras que la fracción fermentada (BIO-1) es dirigida hacia el túnel de maduración, donde al cabo de dos semanas se obtiene un bioestabilizado (BIO-2). Ese material es llevado, en primer lugar, a un trómel de afino del que se extrae un rechazo con un diámetro de entre 10 y 30 mm y, en segundo lugar, a una mesa densimétrica donde se elimina material pesado (inertes, vidrio, huesos, metales, etc.) menor a 10 mm, para obtener finalmente el bioestabilizado (BIOES) afinado que se considera un compost de baja calidad.

Finalmente, las dos corrientes de rechazo del bioestabilizado se juntan en una (RPA).

Figura 1: Esquema del proceso productivo en la PTMB.



### **3.2 Caracterización de las líneas de proceso de la PTMB**

Una vez identificadas las siete líneas a analizar, codificadas como RPTM, BR, RTF, BIO-1, BIO-2, RPA y BIOES, se realiza la etapa de muestreo. Se tomaron 10 muestras de cada corriente a lo largo de dos meses siguiendo una metodología para el control de calidad de rechazos (Edo-Alcón, 2019). Las muestras se llevaron al Laboratorio de Residuos Sólidos Urbanos de la Universitat Jaume I para realizar una caracterización física y también para determinar las propiedades químicas teniendo en cuenta los estándares de calidad de un CSR establecidos en la norma UNE-EN 15359 (2012): "Combustibles sólidos recuperados: especificaciones y clases". Si bien esta norma determina como parámetros de calidad el poder calorífico inferior (PCI), cloruros y mercurio, se consideró necesario conocer los valores de humedad, cenizas, azufre y porcentaje de biomasa como indicadores secundarios que influyen en la calidad del CSR (Di Lonardo et al., 2016) y, por ende, también en su precio de mercado.

La caracterización física consistió en clasificar de forma manual las muestras extraídas de cada corriente, en los diferentes materiales que las componen, considerando las fracciones de biorresiduo (proveniente de alimentos y jardinería), papel/cartón, diferentes tipos de plásticos (film, envases, rígidos), textil, madera, briks y otros (incluyen residuos compuestos de celulosa y plástico como pañales o toallitas higiénicas). En cuanto a la fracción no combustible, se separaron metales, vidrio, inertes y residuos peligrosos.

Posteriormente, cada muestra se dividió en fracción combustible y no combustible, de la primera es importante conocer su porcentaje de biomasa, dado que en esa proporción se centra la reducción del cómputo de emisiones. Se considera que la biomasa de la fracción combustible está compuesta por materia orgánica biodegradable, papel/cartón y madera; el resto son plásticos, textil, brik y otros, los cuales sí computan sus emisiones al no considerarse material biogénico.

La fracción combustible se secó, homogeneizó y trituró (se convirtió en un CSR) para realizar los ensayos de laboratorio con el equipamiento correspondiente, según los procedimientos establecidos en las normas UNE EN sobre CSR.

### **3.3 Requisitos de diseño de la planta industrial de CSR**

A continuación, se fijan los requisitos generales y específicos que se han tenido en cuenta en el diseño de la planta industrial.

Los requisitos generales aplicados al diseño del proyecto son:

La tecnología considerada debe estar suficientemente experimentada y de acuerdo con las mejores técnicas disponibles.

Se buscará recuperar en el mayor grado posible la materia orgánica para destinarla a producción de CSR.

La planta se debe ajustar al esquema general de funcionamiento y organización existente dentro del complejo de la PTMB. La planta se ubicará en un lugar adyacente a la PTMB, en un espacio que actualmente sirve de almacén al aire libre.

La capacidad de la planta será suficiente para absorber todos los rechazos susceptibles de ser convertidos en CSR, incluyendo la posibilidad de utilizar también el bioestabilizado. Se tendrá en cuenta el balance de masa del año 2020.

Los requisitos relacionados con el proceso de producción son los siguientes:

Se considerarán dos líneas de producción, una compuesta principalmente por plástico y textiles y otra de biomasa peletizada.

Se establecen 3 turnos de trabajo con jornadas laborales de 8 horas cada uno.

Los requisitos relativos a los productos finales son los siguientes:

Para poder realizar el peletizado, el contenido de humedad debe ser menor del 12% y el tamaño del grano menos de 5 mm.

La humedad para los CSR con alto contenido de material de origen fósil debe ser del 10%, teniendo en cuenta los estándares para CSR de alta calidad en Italia (UNI 9903-1,2044), que establecen menos del 15%, y en Suiza para hornos de cemento que fija la humedad menor al 10% (Flamme and Geiping, 2012; A. Gallardo et al., 2014).

Los requisitos relacionados con las instalaciones son los siguientes:

Se deben incorporar un triturador primario y secundario, como así también secadores por aire caliente, dado que el tamaño y la humedad de los CSR son parámetros de suma importancia y que afectan su calidad.

La caldera para calentar el aire de los secadores utilizará como combustible los pélet de biomasa producidos por la misma planta de CSR.

### **3.4 Análisis de la tecnología existente para producción industrial de CSR**

Para definir las etapas del proceso productivo y el equipamiento que se utilizará en cada una de estas, se parte de diseños de planta “llave en mano” que ofrecen proveedores como Haiden o BMH Technology.

Al analizar las tecnologías planteadas por las empresas citadas se observa que no se realiza la recuperación del biorresiduo, lo cual conlleva el envío a vertedero de biomasa. Tampoco se aplica el proceso de secado para reducir la humedad, por lo que se supone que ambos procesos son aplicables a una PTMB donde se haya realizado previamente un biosecado, que no es el caso de la PTMB estudiada para este trabajo.

Se planteará un diseño que tenga en cuenta las ventajas de la tecnología del proceso existente, pero a su vez que considere mejoras que apunten a la recuperación y aprovechamiento del biorresiduo, con un diseño adaptado a las características y contenido de los rechazos que resulten factibles de convertirse en CSR.

Tomando como base el diseño planteado por las empresas productoras de CSR, el proceso a definir de la planta industrial de CSR contará con las etapas básicas de separación de la fracción no combustible, pero también se tiene en cuenta la incorporación de una etapa de secado mediante aire caliente en caso de que la humedad medida para las diferentes corrientes no cumpla los requisitos de producto final establecidos en el punto 3.3.3.

En cuanto a la fracción combustible, se debe diseñar una planta industrial con dos líneas de producción, una para CSR compuesto principalmente por plásticos y textiles, y la otra para pélet de biomasa (Pressley et al., 2014), generados a partir de la recuperación de la materia orgánica de las diferentes corrientes separadas a lo largo de todo el proceso productivo.

## **4. Resultados**

A continuación, se comienza por presentar los resultados de laboratorio a partir de los cuales se seleccionaron las líneas de la PTMB que serán destinadas a la producción de CSR. Conociendo sus propiedades fisicoquímicas y el caudal másico de cada una, se define el diseño de la planta industrial y su capacidad para procesar los rechazos.

### **4.1 Biomasa presente en la fracción combustible de las líneas analizadas de la PTMB**

Una vez que se han caracterizado las siete corrientes y se conoce su composición, se determina la fracción combustible (FC). El porcentaje de biomasa presente en esta fracción

(BFC) se calcula excluyendo todos los materiales de origen fósil. Estos resultados se presentan en la tabla 1, tanto en base húmeda como en seca.

**Tabla 1: Fracción combustible en las corrientes de la PTMB**

|       | FC (%) |        | BFC (%) |        |
|-------|--------|--------|---------|--------|
|       | smh    | sms    | smh     | sms    |
| RPTM  | 95,32  | 93,69  | 47,35   | 41,53  |
| BR    | 89,74  | 82,43  | 90,08   | 85,21  |
| RTF   | 76,06  | 65,58  | 55,93   | 42,03  |
| BIO-1 | 84,55  | 72,30  | 98,13   | 96,43  |
| BIO-2 | 82,71  | 76,19  | 98,51   | 97,99  |
| RPA   | 76,02  | 67,45  | 96,53   | 95,00  |
| BIOES | 100,00 | 100,00 | 100,00  | 100,00 |

Nota: smh: sobre materia húmeda; sms: sobre materia seca.

En la tabla 1 se observa que tanto el rechazo RPTM generado en el tratamiento mecánico y el rechazo RTF de fermentación del tratamiento biológico, poseen más de un 40% de biomasa en su fracción combustible. En el caso del rechazo RPA de afino del bioestabilizado es del 95% sms. Considerando que estas corrientes son enviadas a vertedero, su alto contenido de material biogénico las convierte en un material muy atractivo desde un punto de vista ambiental y económico, por las bajas emisiones computadas de CO<sub>2</sub> y la rebaja de impuestos que éstas conllevan al ser valorizadas energéticamente.

Por último, se considera que el BIOES está compuesto por 100% de materia orgánica. Al realizar el ensayo de cenizas se determinará el porcentaje de inertes presentes que no es posible separar de forma manual en el laboratorio.

#### 4.2 Parámetros de calidad de los CSR producidos en el laboratorio

Las corrientes analizadas se pueden convertir en un CSR si se elimina la fracción no combustible, se homogeniza, se tritura y se seca total o parcialmente. En el Laboratorio se procedió a producir CSR de cada una de las corrientes con una humedad del cero por ciento, por lo que será el mejor producto que se pueda obtener desde el punto de vista del PCI. En la tabla 2 aparecen los resultados de los parámetros de calidad analizados.

**Tabla 2: Resultados de los parámetros de calidad de los CSR**

|       | Humedad (%) |      | Cenizas (%) |      | PCI (MJ/kg) |      | Cl <sup>-</sup> (%) |      | Hg (mg/kg) |      | Hg (mg/MJ) | Azufre (%) |      |
|-------|-------------|------|-------------|------|-------------|------|---------------------|------|------------|------|------------|------------|------|
|       | m           | s    | m           | s    | m           | s    | m                   | s    | m          | s    | m'         | m          | s    |
| RPTM  | 37,50       | 2,36 | 7,83        | 2,09 | 24,59       | 1,40 | 0,56                | 0,27 | 0,06       | 0,01 | 0,003      | 0,20       | 0,03 |
| BR    | 47,71       | 3,18 | 21,40       | 9,12 | 16,27       | 2,72 | 0,64                | 0,06 | 0,11       | 0,06 | 0,005      | 0,11       | 0,06 |
| RTF   | 42,75       | 3,91 | 10,16       | 4,27 | 24,86       | 2,75 | 0,93                | 0,68 | 0,07       | 0,02 | 0,003      | 0,25       | 0,03 |
| BIO-1 | 47,52       | 2,55 | 23,32       | 4,27 | 15,13       | 0,85 | 0,68                | 0,03 | 0,26       | 0,13 | 0,014      | 0,18       | 0,04 |
| BIO-2 | 28,55       | 3,05 | 33,77       | 5,64 | 12,85       | 1,65 | 0,74                | 0,11 | 0,27       | 0,05 | 0,020      | 0,22       | 0,06 |
| RPA   | 27,33       | 1,23 | 30,14       | 0,60 | 13,78       | 0,24 | 0,74                | 0,09 | 0,21       | 0,02 | 0,016      | 0,12       | 0,01 |
| BIOES | 10,17       | 1,05 | 28,48       | 1,39 | 13,76       | 0,23 | 0,77                | 0,09 | 0,30       | 0,01 | 0,022      | 0,21       | 0,04 |

Nota: m: media; s: desviación típica; m': mediana.

Al analizar los valores, se observa que la humedad cae significativamente en las líneas de BIO-2, RPA y BIOES, ya que estas se ubican aguas abajo de la etapa de maduración, donde

ocurre una reacción biológica exotérmica que seca la biomasa. Se debe tener en cuenta la humedad inicial de cada corriente que vaya a destinarse a la producción de CSR, para determinar el consumo energético que implica la operación de secado.

Respecto a las cenizas, el CSR del RPTM es el de menor porcentaje, seguido por el RTF, guardando relación esto con el menor contenido en biomasa que presentan. Para el BIO-2 y el RPA las cenizas representan aproximadamente un tercio de su peso en base seca, mientras que en BR y BIO-1 es de entre un 21 y 23%. Desde el punto de vista de la combustión, se valora el bajo contenido en cenizas.

Los CSR que mayor PCI tienen provienen de las corrientes RPTM y RTF, debido a su mayor proporción de material no biogénico, principalmente plásticos. El PCI más bajo se da para las corrientes con alto contenido de biomasa, 12,85 MJ/kg para BIO-2, 13,8 MJ/kg para RPA y BIOES, en tanto que las líneas BR y BIO-1 poseen un PCI levemente superior a los anteriores. El CSR con menor PCI es el BIOES al estar compuesto en un 100% por biomasa, pues esta presenta menor PCI que el resto de los materiales hallados en la caracterización (Colomer y Gallardo, 2007).

Se observa que el aumento de la fracción de materia orgánica implica una disminución en su PCI y un aumento del porcentaje de cenizas, pero estas complicaciones se compensan con la reducción del cómputo de emisiones de CO<sub>2</sub> y de los impuestos que conlleva para grandes consumidores de energía el uso de combustibles de origen biogénico.

En relación con el cloro, todos los CSR tienen valores similares, en el caso del RTF es algo más elevado que las demás líneas consideradas, este hecho puede ser debido a que tiene un mayor porcentaje de fracción no biogénica, y con ello materiales que pueden contener cloro, como el PVC.

Respecto al mercurio, todas las muestras presentan valores muy bajos, lo que es un aspecto positivo de los CSR analizados.

Finalmente, los valores de azufre encontrados se consideran bajos ya que ninguno supera los 0,5%. Este parámetro se fija en los estándares de calidad para el CSR en hornos de cemento en Suiza (Gallardo et al. 2014).

### **4.3 Elección de las líneas de la PTMB destinadas a producir CSR**

Las diferentes composiciones y propiedades de las líneas de la PTMB que se utilicen como materia prima para la producción de CSR determinarán la calidad de los productos obtenidos (Nasrullah et al., 2017). Por lo que, una vez caracterizadas las diferentes líneas de productos intermedios y rechazos de la PTMB, se procedió a descartar las menos idóneas.

En primer lugar, se decide no utilizar la corriente BR ni tampoco la BIO-1, principalmente por su elevada humedad. Continuando con el proceso, se descarta utilizar BIO-2 con la finalidad de hacer uso de la instalación existente para afino y así eliminar vidrio e inertes. Por ende, el producto final del proceso biológico, el BIOES, será destinado para aprovechamiento energético cuando no se encuentre salida comercial.

En cuanto a los rechazos RPTM, RTF y RPA, actualmente enviados a vertedero, también serán destinados a la producción de CSR. Si bien poseen notables diferencias en cuanto a la humedad, la fracción combustible y el contenido de biomasa, se decide mezclarlos, considerando la incorporación de BIOES cuando exista exceso en el stock de éste.

Por lo tanto, la alimentación a la planta de CSR estará dada por cuatro corrientes de características muy variadas, lo que deberá ser tenido en cuenta a la hora de definir el proceso de producción y en la selección del equipamiento, con el fin de obtener un CSR de calidad

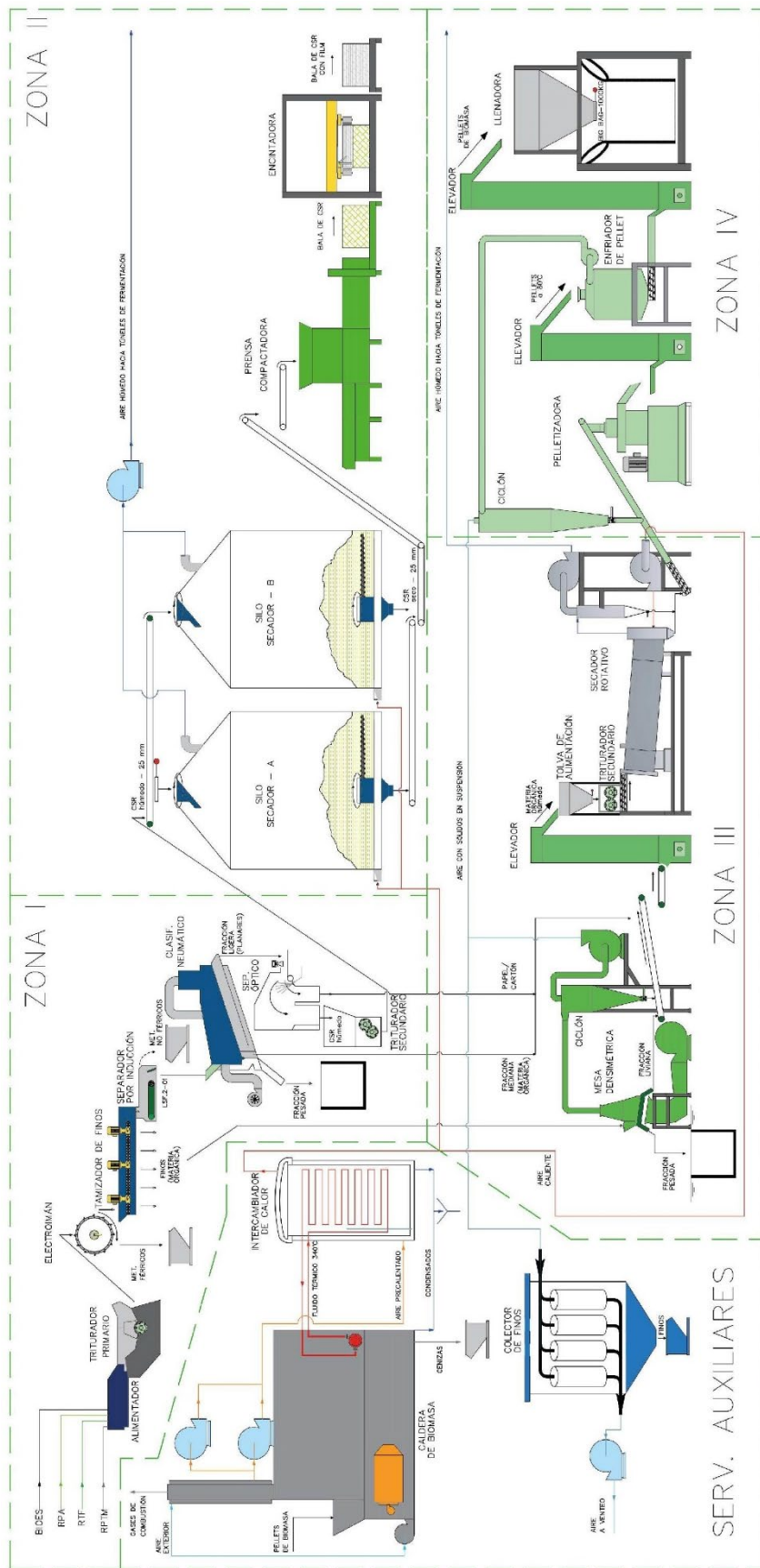
que cumpla las expectativas del cliente respecto PCI, tamaño de partícula y humedad del combustible, como así también en contenido de cenizas, cloro, mercurio y azufre.

#### **4.4 Especificación del proceso productivo a implementar**

Teniendo en cuenta los requisitos de diseño y la tecnología existente, en la figura 2 se plasma el proceso definido para la planta industrial de CSR, que contará con las etapas básicas para separar las fracciones no combustibles, incorporándose una etapa de secado mediante aire caliente, considerando los datos de humedad de la tabla 2 para las corrientes utilizadas como materia prima.



Figura 2: Diagrama de proceso de la planta de producción de CSR.



Como se indica en la figura 2, el diagrama se divide en cuatro zonas:

**Zona general (I):** los rechazos de la PTMB ingresan a la alimentadora automática, que además sirve de pulmón para asegurar la provisión continua al triturador primario, cuyo objetivo es reducir el tamaño de partículas a menos de 80 mm y homogeneizar la corriente resultante. Seguidamente, esta pasa por un tambor magnético que retiene los metales férricos para luego enviarlos al área de materiales recuperados. La corriente continúa en el proceso para ser tamizada, donde se separa la fracción fina, compuesta por partículas con un tamaño menor a 10 mm, entre ellas arena, vidrio, inertes y un porcentaje importante de orgánicos. Debido a su contenido de carbono biogénico, esta fracción de finos separada se destina a la producción de pélet de biomasa. En cuanto a la otra corriente que continúa en la línea de proceso, ya libre de finos, atraviesa un separador de Foucault y los metales no férricos que contenía se envían a una tolva de almacenamiento, mientras que la corriente de salida que se mantiene en la línea se destina a la producción del CSR con alto contenido de plásticos, de la zona II.

La línea principal de producción ingresa al clasificador neumático. Este equipo divide los materiales en tres corrientes: una fracción pesada, compuesta por piedras, vidrio, cerámicos y metales, estos materiales se almacenan en un contenedor subterráneo para luego ser destinados a vertedero; la fracción mediana, que al presentar una composición dada principalmente por madera y orgánicos será la segunda corriente destinada a producir pélet de biomasa (al contener también plásticos duros, se debe monitorear que estos no superen el 5% en la fracción mediana); por último, la fracción ligera ingresa a un separador óptico programado para extraer el papel/cartón, obteniéndose una corriente compuesta principalmente por film, envases de plástico y textiles. La fracción separada de papel/cartón se destina a la producción de pélet de biomasa, mientras que la línea que continúa en el proceso productivo es conducida hacia el triturador secundario para reducir el tamaño del material a menos de 25 mm.

**Producción de CSR plástico (Zona II):** La corriente compuesta principalmente por film, envases de plástico y textiles triturados pasan a un sistema de secado, que consiste en hacer ingresar el aire caliente a través de la base perforada de dos silos que trabajan de forma alternada. El aire húmedo que escapa en la parte superior de los silos se utilizará en los túneles de fermentación de la PTMB, en tanto que el CSR ya seco se extrae de la descarga de los silos y es dirigido hacia la tolva de la prensa para formar las balas. Estas pasan a la envolvedora para obtener el producto final: balas prensadas de CSR seco envueltas en film, listas para su almacenamiento, transporte y venta.

**Pretratamiento de biomasa (Zona III):** la fracción de finos separada en el tamizador de la zona general I se transporta a una mesa densimétrica donde se obtiene una fracción liviana de materia orgánica y otra pesada formada por inertes y vidrio, la cual se almacena en un segundo contenedor subterráneo para luego ser enviada a vertedero, ya que el tamaño que presentan estos vidrios es inferior al exigido por los compradores.

La fracción liviana se mezcla con otras dos corrientes de alto contenido en carbono biogénico: la fracción mediana del clasificador neumático y la fracción pesada del separador óptico, compuesta principalmente por papel/cartón. La resultante de las tres corrientes ingresa al elevador de cangilones que descarga en una tolva que alimenta al triturador, encargado de reducir el tamaño del material a 3 mm para, posteriormente, ingresar a la planta peletizadora.

El proceso siguiente consiste en eliminar la humedad en un secador rotativo a contracorriente. Este cuenta con un ciclón para recuperar partículas del aire húmedo que escapan del secador, el cual se envía a los túneles de fermentación

**Planta peletizadora (Zona IV):** una vez acondicionada la materia orgánica en cuanto a tamaño y humedad, el material seco ingresa a la prensa para formar los pélet, al ser su

temperatura de entre 60 y 80 °C es necesario enfriarlas, para luego enviarlos a su almacenamiento en sacos de 1.000 kg.

Los finos que escapan de los separadores ciclónicos de la mesa densimétrica y de la peletizadora se envían a un filtro colector de polvo que se encuentra en la zona de servicios auxiliares.

#### **4.5 Definición de la capacidad de producción**

Se establece que la planta operará las 24 horas, los 7 días de la semana en tres turnos. A partir del balance 2020, informado por la empresa gestora de la PTMB, la planta industrial de CSR requiere una capacidad de producción de 14,34 t/h para procesar las cuatro líneas utilizadas como materia prima (RPTM, RTF, RPA y BIOES), las cuales representan un 58,48%, 27,81%, 10,97%, y 2,74%, respectivamente.

#### **4.6 Balance de masa y selección de los equipos de proceso**

Una vez conocida la capacidad de producción, el proceso productivo y el equipamiento que este requiere (figura 2), se han determinado los caudales máxicos de cada corriente de entrada y salida en cada equipo, como así también la composición de los diferentes materiales presentes en ellas. De esta manera se ha determinado el balance de masa en cada uno de los equipos a partir de la eficiencia de separación que poseen para cada material. En el caso de los secadores, para su selección se ha tenido en cuenta el porcentaje de agua con el que ingresan y el parámetro de calidad a cumplir por la corriente de salida. Con estos datos definidos, se ha seleccionado la marca y modelo del equipo a partir de catálogos de diferentes proveedores, buscando el que mejor se adapte a las condiciones operativas de la planta.

#### **4.7 Viabilidad económica**

Para conocer la rentabilidad del proyecto propuesto, se ha calculado el presupuesto de inversión, las amortizaciones, los costos directos e indirectos y los ingresos que se obtendrán de la producción de CSR. Con estos datos se han elaborado los indicadores de rentabilidad y se define si el proyecto es viable. A continuación, se expresan los valores monetarios más importantes:

El presupuesto de inversión se calcula considerando la obra civil, los equipos de proceso, instalaciones eléctricas y maquinaria, siendo de 7.488.600,00 €.

La amortización anual para los periodos de las inversiones es de 483.411,46 €.

El presupuesto anual de explotación es la suma de costos directos e indirectos, los primeros provienen del consumo eléctrico, el uso de carretillas de GLP y el pago de tasas por envío a vertedero; mientras que los indirectos son aquellos asociados a la contratación de personal y otros como material de oficina, limpieza, etc. El total es de 2.094.620,44 €. Se ha considerado que el costo de la materia prima (rechazos y bioestabilizado) es nulo, dado que lo proporciona la propia empresa gestora de la PTMB. Tampoco se considera el costo en combustibles para calentar el aire de secado, ya que la caldera de biomasa se alimenta con pélet producidos en la misma planta industrial.

Se considerarán beneficios económicos a los ingresos monetarios que provengan de la comercialización de materiales recuperados (metales, chatarra y aluminio) y de los productos finales, CSR plástico y pélet de biomasa, resultando un ingreso anual de 4.487.665,36 €. Como datos principales, los precios utilizados para los pélet son de 20 €/t

para el pélet plástico y de 60 €/t para el de biomasa, estos son precios actuales de mercado.

Al tener toda la información necesaria para realizar el flujo de caja, considerando un interés real del 0,9% y un período de 20 años para el cálculo de los indicadores de rentabilidad, se obtiene:

VAN = 15.386.787,53 €. El proyecto genera beneficios.

TIR = 16,89%. El grado de rentabilidad que presenta el proyecto es aceptable dado que supera considerablemente al interés real.

PR = 6,1 años. El periodo de retorno de la inversión es admisible considerando la magnitud de la inversión requerida y el tipo de industria.

## 5. Conclusiones

Se concluye que se han cumplido los objetivos específicos planteados para el diseño de una planta industrial para producción de CSR a partir de los rechazos procedentes de una PTMB existente. A continuación, se plantean los argumentos que respaldan esta afirmación.

Fue posible conocer en detalle el funcionamiento de la PTMB analizada, ya que se realizaron tres visitas al lugar donde se observó el proceso y el equipamiento instalado en funcionamiento, también fue posible entrevistar al personal encargado del manejo de la planta para obtener información complementaria. Además de esto, la empresa gestora facilitó documentación de suma importancia que fue usada en el desarrollo del trabajo.

Al caracterizar las siete corrientes de productos intermedios y rechazos de la PTMB, se puede concluir que RPTM, RTF, RPA y BIOES presentan las condiciones y los estándares de calidad propuestos por la norma UNE-EN 15359 (2012) para considerarse como materia prima para la planta de producción de CSR.

Se definió una ingeniería de proceso que contempló las ventajas que posee el diseño general utilizado en la actualidad para la producción de CSR, agregándose modificaciones y mejoras enfocadas en la recuperación de materia orgánica contenida en los rechazos y el bioestabilizado para la producción de pélet de biomasa, además del clásico CSR compuesto principalmente por plásticos y textiles.

Si bien la inversión inicial representa un monto considerable, el análisis económico realizado indica que el proyecto, además de ser viable, tiene buena rentabilidad y un periodo de recuperación de la inversión razonable.

Otras conclusiones a tener en cuenta es que el hecho de evitar los costes e impuestos asociados al vertido generará grandes ahorros para la empresa gestora de la PTMB. Estos podrían ser aún mayores en el corto plazo teniendo en cuenta que en España los impuestos a la eliminación de residuos por vertedero poseen una tendencia alcista para desincentivar su uso.

Finalmente, también hay que considerar que el aprovechamiento energético de los rechazos disminuiría significativamente la disposición final en vertederos, contribuyendo al cumplimiento de uno de los objetivos 2030 que limita a un máximo del 10% la eliminación de residuos en vertedero.

## 6. Referencias

- Colomer, F.J., Gallardo, A., 2007. Tratamiento y gestión de residuos sólidos. Editorial Universidad Politecnica de Valencia, Valencia, España.
- Di Lonardo, M.C., Franzese, M., Costa, G., Gavasci, R., Lombardi, F., 2016. The application of SRF vs. RDF classification and specifications to the material flows of two

- mechanical-biological treatment plants of Rome: Comparison and implications. *Waste Manag.* 47, 195–205. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.018>
- Edo-Alcón, N. (2019). Diseño de una metodología para el control de calidad de los rechazos producidos en las plantas de tratamiento mecánico-biológico de residuos sólidos urbanos. Tesis Doctoral. Universitat Jaume I (España).
- Flamme, S., Geiping, J., 2012. Quality standards and requirements for solid recovered fuels: a review. *Waste Manag. Res.* 30, 335–53. <https://doi.org/10.1177/0734242X12440481>
- Gallardo, A., Carlos, M., Bovea, M.D., Colomer, F.J., Albarrán, F. (2014). Analysis of refuse-derived fuel from the municipal solid waste reject fraction and its compliance with quality standards. *J. Clean. Prod.* 83, 118–125. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.085>
- Nasrullah, M., Hurme, M., Oinas, P., Hannula, J., Vainikka, P., 2017. Influence of input waste feedstock on solid recovered fuel production in a mechanical treatment plant. *Fuel Process. Technol.* 163, 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.03.034>
- Pressley, P.N., Aziz, T.N., Decarolis, J.F., Barlaz, M.A., He, F., Li, F., Damgaard, A., 2014. Municipal solid waste conversion to transportation fuels: A life-cycle estimation of global warming potential and energy consumption. *J. Clean. Prod.* 70, 145–153. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.041>
- Velis, C.A., Longhurst, P.J., Drew, G.H., Smith, R., Pollard, S.J.T. (2010). Production and quality assurance of solid recovered fuels using Mechanical- Biological Treatment (MBT) of waste: a comprehensive assessment. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technolgy* 40, 979–1105. Obtenido de <https://doi.org/10.1080/10643380802586980>

### Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

