

04-022

## DESIGN OF SOLID RECOVERED FUELS FROM MUNICIPAL SOLID WASTE AND BIOMASS

Gallardo Izquierdo, Antonio <sup>(1)</sup>; Carlos Alberola, Mar <sup>(2)</sup>; Colomer Mendoza, Francisco J. <sup>(2)</sup>; Edo Alcón, Natalia <sup>(2)</sup>; Jorge Ortiz, Andrea <sup>(2)</sup>  
<sup>(1)</sup> Universitat Jaume I, <sup>(2)</sup> Univeritat Jaume I

The solid recovered fuels (SRF) are a viable alternative to the conventional fossil fuels which can be partially replaced at heat and electricity industries. Additionally, as they have a percentage of biomass, they have a huge advantage; part of their CO<sub>2</sub> emissions is considered neutral. In the last years, the emissions market has raised significantly the paying of carbon offsets, therefore, these fuels have become very interesting. The aim of this work is to design several SRF from the reject fraction of mechanical-biological treatment plants (MBTP) of municipal solid waste (MSW) and biomass waste to maximize its economic value taking into account the calorific value and the CO<sub>2</sub> emissions. To that end, in the first place several SRF from the reject fraction of MBTP and biomass have been obtained. We have determined their properties as a fuel in accordance to UNE-EN 15359 (2012). Finally, we have designed several SRF from different mixtures of waste and we have determined their economic value in the market.

*Keywords: solid recovered fuel; biomass; CO<sub>2</sub>; municipal solid waste*

## DISEÑO DE COMBUSTIBLES SÓLIDOS RECUPERADOS A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS Y BIOMASA

Los combustibles sólidos recuperados (CSR) son una alternativa viable a los combustibles fósiles convencionales y puede reemplazarlos parcialmente en industrias productoras de calor y electricidad. Además, al tener un porcentaje de biomasa, tienen la importante ventaja de que parte de las emisiones de CO<sub>2</sub> se consideran neutras. En los últimos años, el mercado de emisiones ha elevado enormemente el pago por derechos de emisión de CO<sub>2</sub>, por lo que estos combustibles se han vuelto muy interesantes. El objetivo del trabajo es el diseño de diferentes CSR procedentes de la mezcla de rechazos de plantas de tratamiento mecánico biológico (PTMB) de residuos sólidos urbanos (RSU) y de residuos de biomasa, en el que se maximice su valor económico considerando su poder calorífico y las emisiones computadas de CO<sub>2</sub>. Para ello, se han obtenido diferentes CSR procedentes de varios rechazos de PTMB y de biomasa. Se han determinan su propiedades como combustibles según la norma UNE-EN 15359 (2012). Finalmente, se han diseñado varios CSR a partir de diferentes mezclas de residuos y se han determinado aquellos que tienen un mayor valor económico en el mercado.

*Palabras clave: combustible sólidos recuperado; biomasa; CO<sub>2</sub>; residuo sólido urbano*

Correspondencia: Antonio Gallardo Izquierdo gallardo@uji.es



©2020 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

Los combustibles sólidos recuperados (CSR) son aquellos que proceden de residuos no peligrosos y que cumplen con los requisitos de clasificación y las especificaciones establecidas en la norma UNE-EN 15359 (2012). Por otro lado, aquellos combustibles que no cumplan con estándares fijados por dicha norma serán considerados como combustibles derivados de residuos (CDR) y no como CSR.

Los CSR están compuestos principalmente por papel/cartón y plásticos, siendo estos materiales los responsables de sus elevados poderes caloríficos (Nasrullah et al., 2017). Además, los residuos no peligrosos a partir de los cuales se producen pueden provenir de múltiples fuentes como: residuos sólidos urbanos (RSU), rechazos del tratamiento de RSU, residuos comerciales, residuos industriales, residuos voluminosos o residuos de construcción y demolición (UNE-EN 15359, 2012; Garcés et al., 2016). Para la fabricación de CSR en primer lugar, debe eliminarse el material no combustible y el no deseado (por ejemplo, el PVC). Posteriormente se tritura y se seca, y en algunos casos, se peletiza (Pressley et al., 2014; Nasrullah et al., 2015).

A nivel europeo, las plantas de tratamiento mecánico-biológico (TMB) son una opción cada vez más utilizada para la producción de CSR (Rada y Andreottola, 2012; Ragazzi y Rada, 2012), puesto que los rechazos de estas instalaciones tienen un elevado poder calorífico y pueden ser transformados en un CSR tras su procesado (Rotter et al., 2011)(Figura 1).

**Figura 1: CSR producido a partir del rechazo de una planta de TMB**



Por otra parte, los CSR son una alternativa viable a los combustibles fósiles convencionales, los cuales pueden ser reemplazados parcialmente en industrias productoras de calor y electricidad (Nasrullah et al., 2017). En este sentido, los CSR son usados principalmente en plantas de producción de energía y hornos de cemento (co-combustión), así como en plantas incineradoras (mono-combustión) (Rotter et al., 2011; Flamme y Geiping, 2012; Lacovidou et al., 2018).

El uso de CSR en plantas de producción de energía tiene dos ventajas principales desde el punto de vista medioambiental. Por un lado, reduce las emisiones netas de CO<sub>2</sub> debido a que poseen parte de carbono de origen biogénico y cuyas emisiones se consideran neutras (Séverin et al., 2010; Nasrullah, 2015). Por otro lado, reduce las emisiones de otros tipos de contaminantes por su bajo contenido en nitrógeno y azufre (Sami et al., 2001; Velis et al., 2010; Gallardo et al., 2014). Además, el coste de

abastecimiento de estos combustibles es menor al de otros combustibles fósiles, por lo que son más asequibles (Sami et al., 2001; Lacovidou et al., 2018). Sin embargo, también tiene algunos inconvenientes como: la mayor producción de cenizas y escorias en las calderas (Frandsen, 2005) y su mayor contenido en cloro, que puede afectar a las cenizas volantes y por lo tanto, al uso de las mismas para la producción de cemento (Brás et al., 2017). Asimismo, este elevado contenido en cloro también es responsable de los mayores costes operativos y de mantenimiento requeridos para mitigar los efectos de la corrosión en los equipos producidos por dicho elemento (Lacovidou et al., 2018).

Así pues, el objetivo de este trabajo de investigación es el diseño de diferentes CSR combinando residuos de biomasa con la mezcla de rechazos de plantas de tratamiento mecánico biológico (PTMB) de RSU, de forma que se pueda mejorar su calidad como combustible y por consiguiente, se maximice el valor económico. Para ello, se han obtenido diferentes tipos de biomasa y distintos tipos de rechazos, se han determinado sus propiedades como combustibles según la norma UNE-EN 15359 (2012) y finalmente, se han diseñado varios CSR a partir de diferentes mezclas de residuos y se han determinado aquellos que pueden tener un mayor valor económico en el mercado.

## 2. Metodología

La metodología que se ha seguido para la realización del trabajo ha sido la siguiente:

A.- Elección de los materiales susceptibles de ser transformados en CSR: se ha elegido un conjunto de rechazos y el bioestabilizado de una planta de TMB. La planta colaboradora ha sido RECIPLASA, ubicada en Onda, Castellón, y próximas al laboratorio donde se ha realizado la parte experimental. A ella llega la fracción resto (residuos mezclados) de los núcleos urbanos que forman el Consorcio de Residuos Zona 2 de la provincia de Castellón. Está compuesta por una primera etapa de separación mecánica semiautomática y una segunda etapa de compostaje mediante túneles. En la primera etapa se separan los materiales reciclables (biorresiduos y envases) y se genera un rechazo grueso (RG) formado por aquellos materiales no reciclables y otros que se escapan al proceso mecánico-manual de recuperación, con un diámetro de partícula superior a 80 mm. En la etapa de compostaje se produce la fermentación aerobia de la fracción de biorresiduo, generando por una parte, un bioestabilizado (compost de baja calidad), que es limpiado (afino) para su posterior venta y, por otra parte, dos corrientes de rechazos: afino primario (RAP), generado en el trómel intermedio de afino del material pre-estabilizado y ubicado a la salida de los túneles (tamaño de partícula de entre 30 y 80 mm) y el afino secundario (RAS), generado en la mesa densimétrica de limpieza del bioestabilizado (tamaño de partícula entre 14 y 30 mm). En cuanto a la biomasa utilizada, se ha obtenido de talleres de madera de la zona y de marcas comerciales.

B.- Definición de los estándares de calidad del CSR: se ha utilizado la norma UNE-EN 15359 (2012): "Combustibles sólidos recuperados: especificaciones y clases" para definir los parámetros de calidad que darán al CSR un valor en el mercado.

C.- Producción del CSR y determinación de sus propiedades: los rechazos y el bioestabilizado se han procesado en el laboratorio y se han transformado en CSR. Se decidió trabajar con las tres corrientes de rechazo y con el bioestabilizado, puesto que tiene difícil mercado. Por otro lado, como los rechazos tienen diferentes propiedades en los períodos primavera-verano y otoño-invierno, se han tomado muestras en ambos. La biomasa con la que se ha trabajado no ha sido necesario procesarla. Las propiedades se han determinado según los procedimientos establecidos en las normas UNE EN sobre CSR. Los parámetros analizados han sido: el poder calorífico inferior (PCI), cloro, mercurio, azufre, cenizas y humedad. Se realizó una primera caracterización en la que

cada muestra se dividió en fracción combustible y no combustible. La fracción combustible se secó, trituró y homogeneizó. En el caso del bioestabilizado solo se tomó una muestra, pues sus propiedades no varían a lo largo del tiempo. También se secó, trituró y homogeneizó. La biomasa se recibió en pellet, por lo que solo hubo que triturar y secar.

Para la determinación de los parámetros de calidad se siguió el conjunto de normas UNE-EN sobre caracterización y determinación de las propiedades de los CSR. Para cada determinación se hicieron tres réplicas y se determinó la media y desviación estándar. En el caso de la humedad se tomó el valor absoluto de la muestra (toda la muestra fue secada).

D.- Diseño de los CSR: se han definido unos criterios para obtener diferentes mezclas de rechazos/bioestabilizado y de biomasa, a partir de cuales se pueda producir un CSR con una mejor calidad y con ello un mayor valor económico en el mercado.

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Elección de los materiales susceptibles de ser transformados en CSR

Respecto a la biomasa, se decidió utilizar pellets comerciales de diferentes marcas y biomasa procedente de varias industrias de la madera. La codificación de los materiales aparece en la tabla 1.

**Tabla 1. Descripción de rechazos y biomasa**

Código	Descripción
RG-P1	Rechazo Grueso recogido en el Periodo primavera verano
RG-P2	Rechazo Grueso recogido en el Periodo otoño invierno
RAP-P1	Rechazo del Afino Primario recogida en el Periodo primavera verano
RAP-P2	Rechazo del Afino Primario recogida en el Periodo otoño invierno
RAS-P1	Rechazo del Afino Secundario recogida en el Periodo primavera verano
RAS-P2	Rechazo del Afino Secundario recogida en el Periodo otoño invierno
BIOES	Bioestabilizado
BIO-1	Pellet comercial de madera de pino
BIO-2	Pellet comercial de madera
BIO-3	Pellet comercial de madera
BIO-4	Viruta de carpintería, compuesta de pino y madera en general
BIO-5	Viruta de aserradero, compuesta de pino

#### 3.2. Definición de los estándares de calidad del CSR

A la hora del diseño de los CSR es necesario fijar unos criterios de calidad, que será un factor clave para su demanda, utilización y comercialización. En la industria de la producción de energía, para que un CSR sea aceptado como sustituto de los combustibles fósiles es fundamental lograr la calidad requerida o exigida (Glorious,

2014). En general, esta se define en términos de homogeneidad (composición), eficiencia energética (valor calorífico) y parámetros técnicos y ambientales (concentración de cloro y mercurio), además, la concentración de metales pesados debe de mantenerse lo más bajo posible (Nasrullah et al., 2017).

En la Unión Europea existe un paquete de normas desarrolladas por el Comité Europeo de Estandarización, en concreto por el Comité Técnico CEN/TC 343 - Solid Recovered Fuels, que regulan la calidad de los CSR. En ellas, se define el CSR como aquellos combustibles producidos a partir de residuos no peligrosos (como los rechazos), tras su adecuado tratamiento, y que cumplen los requisitos de clasificación y especificaciones establecidas en la norma UNE-EN 15359 (2012): “Combustibles sólidos recuperados: especificaciones y clases”. Esta norma propone un sistema de clasificación de la calidad de los CSR basado en los valores límite de tres parámetros: el PCI, como parámetro económico; el contenido en cloro, como parámetro técnico, y el contenido en mercurio, como parámetro medioambiental. En la tabla 2 aparece la clasificación de los CSR en función del valor de estos parámetros. El combustible que tenga clase 1 en los tres parámetros será el de mayor calidad.

**Tabla 2 Estándares de calidad del CSR en Europa (UNE-EN 15359, 2012)**

Parámetro de clasificación	Medida estadística	Unidad	Clases				
			1	2	3	4	5
PCI	Media	MJ/kg (ar)	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3
Cl	Media	% (d)	≤ 0,2	≤ 0,6	≤ 1,0	≤ 1,5	≤ 3
Hg	Mediana	mg/MJ (ar)	≤ 0,02	≤ 0,03	≤ 0,08	≤ 0,15	≤ 0,50
	Percentil 80	mg/MJ (ar)	≤ 0,04	≤ 0,06	≤ 0,16	≤ 0,30	≤ 1,00

En el caso del Hg, el mayor de los dos valores estadísticos es el que determina el número de clase

ar: según se recibe

d: en base seca

Además de estos tres parámetros existen otras propiedades como el contenido en humedad, cenizas, metales, fracción volátil, tamaño de partícula etc., que también son importantes para evaluar el comportamiento de los CSR en las instalaciones de combustión (Velis et al., 2010; Rotter et al., 2011; Lorber et al., 2012; Di Lonardo et al., 2016). Por otro lado, muchos países tienen sus propios estándares que regulan el mercado de estos combustibles (Carlos et al., 2017).

En este trabajo se han elegido como parámetros de calidad el PCI, Cl y Hg y también se ha determinado los valores de humedad, azufre y cenizas por ser indicadores secundarios que también pueden ayudar en la decisión de compra de un CSR.

### 3.3. Producción del CSR y determinación de sus propiedades

En la tabla 3 se presentan los resultados obtenidos tras los análisis. Todos los datos están referidos a muestra seca, excepto la humedad. Las cinco muestras de biomasa presentan valores muy similares en todos los parámetros, a pesar de tener orígenes distintos, por lo que se ha incluido en última fila de la tabla la media todos ellos.

**Tabla 3. Resultados de los parámetros de calidad**

	Humedad (%)		Cenizas (%)		S (%)		PCI (MJ/kg)		Cl (%)		Hg (mg/kg)		Hg (mg/MJ)
	m	s	m	s	m	s	m	s	m	s	m	s	m
RG-P1	34,42	9,70	0,10	0,187	0,015	19,43	0,17	1,711	0,232	0,0415	0,0012	0,0021	
RG-P2	29,58	11,53	0,31	0,102	0,007	20,15	0,13	2,650	0,155	0,0551	0,0050	0,0027	
RAP-P1	25,81	18,85	0,40	0,144	0,006	15,81	0,03	0,953	0,045	0,0959	0,0026	0,0061	
RAP-P2	37,65	19,29	0,11	0,134	0,006	17,43	0,24	1,352	0,036	0,1430	0,0300	0,0082	
RAS-P1	12,61	25,32	0,89	0,208	0,045	13,84	2,35	1,115	0,119	0,7511	0,0225	0,0543	
RAS-P2	22,06	21,84	0,84	0,198	0,010	14,01	0,38	0,695	0,058	0,2777	0,0052	0,0198	
BIOES	10,17	28,48	1,39	0,210	0,040	13,76	0,23	0,768	0,090	0,3027	0,0122	0,0220	
BIO-1	9,39	2,48	0,13	0,029	0,002	18,97	0,10	0,097	0,021	0,0100	0,0025	0,0005	
BIO-2	7,74	0,55	0,03	0,023	0,005	18,92	0,19	0,122	0,003	0,0031	0,0014	0,0002	
BIO-3	7,64	3,60	0,11	0,069	0,003	17,56	0,20	0,119	0,005	0,0086	0,0048	0,0005	
BIO-4	7,24	0,67	0,06	0,024	0,003	18,94	0,29	0,096	0,018	0,0037	0,0001	0,0002	
BIO-5	7,65	3,64	0,08	0,021	0,003	18,27	1,47	0,130	0,040	0,0031	0,0002	0,0002	
BIO med	7,93	2,18		0,033		18,53		0,113		0,006		0,0003	

m: media; s: desviación típica

En la tabla 3 aparecen los resultados de los análisis de las 12 muestras consideradas. Respecto a la humedad, los rechazos tienen un valor mucho más elevado que la biomasa, que presenta la mínima necesaria para la cohesión de los pellets y es muy parecida en todos ellos. Respecto al RG, en primavera-verano la humedad es mayor debido a que los residuos llegan a la planta más húmedos. En los RAP y RAS de primavera-verano la humedad es menor que en el período otoño-invierno, debido al clima seco y de altas temperaturas que hace que en el proceso de compostaje se pierda una mayor humedad. El bioestabilizado es un material elaborado y tiene una humedad parecida a la biomasa.

En cuanto a las cenizas, los rechazos presentan mayores porcentajes que las muestras de biomasa, que presentan valores parecidos entre sí e inferiores al 3,6%. El RG presenta valores más bajos que los RAP y RAS, ya que en el proceso de compostaje estos se impregnan de material inerte. Finalmente, el bioestabilizado tiene el valor más alto, porque contiene una gran cantidad de tierra y otros inertes.

El azufre es otro elemento importante a tener en cuenta en un combustible. Si bien su contenido en los rechazos y el estabilizado es más alto que en las muestras de biomasa, son muy bajos respecto a los combustibles sólidos y líquidos de origen fósil, lo que supone una ventaja.

Las dos muestras de RG representan los valores más altos de PCI (19,43 y 20,15 MJ/kg), debido a que están formados por materiales muy combustibles (plásticos, celulosas, textiles, gomas, papel, etc.). En segundo lugar, se encuentran las muestras de biomasa, con valores de entre 17,6 y 19 MJ/kg. Los RAP y RAS, a pesar de que contienen material combustible, su alto contenido en cenizas hace que el PCI sea más bajo que la biomasa. Finalmente, el bioestabilizado presenta menor contenido energético debido a que es un material biogénico y con gran cantidad de inerte.

En relación al cloro, las muestras de biomasa presentan valores de entre 0,10 y 0,13% por lo que, considerando que norma UNE EN 15359 cataloga de clase 1 al combustible

cuando el valor es menor o igual a 0,2%, los datos son muy buenos. Sin embargo, todos los rechazos presentan valores elevados, lo que es una gran desventaja. Finalmente, respecto al mercurio, todas las muestras presentan valores muy bajos, lo que es un aspecto positivo de todos los CSR analizados. En la última columna se ha añadido el valor del mercurio expresado en mg/MJ, para poder comparar con el estándar de calidad.

### 3.3. Diseño de CSR

A partir de los datos de la tabla 3 se puede hacer una clasificación de los CSR según la norma UNE EN 15359 (tabla 4). En el caso del mercurio, la norma utiliza la mediana, pero el valor de este es tan bajo en todos los casos, que se ha tomado la media para hacer la clasificación. Respecto a las muestras de biomasa, al ser tan parecidas se ha tomado la media de cada parámetro y se ha procedido a su clasificación (BIO med).

**Tabla 4. Clasificación de los CSR**

	Clases		
	PCI	Cl	Hg
RG-P1	3	5	1
RG-P2	2	5	1
RAP-P1	3	3	1
RAP-P2	3	4	1
RAS-P1	4	4	1
RAS-P2	4	3	1
BIOES	4	3	1
BIO med	3	1	1

Se puede observar en la tabla 4 que la biomasa (BIO med) es el mejor combustible desde el punto de vista del cloro y el mercurio, clase 1, pero el moderado PCI le hace clase 3 en este parámetro. Respecto a los CSR procedentes de los rechazos, todos tienen bajas calificaciones en el cloro y moderadas en el PCI. Todos tienen clase 1 en el mercurio.

Para mejorar la calidad del CSR que se pueda producir a partir de los rechazos y el bioestabilizado de la planta de Onda, se pueden mezclar con la biomasa. Esta le puede aportar una bajada en la concentración de cloro y en algunos casos una subida del PCI. Por otro lado, otro aspecto positivo importante estaría relacionado con las emisiones de CO<sub>2</sub>, puesto que las producidas por la combustión de la biomasa no computan, por tanto, cuanto más porcentaje de biomasa lleve la mezcla, menores emisiones de CO<sub>2</sub> serían computadas en la combustión del CSR resultante.

El objetivo del estudio es producir un combustible a partir de los rechazos y el bioestabilizado de la planta con las mejores propiedades posibles y como consecuencia minimizar su depósito en vertedero. Por tanto, una forma de hacerlo sería mezclarlo con otros combustibles ventajosos, como puede ser la biomasa. No obstante, la prioridad de valorizar el rechazo y las limitaciones de las fuentes de biomasa marcan unos criterios a la hora de hacer la mezcla, que son los siguientes:

- El porcentaje de rechazo/bioestabilizado será mayor o igual al 50%.
- Rebajar la cantidad de cloro, que es un limitante importante en los hornos de combustión.

A partir de estos criterios se han obtenidos las mezclas que aparecen en la tabla 5. En ella se puede observar la proporción rechazo/biomasa y bioestabilizado/biomasa, el incremento en el PCI respecto al rechazo/bioestabilizado original y la clasificación de los nuevos CSR.

**Tabla 5. Clasificación de los nuevos CSR**

	Proporción mezcla (%)	PCI Incremento (%)	Clases		
			PCI	Cl	Hg
RG-P1/ BIO med	55/45	-2,1	3	3	1
RG-P2/ BIO med	55/45	-3,7	3	4	1
RAP-P1/ BIO med	58/48	14,3	3	2	1
RAP-P2/ BIO med	72/28	1,8	3	3	1
RAS-P1/ BIO med	88/12	4,1	4	3	1
RAS-P2/ BIO med	84/16	5,2	4	2	1
BIOES/ BIO med	74/26	11.0	4	2	1

En la tabla 5 se puede observar que los nuevos CSR han mejorado su clase respecto al cloro al menos en un grado, excepto en RG-P1/ BIO med que ha sido mayor, pasando de 5 a 3.

En los combustibles RG-P1/ BIO med y RG-P2/ BIO med, se ha disminuido en una pequeña proporción su contenido energético, pero la rebaja importante en la concentración de cloro los hace más competitivos en el mercado. La elevada concentración de cloro ha hecho que se necesite un porcentaje muy importante de biomasa, lo que aumenta el volumen de producción y encarece el producto final. Como ventaja, el producto final tiene una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> del 45%.

El resto de nuevos CSR han mejorado sus características energéticas respecto al material inicial, además las necesidades de biomasa no son tan elevadas. Por el contrario, los productos finales no tienen tanta rebaja en las emisiones de CO<sub>2</sub>.

#### 4. Conclusiones

Como conclusión se puede afirmar que se ha cumplido con el objetivo del trabajo de investigación, diseñando un CSR para cada una de las corrientes de rechazos y del biorresiduo producidos en la planta de tratamiento de RSU de Onda. Además, para los rechazos se han diferenciado entre los producidos en el período primavera-verano y otoño invierno.

Los rechazos/bioestabilizado, en general, presentan un poder calorífico elevado y unas bajas concentraciones de azufre y mercurio, aunque un elevado porcentaje de cenizas, sobre todo los rechazos de afino primario/secundario y el bioestabilizado. Pero el parámetro limitante de la calidad de los rechazos es el cloro, que aparece en porcentajes altos para poder ser considerados como buenos combustibles.



Se ha demostrado que la biomasa procedente de la industria de la madera es un combustible con buenas propiedades (bajos contenidos en cloro, azufre, mercurio y cenizas), aunque con un poder calorífico limitado. La mezcla en determinadas proporciones de este material con los rechazos/biorresiduo mejoran su calidad, que viene determinada por la norma UNE EN 15359.

Se pueden diseñar diferentes CSR a partir de mezclas de residuos y biomasa, pero si el objetivo prioritario es valorizar los residuos y no depositarlos en el vertedero, será necesario mejorar sus propiedades utilizando la menor cantidad de biomasa posible, ya que esta aumenta el volumen final de CSR y encarece el proceso de producción, aunque tiene la ventaja de generar un producto con una reducción del cómputo de CO<sub>2</sub> emitido en su combustión en relación directa a la biomasa utilizada.

## Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la empresa RECIPLASA por su colaboración en el trabajo de campo necesario para llevar a cabo este estudio.

## 5. Referencias

- Brás, I., Silva, M.E., Lobo, G., Cordeiro, A., Faria, M., De Lemos, L.T., 2017. Refuse Derived Fuel from Municipal Solid Waste rejected fractions- a Case Study. *Energy Procedia* 120, 349–356. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.227>
- Carlos, M., Gallardo, A., Colomer, F.J., Edo-Alcón, N. 2017. Producción y consumo de CSR. Estudio comparativo de la situación europea. Actas del VII Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos. Santander. ISBN: 978-697-3824-5
- 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>
- 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>
- Frandsen, F.J, 2005. Utilizing biomass and waste for power production—a decade of contributing to the understanding, interpretation and analysis of deposits and corrosion products. *Fuel* 84, 1277–1294. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2004.08.026>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.085>
- Garcés, D., Díaz, E., Sastre, H., Ordóñez, S., González-LaFuente, J.M., 2016. Evaluation of the potential of different high calorific waste fractions for the preparation of solid recovered fuels. *Waste Manag.* 47, 164–173. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.029>
- Glorious, T., 2014. Production and Use of Solid Recovered Fuels – Developments and Prospects. *ZKG* 9, 72–80.
- Lacovidou, E., Hahladakis, J., Deans, I., Velis, C., Purnell, P., 2018. Technical properties of biomass and solid recovered fuel (SRF) co-fired with coal: Impact of on multi-dimensional resource recovery value. *Waste Manag.* 73, 535–545. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.001>

- Lorber, K.E., Sarc, R., Aldrian, a., 2012. Design and quality assurance for solid recovered fuel. *Waste Manag. Res.* 30, 370–380. <https://doi.org/10.1177/0734242X12440484>.
- Nasrullah, M., 2015. Material and energy balance of solid recovered fuel production (Tesis Doctoral). Aalto University, School of Chemical Technology.
- 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>
- Rada, E.C., Andreottola, G., 2012. RDF/SRF: Which perspective for its future in the EU. *Waste Manag.* 32, 1059–1060. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2012.02.017>
- Ragazzi, M., Rada, E.C., 2012. RDF/SRF evolution and MSW bio-drying, in: *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. WIT Press, pp. 199–208. <https://doi.org/10.2495/WM120191>
- Rotter, V.S., Lehmann, A., Marzi, T., Möhle, E., Schingnitz, D., Hoffmann, G., 2011. New techniques for the characterization of refuse-derived fuels and solid recovered fuels. *Waste Manag. Res.* 29, 229–236. <https://doi.org/10.1177/0734242X10364210>
- Sami, M., Annamalai, K., Wooldridge, M., 2001. Co-firing of coal and biomass fuel blends. *Prog. Energy Combust. Sci.* 27, 171–214. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(00\)00020-4](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(00)00020-4)
- Séverin, M., Velis, C.A., Longhurst, P.J., Pollard, S.J.T., 2010. The biogenic content of process streams from mechanical–biological treatment plants producing solid recovered fuel. Do the manual sorting and selective dissolution determination methods correlate? *Waste Manag.* 30, 1171–1182. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2010.01.012>
- UNE-EN 15359, 2012. Combustibles sólidos recuperados: Especificaciones y clases. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid
- 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. Technol.* 40, 979–1105. <https://doi.org/10.1080/10643380802586980>

**Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible**

