

Proyecto Fin de Máster
Máster en Organización Industrial y
Gestión de Empresas

Estudio de Eficiencia en Plantas de Selección de
Residuos

Autor: D. Luis Mora Cuadros

Tutor: D. Gabriel Villa Caro

Dpto. Organización Industrial y Gestión de
Empresas I
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Proyecto Fin de Máster
Máster en Organización Industrial y Gestión de Empresas

Estudio de Eficiencia en Plantas de Selección de Residuos

Autor:

D. Luis Mora Cuadros

Tutor:

D. Gabriel Villa Caro

Profesor titular

Dpto. Organización Industrial y Gestión de Empresas I

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Proyecto Fin de Máster: Estudio de Eficiencia en Plantas de Selección de Residuos

Autor: D. Luis Mora Cuadros

Tutor: D. Gabriel Villa Caro

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Me gustaría agradecer en primer lugar a mi tutor D. Gabriel Villa Caro, por su paciencia y dedicación durante estos casi dos años de proyecto. Ha sido un proyecto realizado en una situación bastante complicada, debido a todas las circunstancias que han sucedido durante este tiempo, y su comprensión y esfuerzo, me han servido para poder llevarlo a cabo.

En segundo lugar, me gustaría mencionar a Rocío Riscart, por todo su apoyo durante este tiempo tan difícil. El hecho de haber conseguido acabar juntos nuestros respectivos TFM y terminar esta etapa juntos me llena de alegría.

Y por último, a toda mi familia, por su apoyo a realizar este máster tan lejos de mi casa, y su incansable esfuerzo para que pudiera conseguir todos mis objetivos. Destacando a mi padre, que en paz descansa, que siempre me apoyó en mis estudios.

Luis Mora Cuadros

Sevilla, 2018

Resumen

La creciente cultura de consumismo que hay en los países desarrollados, está provocando que la cantidad de residuos generados esté creciendo a ritmos vertiginosos. Esto conlleva a una necesidad de tratar estos residuos, para que puedan ser reutilizados y crear un modelo sostenible para ellos.

Con la intención de llegar a este objetivo, se pretende medir la eficiencia de diferentes plantas de selección de residuos, en las cuáles se separan todas aquellas materias que pueden llegar a ser recicladas, de las que tendrán que ser enviadas a depósitos controlados o tratadas.

Abstract

The growing culture of consumerism that exists in developed countries, is causing the amount of waste generated is growing at breakneck speed. This leads to a need to treat this waste, so that it can be reused and create a sustainable model for them.

With the intention of reaching this objective, the aim is to measure the efficiency of different waste sorting plants, in which all those materials that can be recycled are separated, from which they will have to be sent to controlled or treated deposits.

Tabla de Contenidos

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Tabla de Contenidos	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
Notación	xxi
1 Objetivo del Trabajo Fin de Máster	2
2 Introducción	4
3 Estado del Arte	8
3.1 <i>Tratamiento de Residuos</i>	8
3.1.1 Plantas de Selección de Residuos	10
3.1.2 Materiales Valorizables	11
3.1.3 Funcionamiento Plantas de Selección	12
3.2 <i>Estudios de Eficiencia en Plantas de Selección de Residuos</i>	18
3.3 <i>Modelos DEA con varios Modos de Funcionamiento</i>	20
4 Modelo DEA para Plantas de Selección de Residuos	26
4.1 <i>Modelo Matemático</i>	29
4.1.1 Modelo Elemental	30
4.1.2 Modelo MMF1	31
4.1.3 Modelo MMF2	33
5 Análisis de los resultados	35
6 Resumen y Conclusiones	52
Referencias	56
<i>Artículos</i>	56
<i>Webs</i>	58
Anexos	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Residuos generados (kg per cápita) por país de la UE	5
Tabla 4-1. Variables de Salida para el modelo DEA en plantas de selección de residuos	27
Tabla 4-2. Variables de Entrada para el modelo DEA en plantas de selección de residuos	28
Tabla 5-1. Valores estadísticos mensuales de las 5 plantas de selección de residuos para los dos MF	35
Tabla 5-2. SBI y holguras de salida procesadas para el modelo elemental	37
Tabla 5-3. SBI y holguras de salida procesadas para el modelo MMF1	39
Tabla 5-4. SBI, fracciones de tiempo por MF y holguras de salida procesadas para el modelo MMF2	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1. Esquema del proceso de recuperación de residuos municipales	9
Figura 3-2. Vista frontal de un trommel en funcionamiento para la separación granulométrica	14
Figura 3-3. Estructura de un separador balístico	15
Figura 3-4. Funcionamiento de un separador óptico	16
Figura 3-5. Ejemplo de diferentes balas de plástico listas para su envío	17
Figura 3-6. DMU con entradas y salidas	20
Figura 3-7. Ejemplo de Network DEA	20
Figura 3-8. Sistema de Múltiples Modos de Funcionamiento	21
Figura 4-1. Esquema del modelo DEA para plantas de selección de residuos	29
Figura 5-1. Porcentajes de DMU's eficientes para cada modelo por planta	42
Figura 5-2. Gráficas de los resultados SBI para los modelos EM y MMF	44
Figura 5-3. Gráficas de los resultados t_j^m frente α_j^m para los MF1 y MF2	48
Figura 5-4. Gráficas de la tendencia de la eficiencia por planta	49

Notación

DEA	Data Envelopment Analysis (Análisis por Envoltura de Datos)
DMU	Decision Making Unit (Unidad de Toma de Decisiones)
EELL	Envases ligeros
EM	Elementary Model (Modelo Elemental)
MF	Modo de funcionamiento
Mix	Material recuperado que se compone por una mezcla de diferentes plásticos
MMF	Múltiples modos de funcionamiento
PEAD	Polietileno de Alta Densidad
PEBD	Polietileno de Baja Densidad
PET	Polietileno Tereftalato
P/C	Papel y Cartón
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
TFM	Trabajo Fin de Máster

1 OBJETIVO DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER

Las plantas de selección son una parte esencial de la cadena de gestión de residuos, ya que permiten aumentar de forma significativa el porcentaje de residuos que posteriormente serán enviados a plantas de reciclaje y, por consecuencia, reutilizados en el mercado. Esto es debido a que estas plantas procesan todos los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), así como la fracción de Envases Ligeros (EELL) que son recogidos en los municipios. El objetivo que se establecerá en este Trabajo de Fin de Máster (TFM) será el de analizar la eficiencia de diferentes plantas de selección de residuos a nivel español.

Para poder realizar este estudio, se utilizará el método *Data Envelopment Analysis* (DEA) o Análisis por Envoltura de Datos. Técnica no paramétrica, que evaluará la eficiencia relativa de diferentes plantas de selección, con la intención de obtener unos resultados que puedan proporcionar unas conclusiones y áreas de mejora concretas.

El modelo DEA que se empleará en el proyecto, será por múltiples modos de funcionamiento (MMF). Este modelo se emplea para casos en que una misma unidad productiva trabaja en más de un modo de funcionamiento (MF). Para nuestro caso específico, se trabajará durante un tiempo estipulado procesando tanto la fracción de RSU, como la de EELL, pero siempre por separado. Durante el proyecto, se demostrará que este modelo es adecuado para la medición de la eficiencia, debido a que utiliza una variante temporal que proporcionará unos resultados mucho más ajustados al proceso que se realiza en este tipo de plantas.

Una vez realizado el análisis del proyecto, se pretende estudiar cuál es la situación actual del entorno de las plantas de selección de residuos. A partir de ello, intentar conseguir mejoras dentro de este terreno, determinando si hay posibles cambios a realizar, con el objetivo de perfeccionar al máximo el proceso de cada una de las plantas y, por consecuencia, mejorar el porcentaje de residuos que puedan llegar a ser reciclados.

2 INTRODUCCIÓN

La sociedad actual de los países desarrollados, está inmersa en una cultura de consumismo en la que el concepto de “usar y tirar” está a la orden del día, y está provocando una acumulación de residuos que hasta ahora no ha sabido gestionarse de forma adecuada en muchos de estos países.

Desde hace un tiempo, la sociedad va tomando conciencia de que los recursos no son ilimitados y, por tanto, de la importancia de recuperar la mayor cantidad de residuos, no solamente por el gran impacto ambiental que supone, sino también por el beneficio económico que genera, debido a la aparición de nuevas empresas destinadas al reciclaje, o al menor consumo de energía para la fabricación de nuevas materias, entre muchos otros factores que iremos viendo.

En España, tal y como vemos en la *tabla 2-1*, hasta inicios del siglo XXI se encontraba entre los países que más kg de residuos per cápita generaba anualmente, llegando a máximos de 650kg/persona. Alcanzadas estas cifras, se empezaron a realizar campañas de concienciación con el reciclaje, además de un reaprovechamiento de los residuos debido a la crisis económica, consiguiendo una reducción que sitúa al país por debajo de la media de la UE.

A pesar de que se ha conseguido reducir la cantidad de residuos generada, es necesario que haya diferentes métodos de tratamiento para estos mismos, y que se lleguen a emplear de forma eficiente, creando un modelo sostenible en el que no se lleguen a perder tantos recursos como hasta ahora y, en ese sentido, estamos muy por debajo a nivel porcentual de recuperación aún de la media europea, tal y como se desprende en el siguiente artículo (El País [1]), donde confirma que España, puede no llegar a conseguir los porcentajes mínimos de residuos municipales reciclados para 2025, fijados por las instituciones europeas en los que obligan a reciclar el 55% de los residuos municipales.

Tabla 2–1. Residuos generados (kg per cápita) por país de la UE.

Fuente: Eurostat Statistics Explained [2]

	1995	2000	2005	2010	2015	change (%) 1995-2015
EU-28	:	521	515	504	477	:
EU-27	473	523	517	505	477	0.8
Belgium	455	471	482	456	419	-7.9
Bulgaria	694	612	588	554	419	-39.6
Czech Republic	302	335	289	318	316	4.6
Denmark	521	664	736	:	789	51.4
Germany	623	642	565	602	625	0.3
Estonia	371	453	433	305	359	-3.2
Ireland	512	599	731	624	:	:
Greece	:	412	442	532	:	:
Spain	505	653	588	510	434	-14.1
France	475	514	530	533	502	5.7
Croatia	:	262	336	379	393	:
Italy	454	509	546	547	486	7.0
Cyprus	595	628	688	689	638	7.2
Latvia	264	271	320	324	433	64.0
Lithuania	426	365	387	404	448	5.2
Luxembourg	587	654	672	679	625	6.5
Hungary	460	446	461	403	377	-18.0
Malta	387	533	623	601	624	61.2
Netherlands	539	598	599	571	523	-3.0
Austria	437	580	575	562	560	28.1
Poland	285	320	319	316	286	0.4
Portugal	352	457	452	516	:	:
Romania	342	355	383	313	:	:
Slovenia	596	513	494	490	449	-24.7
Slovakia	295	254	273	319	329	11.5
Finland	413	502	478	470	500	21.1
Sweden	386	428	477	439	447	15.8
United Kingdom	498	577	581	509	485	-2.6
Iceland	426	462	516	481	:	:
Norway	624	613	426	469	421	-32.5
Switzerland	600	656	661	708	725	20.8
Montenegro	:	:	:	:	533	:
FYR of Macedonia	:	:	:	351	:	:
Serbia	:	:	:	363	259	:
Turkey	441	465	458	407	400	-9.3
Bosnia and Herzegovina	:	:	:	332	:	:
Kosovo*	:	:	:	:	178	:

(:) not available

El proceso que siguen los residuos municipales es el siguiente: una vez son recogidos, pasan por las denominadas plantas de selección, las cuáles separan los materiales que pueden llegar a ser reciclados, (que se enviarán a las respectivas plantas de reciclaje), de los que no pueden llegar a ser reciclados, (que serán enviados a depósitos controlados o incineradoras).

En este proyecto se pretende estudiar el buen funcionamiento de este paso intermedio, tanto de envases ligeros como de RSU. Para ello, se propone modelar el proceso a través de un modelo DEA, que evaluará la eficiencia de diferentes plantas de selección pudiendo identificar cuáles son los puntos débiles, y dónde se tiene que seguir mejorando para que el proceso sea eficiente, consiguiendo aumentar en lo posible las cantidades de residuos que pueden ser reciclados.

En concreto, se propondrá un modelo basado en múltiples modos de funcionamiento, que determine el tiempo que la planta estará trabajando con un tipo de residuos o el otro en cada instante. Este novedoso modelo DEA será analizado en profundidad a lo largo del trabajo, y se podrán ver cuáles son sus ventajas a la hora de analizar la eficiencia de las plantas de selección de residuos.

El documento contendrá las siguientes partes: en primer lugar, el estado del arte del trabajo, en el cual se establecerá el punto de partida del proyecto. A partir de ahí, habiendo determinado el modelo DEA con el que se realizará el estudio, se dará a conocer íntegramente el modelo elegido por múltiples modos de funcionamiento. Finalmente, a partir de los datos extraídos de diferentes plantas de selección en España, se aplicará el modelo DEA, el cuál determinará cuáles serán los tiempos de operación óptimos para cada MF, y se identificarán las posibles áreas de mejora para cada planta.

3 ESTADO DEL ARTE

Este apartado se estructura en tres partes fundamentales: primero un estudio bibliográfico del funcionamiento de las plantas de selección de residuos para dar a conocer su estructura; un segundo apartado en el cuál se presentan los estudios de eficiencia más importantes en este tipo de plantas, estableciendo el nivel de investigación al que se ha llegado; y por último, se presentan los modelos DEA basados en múltiples modos de funcionamiento.

El primer apartado será de vital importancia para entender cómo funcionan las plantas de selección de residuos. Primero, se explicará de forma general cómo es el funcionamiento del tratamiento de residuos en España, y con esta información, se podrá entender cuál es la situación en el organigrama del tratamiento de residuos de las plantas de selección. A partir de este punto, se presentarán los materiales valorizables que se pueden recuperar en estas plantas y se detallará el funcionamiento de este tipo de plantas.

El segundo apartado establecerá los trabajos más recientes sobre el análisis del buen funcionamiento de las plantas de reciclaje, y se constatará que el estudio que se quiere realizar para la eficiencia de este tipo de plantas es un proyecto inédito. Además, ayudará a comprender qué tipos de modelos de eficiencia se han ido utilizando, para tener más claro cuál utilizaremos para el nuestro, que en este caso será un modelo DEA.

Por último, y como se indicaba anteriormente, se realizará una revisión de la metodología DEA, centrándonos en los modelo DEA con múltiples modos de funcionamiento.

3.1 Tratamiento de Residuos

En la actualidad, el tratamiento de los residuos municipales es un tema de máxima importancia debido al crecimiento de las cantidades de residuos generados. Tal y como se ha visto en el capítulo anterior, se están realizando muchas campañas de concienciación sobre la importancia del buen reciclaje, pero si nos fijamos bien en la *tabla 2-1*, prácticamente en dos tercios de los países analizados, la cantidad de residuos generados

sigue creciendo, por ello es de vital importancia una gestión óptima para solventar esta problemática.

Ante cuestiones cómo, qué debemos hacer con estos residuos generados; si es posible reciclar el 100% de estos residuos; qué podemos hacer con el porcentaje de residuos que aún no se tiene solución para poder reciclados; es interesante conocer cómo se están gestionando los residuos hasta ahora, y si hay aspectos que puedan mejorarse en el proceso para que se encuentren soluciones adecuadas para este.

Como bien es sabido, a nivel español tenemos una serie de contenedores de diferentes colores, para separar cada uno de los residuos municipales que posteriormente pasarán a su tratamiento y reciclado. Este proceso es establecido por la legislación española en el *Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015* [3]. En la *figura 3-1* se puede ver el proceso que seguiría cada una de las diferentes recogidas de contenedores.

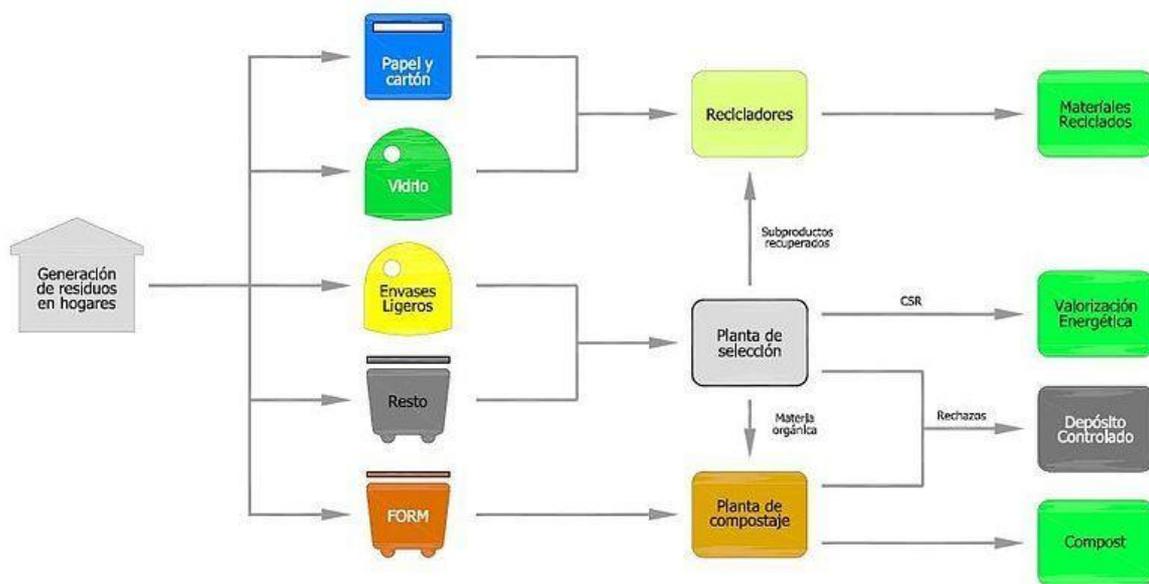


Figura 3-1. Esquema del proceso de recuperación de Residuos Municipales.

Fuente: Cicla Consulting Services, Gestión Medioambiental [4].

Analizando la figura anterior, existen grandes diferencias entre los tratamientos para cada uno de los diferentes residuos de cada contenedor. Esto es debido en parte, al tipo y porcentaje de material recuperable que se recicla de forma correcta en los municipios.

En primer lugar, **papel y cartón** por un lado y **vidrio** por el otro, no son tratados por plantas de selección sino que directamente, son recogidos por diferentes empresas para que sean llevados a los recicladores. En España, las empresas que gestionan estos residuos son *Ecoembes* [5] y *Ecovidrio* [6], debido a que el papel y cartón, a partir de un proceso de recuperación de las fibras de celulosa, y el vidrio, únicamente siendo triturado y calentado a altas temperaturas, llegan a reciclarse de forma mucho más simple, y no es necesaria una separación previa, sino que los propios recicladores lo separan según sus propios intereses, para su venta.

Por otro lado encontramos el **FORM**. La fracción orgánica de los residuos municipales es enviada a plantas de compostaje en las que, a partir de un tratamiento biológico aerobio en condiciones controladas, se obtiene compost para su uso posterior, tal y como recoge *Ecoembes* [5] su tratamiento. En algunas ocasiones, estas plantas de compostaje pueden encontrarse junto a las plantas de selección para poder gestionar ambos residuos.

Por último, y será el que nos interesará para el objetivo de nuestro proyecto, destacaremos el proceso que pasan tanto los **envases ligeros** como el **resto de RSU** dentro de las plantas de selección, para poder separar primero de todo la materia orgánica, de todo el material valorizable, y por último del material que se llevará a depósitos controlados.

Todos estos residuos, conocidos como RSU (Residuos Sólidos Urbanos), son procesados y analizados con la intención de recuperar la máxima cantidad de material posible, evitando tener que llegar a la última opción que es la de enviarlos a depósitos controlados. Para reducir estas cantidades, es básico conocer el proceso que se lleva a cabo en las plantas de selección, en las cuáles se procesan tanto la fracción de envases ligeros como la de resto (*figura 3-1*). Una vez se estudie este proceso nos adentraremos en cómo actuar en este punto.

3.1.1 Plantas de Selección de Residuos

Tal y como se ha observado en la *figura 3-1*, y como dictamina *Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015* [3], se han tenido que crear diferentes infraestructuras para conseguir el grado de separación que se pretende, y poder separar todos los residuos que se obtienen mezclados, y la estructura que nos interesa en este caso es la planta de selección, dado que intenta darnos flujos alternativos para que no lleguen a depósitos controlados los materiales que pueden ser reciclados.

Este tipo de plantas se caracterizan por tener las siguientes funciones descritas en *Bovea et al. (2010)*:

- Creación de una segregación de un alto porcentaje de la fracción orgánica, que se encuentra dentro de las fracciones de resto, para su posterior tratamiento biológico tal y como se explicaba en el capítulo anterior.
- Separación de todos los materiales recuperables dentro de las fracciones de envases ligeros y resto, entre los que se encuentran prácticamente las diferentes clases de plásticos, papel y cartón entre otras que veremos a continuación, para su posterior reciclaje en otras plantas asociadas.
- Producción del CSR (Combustible Sólido Recuperado), a partir de las fracciones ligeras de los residuos para su valorización energética en plantas de incineración. Actualmente, el Comité Técnico de Normalización 301 de AENOR, está en proceso de crear una regularización de este producto dado que en otros países está implantada desde hace años.

- Preparación de todos los rechazos no recuperables para su posterior tratamiento, y que puedan ser llevados a los depósitos controlados, eliminándolos de forma adecuada con la normativa, este tratamiento se puede ver documentado en el artículo de *Seoánez (1999)*.

A su vez, la normativa ha creado muchos cambios dentro del proceso de la valorización de los residuos, dado que hasta hace pocos años, la totalidad de la fracción de resto iba a depósitos controlados, sin pasar por ningún tratamiento. La obligatoriedad de procesar todo este material, ha originado que las cantidades enviadas a depósitos se hayan ido reduciendo.

3.1.2 Materiales Valorizables

Una vez se conocen cuáles son las funciones de este tipo de plantas, es importante analizar los materiales que se pueden recuperar, para posteriormente poder estudiar cómo se recupera cada uno de ellos.

Tal y como se ha podido ver en la *figura 3-1*, en las plantas de selección, entran dos tipos de residuos, la fracción de envases ligeros y la fracción de resto de RSU. A pesar de ser residuos totalmente diferentes, los materiales que podemos llegar a recuperar son muy parecidos, dado que pasan por una serie de estaciones de trabajo comunes, la principal diferencia es al inicio del proceso, dado que la fracción de resto de RSU ha de pasar por un proceso inicial, en el cual separa la fracción orgánica, para que esta pueda tratarse por separado. En cambio, la fracción de EELL, no contiene nada de residuos orgánicos y no debe de pasar estos procesos, *Antón et al. (1997)*.

Por otro lado, como cada día la tecnología va evolucionando, las plantas más modernas pueden llegar a separar cada vez más variedad de materiales, pero hay una serie de materiales que son separados en todas ellas, y que se pueden considerar como los más destacados, o más comunes dentro de las plantas de selección *Bovea et al. (2010)*:

1. **PET**: “polietileno tereftalato” es un tipo de plástico usado en muchos tipos de envases de bebidas. Un posible ejemplo de este material son las botellas de agua o de bebidas azucaradas.
2. **PEAD**: “polietileno de alta densidad”, tipo de plástico utilizado en envases desechables, especialmente para detergentes debido a sus propiedades.
3. **PEBD**: “polietileno de baja densidad”, tipo de plástico del que están compuestos la mayoría de embalajes, desde bolsas de plástico, embalaje de film, etc.
4. **Brick**: envase de cartón, usado para una gran cantidad de productos entre los que destacan los tetrabriks.
5. **Acero**: se consideran como acero todas aquellas materias férricas que pueden ser separadas por electroimanes.

6. **Papel y Cartón:** a pesar de haber un contenedor exclusivo para este material, la cantidad que podemos encontrar en otros contenedores es muy elevada.
7. **Mix:** engloba a todos aquellos plásticos que no están incluidos en las anteriores clasificaciones, pero están formados por plásticos valorables.

Estos materiales son los más destacados por las diferentes plantas de selección, dado que son los que mayor cantidad se puede seleccionar. A pesar de ello, también cabe destacar otros materiales como el aluminio, la chatarra (no valorizable como acero), el PP “polipropileno”, entre otros materiales que también pueden llegar a ser recuperados por plantas de selección de residuos, pero para ello tendrán que disponer de tecnología más avanzada y, para nuestro caso de estudio estos valores son ínfimos.

3.1.3 Funcionamiento Plantas de Selección

Una vez introducidos los materiales que se recuperan dentro de las plantas de selección, queda por conocer el funcionamiento de estas plantas para la recuperación de dichos materiales.

Tal y como se mencionaba al explicar las funciones de las plantas de selección, una de estas es la de la separación de todos aquellos materiales recuperables que puedan ser reciclados, obteniendo nueva materia prima, de aquellos materiales que no pueden ser reciclados (considerados como rechazo), y que serán enviados a depósitos controlados o a tratamientos posteriores para su eliminación.

Años atrás y, actualmente en países menos desarrollados, estos procesos se realizaban de forma manual, por tanto, dependía mucho de la formación del personal, de la cantidad de material que entraba (caudal), del estado en que se encontraba este material, entre otros factores. Por tanto, el porcentaje de recuperación era muy inferior al que se puede obtener hoy en día. Actualmente, estos procesos de selección de los materiales constan tanto de procesos manuales, realizados directamente por personal cualificado, como por procesos mecánicos o automatizados, en los que no se requiere de intervención humana.

Otro de los puntos que ha cambiado con la vigente legislación, es que en estas plantas, sólo se procesaba la fracción de envases ligeros, pero actualmente también entran por estas mismas instalaciones la fracción de resto de RSU, esto implica un cambio dentro del proceso, cuya evolución está ampliamente estudiada en *GBB* [7].

A continuación, se realizará una explicación de las nueve fases del proceso que siguen los residuos dentro de las plantas de selección, para ambas fracciones de residuos, tanto la de envases ligeros como la de resto de RSU, según están recogidas en *Bovea et al. (2010)*, *Kumar (2016)* y *Ecoembes* [5].

- **Fase 1. Recepción de Residuos**

Esta primera fase, corresponde a la llegada de los camiones de recogida de residuos urbanos a la planta. En esta, cabe destacar que tiene que haber una diferenciación entre el foso de la fracción resto, y el de la fracción de envases ligeros, dado que estos dos residuos no se mezclarán en ningún momento del proceso de selección, entrarán en el proceso siempre por separado, tal y como puede verse recogido en *López (2017)*. Esto es debido a que la fracción de envases ligeros acostumbra a ir mucho más limpia, (ya que no tiene tanto material impropio de envases), por el contrario la fracción resto acostumbra a ser un residuo producido en los municipios de forma muy aleatoria, y por tanto la cantidad de rechazo que contiene es mucho más elevada.

- **Fase 2. Línea de Residuos Voluminosos**

Por esta primera línea del proceso, solo pasará la fracción de resto de RSU, como se comentaba en la fase anterior. La fracción de resto de RSU, contiene mucho más rechazo, y se pueden llegar a encontrar residuos de un tamaño muy elevado que puedan llegar a atascar el resto de equipos.

En esta línea, se trabaja de forma manual y todo el material que se obtiene de materiales voluminosos, irá directamente al depósito controlado, o será tratado en plantas de residuos voluminosos ajenas a la planta de selección, dependiendo la autorización que tenga cada planta.

- **Fase 3. Selección Granulométrica**

Una vez la fracción de resto pasa el primer corte de selección de residuos voluminosos, entrarán en un primer *trommel* (cilindro de maya con distintas oberturas de varios centímetros, que va girando sobre su eje, y los residuos de menor tamaño van cayendo por las diferentes ranuras).

En este primer *trommel* debe separarse toda aquella materia de menor tamaño, que en su mayor parte corresponde a la fracción orgánica que hay en los residuos urbanos, y el resto de residuos seguirán en el proceso de selección de la planta. Toda esta fracción orgánica que se ha separado en el primer *trommel* se llevará, a partir de otras cintas hacia la planta de compostaje, o a una planta externa para ser tratada, tal y como se puede apreciar en la *figura 3-1*, intentando eliminar la mayor cantidad de partículas que no sean orgánicas para que el proceso de compostaje sea lo más efectivo posible.

Una vez que la fracción orgánica es separada del proceso, entraríamos en un segundo *trommel*. Este segundo equipo sería la primera fase para los envases ligeros, es decir, en el momento en que se procesan los envases ligeros, entrarían a través de cintas, iniciando su selección por este segundo *trommel*, mientras que la fracción de resto de RSU ya habría pasado por las anteriores fases.

En algunas plantas con equipos más modernos, estos dos *trommel* pueden encontrarse en uno solo, haciendo la función de ambos con diferentes aberturas y, además, con una longitud de equipo mucho más elevada. Esto

haría que cualquiera de las dos fracciones empezara el recorrido dentro de la planta en este punto, y a medida que los residuos van avanzando en el *trommel*, las aberturas de caída se irían aumentando y, por tanto, separándose primero la fracción orgánica y posteriormente, el resto de residuos separables.

Así, una vez los materiales salen de este equipo, tenemos dos líneas con diferente material según el diámetro de éste. Por un lado se obtiene por la línea con un mayor diámetro de abertura, el papel y cartón, las bolsas de plástico (PEBD) entre otros, y por el de menor diámetro el resto de plásticos reciclables.



Figura 3-2. Vista frontal de un trommel en funcionamiento para la separación granulométrica.

Fuente: istock [8]

- Fase 4. Selección Manual y por Aspiración

Por la línea de materiales con mayor diámetro, tenemos una zona de selección manual en la cual, el personal cualificado se encarga de separar tanto el papel y cartón, como el PEBD, (es decir las bolsas de plástico y embalajes), y los va depositando en sus respectivos *trojels* para su posterior embalado.

Además de esta primera línea, que se separa de forma manual, tenemos en diferentes puntos de ambas líneas, zonas de aspiración para poder obtener una mayor separación de PEBD. Eso dependerá de los recursos y la disposición de cada planta.

Cabe destacar que, para el caso de la fracción de envases ligeros prácticamente la fracción de papel y cartón que se recupera es nula, al igual que para la fracción de Resto de RSU, el PEBD, dado que se encuentra en un estado de mucha suciedad, y no acostumbra a poder ser aspirado y, en consecuencia, no tiende a poder recuperarse de forma adecuada.

- **Fase 5. Mecanismo Abrebolsas**

Este equipo es clave a la hora de la buena recuperación de material. Eso es debido a la necesidad de tener un mecanismo automático que sea capaz de hacer aperturas en las bolsas de residuos, para que todo el material caiga en línea, y que en los equipos automáticos de selección caiga cada material por separado. Dado que una bolsa podría contener material de diferentes clases de plástico, por ejemplo PET y PEAD, y haría que la separación automática no fuera eficaz.

- **Fase 6. Selección Densimétrica**

La siguiente selección se realiza con un separador balístico. Básicamente la separación es sencilla, se separan los materiales rodantes (fracción pesada), de los planos (fracción ligera) a partir de un juego de densidad del material, en el que el material o cae por su propio peso a una línea, o se va elevando dentro del equipo hasta la otra línea.

Entre los rodantes, encontraríamos todos los plásticos, los materiales férricos y por tanto todos aquellos materiales con interés en recuperar y seleccionar. Por el contrario los planos se dirigirán hacia el depósito controlado, o en caso que hubiera posibilidad a la preparación del CSR. “En el caso de las plantas que trabajaremos en la aplicación, irán directamente al depósito controlado”.

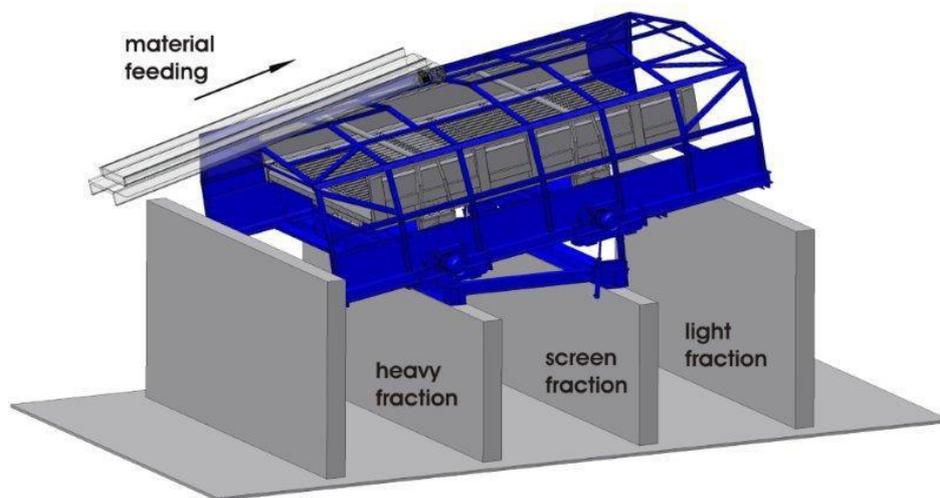


Figura 3-3. Estructura de un separador balístico.

Fuente: Direct Industry [9].

- **Fase 7. Selección del material férrico**

Una vez el material se encuentra en la salida de los materiales rodantes, estos pasan por una serie de electroimanes que son capaces de seleccionar todo el acero o material férrico que pasa por esa misma línea.

En algunas plantas, se pueden encontrar equipos que recuperan también los envases metálicos no férricos, como es el caso del aluminio, pero depende la tecnología y los equipos de que dispongan.

Una vez seleccionados, éstos son enviados a prensas específicas para materiales férricos donde se fabrican un tipo de balas de material prensado, distintas a las del resto de materiales debido a su composición, como se verá en la fase 9.

- Fase 8. Selección de material por Separación Óptica.

Una vez llegados a este punto, disponemos de una línea con una cantidad de material mucho más reducida, debido a todos los procesos por los que ha pasado el material, desde una primera separación de la fracción orgánica, seleccionado gran parte del papel y cartón y, por otro lado del PEBD, y por último, reducido la cantidad de elementos no rodantes y de material férrico. Por tanto, se dispone de una línea en la que es mucho más sencilla la selección de los elementos plásticos según su composición y propiedades.

Antiguamente este proceso era realizado de forma manual, desde el proceso de apertura de bolsas hasta esta posterior selección. Gracias a los avances tecnológicos, actualmente se disponen de diferentes formas para poder separarlos, una de ellas es a partir de los separadores ópticos.

Estos separadores a partir de la luz que penetra dentro de cada material, y de la configuración establecida en cada equipo, separan cada material y lo depositan en sus respectivos *trojels*, tal y como se observa en la *figura 3-4*, para su posterior prensado. Así, se dispone de una separación de las diferentes clases de plástico, PET, PEAD, Brick, y el plástico Mixto para el resto de plásticos. Este último material no acostumbra a encontrarse en la fracción de resto de residuos urbanos.

El resto de materiales que no sean seleccionados en ninguna de estas categorías, se enviarían directamente a los depósitos controlados.



Figura 3-4. Funcionamiento de un separador óptico.

Fuente: Residuos Profesional [10]

- Fase 9. Prensado de balas

Esta última fase, consiste básicamente en la preparación de todo el material recuperado para su salida a plantas de reciclaje para poder reciclarlo, y obtener nueva materia prima. Este proceso, al igual que pasaba con el material férrico, tiene que ser prensado en balas.

Para ello, todos los materiales depositados en los *trojel* se van enviando paulatinamente a la prensa de envases. Aquí, se procesan con una densidad de bala siempre similar entre ellas determinada por *Ecoembes* [5], para que puedan ser cargadas y enviadas.



Figura 3-5. Ejemplo de diferentes balas de plástico listas para su envío.

Fuente: Mancomunidad de Pamplona.

Este proceso de nueve fases, variará según cada planta de selección, dado que puede haber equipos que no estén situados igual, o que podamos encontrar equipos más novedosos para poder recuperar una mayor cantidad de material, o incluso material que anteriormente no podía llegar a ser recuperado.

Al igual que en todos los procesos manuales que se han ido presentando, dependiendo de la cantidad de personal que haya, la formación que tengan y la situación para poder seleccionar en que se encuentren, el proceso podrá ser más eficiente o menos.

A pesar de ello, el proceso general es prácticamente el mismo en todas ellas, y por ese motivo es interesante poder realizar una comparativa exhaustiva entre diferentes plantas de selección.

Como última reflexión dentro de este apartado, cabe destacar que todo el material impropio para cualquiera de los dos modos de funcionamiento que el propio sistema no ha sido capaz de seleccionar, será directamente enviado a depósitos controlados. Por este motivo es muy importante conseguir una eficiencia máxima dentro de estas plantas de selección, para que el porcentaje de material valorizable que vaya a los vertederos sea el mínimo posible.

3.2 Estudios de Eficiencia en Plantas de Selección de Residuos

En la actualidad, los datos bibliográficos que podemos encontrar para plantas de selección de residuos centran su foco de investigación en tres vertientes.

- Estudios relacionados con mejoras en áreas de compostaje. *Colón et al. (2017)*, *Castrillon et al. (2010)* y *Wei et al. (2017)*, entre otros, analizan diferentes plantas de compostaje, incluidas dentro de plantas de selección de residuos, centrándose en las diferentes maneras de tratar este compostaje, basados en los tratamientos biológicos aerobios de este tipo de residuos, y como controlar los efectos que provocan a nivel ambiental, desde la contaminación odorífera que estos provocan, la producción de lixiviados que deben de ser tratados, entre otros factores. En estos estudios, también se analizan cuáles son las salidas que puede tener el compost, un material que hasta la fecha ha tenido una salida al mercado no muy sencilla debido a su procedencia.
- Estudios asociados a las diferentes opciones que hay a la hora de la eliminación del rechazo que se envía en grandes cantidades a los depósitos controlados. Una de estas opciones es la incineración de estos residuos, que podemos ver en *Chen et al. (2012)* donde hace una comparativa entre la incineración en empresa pública y privada.
- Estudios de la eficiencia de las plantas, relacionada con los equipos de selección que se utilizan. Tal y como se ha comentado en el apartado anterior, el hecho de tener personal cualificado y una tecnología más actual puede influir en la eficiencia. *Gundupalli et al. (2017)* analiza esta cuestión teniendo en cuenta los automatismos para mejorar los rendimientos de las plantas. En *Robert et al. (2017)* por su parte, evalúan la selección manual de estos residuos, y el impacto que pueden tener los cambios en cada estación de selección, en este caso a partir de datos de plantas de Polonia.

Cabe destacar el número de investigaciones en las que la medición de la eficiencia se realiza mediante modelos DEA. Ejemplos como el de *Albores et al (2016)*, aunque en este caso relacionado con las emisiones que estas plantas envían a la atmosfera. Por otro lado, también relacionados con emisiones entre diferentes regiones de diferentes países, se pueden encontrar para Italia en *Sarra et al. (2017)* o China en *Fan et al. (2017)*.

Una vez realizado un primer acercamiento al problema del análisis del buen funcionamiento de plantas de selección de residuos, se puede apreciar que los estudios actuales centran sus investigaciones en temas relacionados con las emisiones, con el de abordar todos los rechazos tanto por valorización energética en la incineración, como con depósitos controlados, o con el compostaje para poder obtener un mayor rendimiento

de este. Por tanto, podemos afirmar que hasta ahora no se ha abordado de forma adecuada el paso inicial por donde todos estos residuos tienen la obligación de ser procesados y clasificados, sino que se están tratando temas de un nivel posterior, una vez ya estos residuos se encuentran ya seleccionados.

Sin embargo, se aprecia que es de vital importancia el hecho de obtener la mayor eficiencia en este tipo de plantas para la clasificación de los materiales, y además, el hecho de poder mejorar su eficiencia, podría ayudar en la mejora del resto de investigaciones, dado que reduciría por un lado la cantidad de rechazos, obtendríamos una mejor separación de la fracción orgánica, incluso para las emisiones al medio sería beneficioso.

Tal y como se ha ido comentando, cada planta es diferente debido a la tecnología de que disponga, a la cantidad de personal formado que tenga a su disposición, a la antigüedad de los equipos, a la cantidad de toneladas que tenga que procesar, entre otros muchos factores que hacen que los porcentajes de recuperación varíen entre ellos. Por ese motivo creemos que sería de gran interés conseguir que las plantas puedan compararse entre ellas, analizando sus puntos fuertes y débiles y, con ello, poder obtener una eficiencia lo más alta posible con los recursos que disponen.

Debido a la dificultad de realizar comparativas entre plantas para obtener resultados de eficiencia, creemos que un análisis DEA puede darnos unos datos muy relevantes para intentar ver realmente si una planta está trabajando de forma adecuada, o si debería enfocar sus recursos para la obtención de una mayor recuperación.

¿Qué conseguimos con ello? El mero hecho de poder recuperar la mayor cantidad de material dentro de una planta de selección, conseguiría que la cantidad de toneladas que se tuvieran que incinerar o llevar a depósitos controlados sea inferior, reduciendo en parte todos los aspectos negativos que se generan, desde emisiones a la atmósfera, como impacto ambiental, ... Supondría elevar la cantidad de material que se llevaría a las plantas de reciclaje, y por tanto reduciría el uso de materia prima con sus respectivas consecuencias a nivel medioambiental y económico. Incluso a nivel social, el hecho que se aprecie una buena selección de material recuperado, puede concienciar a la gente a separar mejor todo residuo urbano.

Por todos estos motivos, se puede considerar que, a pesar que actualmente los esfuerzos sean en el último escalón de la cadena, una vez todos estos materiales ya han sido clasificados, poder realizar una mejora dentro del sistema a nivel intermedio, podría ayudar de tal forma que podamos conseguir unos resultados más eficientes, tanto para que el proceso de las plantas de selección sea mejor, como para reducir cantidades finales de rechazo que tanto preocupan en la actualidad.

Por último, cómo se ha visto durante este apartado, al no haber ningún estudio en concreto para medir eficiencias de plantas de selección, y conociendo el funcionamiento de las plantas de selección que trabaja con dos modos de funcionamiento, uno para procesar el RSU y otro para el de la línea de Envases Ligeros, el modelo de estudio que se utilizará será un DEA con múltiples modos de funcionamiento, que además utilice el tiempo empleado en cada uno de estos modos.

3.3 Modelos DEA con varios Modos de Funcionamiento

DEA (*Data Envelopment Analysis*) es una técnica no paramétrica que evalúa la eficiencia relativa de unidades homogéneas conocidas como DMUs (*Decision Making Units*) Cooper et al. (2006). Los modelos convencionales estudian la eficiencia de estas DMUs como unas cajas negras, en las que se produce la transformación de recursos o *inputs* en productos o *outputs*, tal y como se aprecia en la figura 3-6. Para ello, es necesario que para cada unidad productiva que entre en la comparativa tengan los mismos recursos y productos.



Figura 3-6. DMU con entradas y salidas.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de estos modelos, se han desarrollado un gran número de investigaciones en los que abren la caja negra, y las dividen en subunidades, usualmente conocidas como sub-DMUs. Estos modelos, son usualmente conocidos como Network DEA. Algunas referencias importantes sobre este tema son: Färe et al. (2007), Kao et al. (2008), Chen et al. (2009), Tone et al. (2009), Fukuyama et al. (2010), Lozano (2011)-(2015)-(2016), Mirdehghan et al. (2016), etc.

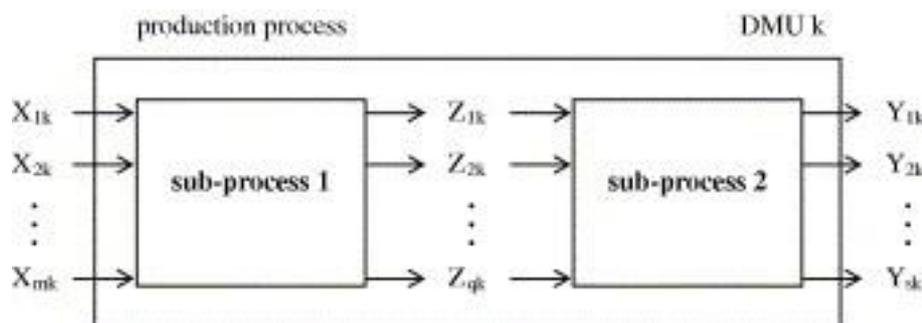


Figura 3-7. Ejemplo de Network DEA.

Fuente: Kao et al. (2008).

Para nuestro caso de estudio, un Network DEA convencional no sería adecuado, ya que en los modelos clásicos, los procesos o subDMUs que componen la unidad productiva, pueden ser activados simultáneamente. En el anterior apartado, sin embargo, al analizar el funcionamiento de las plantas de selección, comprobábamos que las sub-unidades de las que estaban compuestos funcionan de forma alterna, y nunca

conjuntamente.

Lozano y Villa (2016) proponen un modelo DEA que considera a cada sub-DMU como un Modo de funcionamiento (MF), cada uno de ellos con un consumo de recursos y generación de productos diferentes. La gran diferencia que tiene este modelo con los modelos Network, es que los procesos se ejecutan en una base de tiempo compartido. Por tanto, el desarrollo no sólo calcula la eficiencia de cada MF, sino que además determina el tiempo estimado para cada uno de ellos.

Para presentar cual es la estructura del DEA con varios modos de funcionamiento, seguiremos la figura 3-8 correspondiente al artículo de Lozano y Villa (2016), en la que se pueden ver representados un modelo elemental DEA, y el modelo que interesa para nuestro caso de MMF.

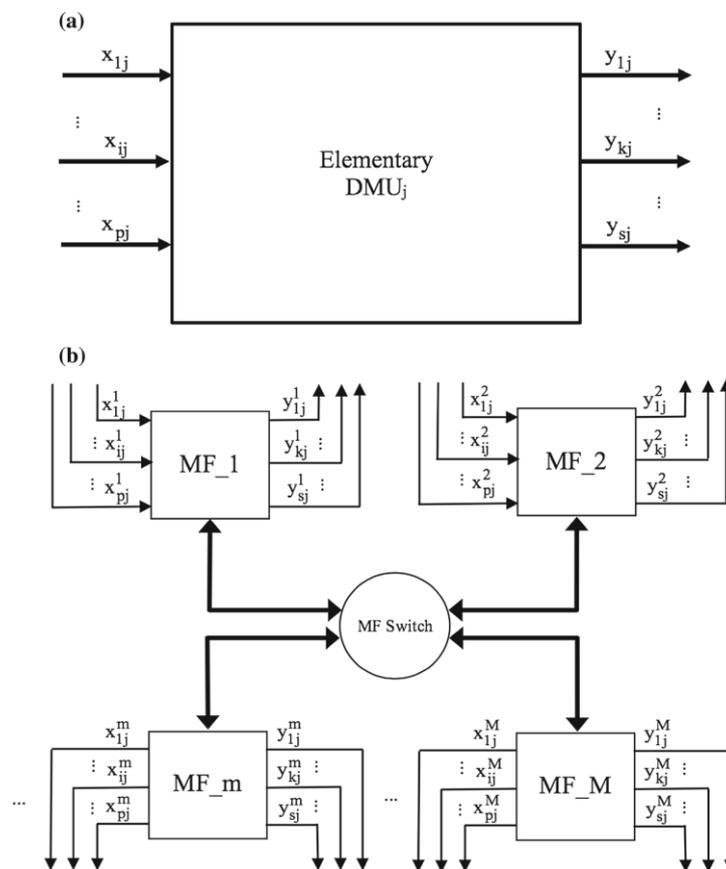


Figura 3-8. Sistema de Múltiples Modos de Funcionamiento. a) Modelo Elemental; b) Modelo MMF propuesto

Fuente: Lozano y Villa (2016).

El sistema que se presenta de MMF puede operar en M modos de funcionamiento diferentes. A su vez, hay una cantidad D de DMUs, y cada DMU j consiste en una cantidad de *inputs* consumidos $x_j^m = \left(x_{ij}^m \right)$, de *outputs* producidos $y_j^m = \left(y_{kj}^m \right)$ y la fracción de tiempo t_j^m correspondiente a cada MF m. Los índices de anotación, i y k son empleados para los inputs y outputs. Además, se asume que cada MF consume los mismos

inputs $i \in I$ y produce los mismos outputs $k \in O$.

Tal y como se aprecia en la *figura 3-8b*, muestra una representación gráfica de una DMU j , en la que cada MF está representado por una caja denominada "MF_#". Comparándolo con la *figura 3-8a*, que corresponde a un modelo DEA convencional, (conocido como modelo elemental en *Castelli et al. 2010*) en la que considera, cada sistema como una caja negra, ignorando su característica de MMF. Este modelo elemental DMU j

consume todos los inputs MF $x_{ij} = \sum_{m=1}^M x_{ij}^m$ y produce todos los outputs MF $y_{kj} = \sum_{m=1}^M y_{kj}^m$. Para poder

comparar las cantidades totales de inputs y outputs en estos modelos elementales DMUs, han de ser el

resultado de la operación del sistema para un determinado tiempo $T \geq \sum_{m=1}^M t_j^m \quad \forall j$. Se asume que cada

DMU j tiene un tiempo ocioso correspondiente a la diferencia de tiempo $T - \sum_{m=1}^M t_j^m$.

Una vez se determina el funcionamiento de producción de los MMF, se evalúa la eficiencia para MMF formulándolo a partir de modelo DEA elemental ignorando la estructura MMF.

Así:

\hat{x}_i cantidad objetivo de los input i para DMU 0

\hat{y}_k cantidad objetivo de los output k para DMU 0

$(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ variables de intensidad para combinar linealmente las DMUs observadas

s_i^- holgura para los input i

s_k^+ holgura para los output k

g_i^x constante de normalización para las holguras de los input i

g_k^y constante de normalización para las holguras de los output k

Modelo DMU Elemental (EM)

$$SBI_0^{EM} = \text{Max} \left(\frac{1}{|I|} \sum_{i \in I} \frac{s_i^-}{g_i^x} + \frac{1}{|O|} \sum_{k \in O} \frac{s_k^+}{g_k^y} \right) \quad (3-1a)$$

s.t.

$$\sum_j \lambda_j x_{ij} = \hat{x}_i \quad \forall i \quad (3-1b)$$

$$\hat{x}_i = x_{i0} - s_i^- \quad \forall i \quad (3-1c)$$

$$\sum_j \lambda_j y_{kj} = \hat{y}_k \quad \forall k \quad (3-1d)$$

$$\hat{y}_k = y_{k0} + s_k^+ \quad \forall k \quad (3-1e)$$

$$\sum_j \lambda_j = 1 \quad (3-1f)$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad \forall j \quad s_i^-, s_k^+ \geq 0 \quad \forall i \forall k \quad (3-1g)$$

La función objetivo, corresponde a la maximización del sumatorio de los input normalizados y las holguras de los outputs (que reflejan la existencia de ineficiencias en las dimensiones correspondientes). Por tanto, DMU 0 será considerada eficiente si $SBI_0^{EM} = 0$, cuánto más grande sea el valor de SBI_0^{EM} mayor ineficiencia de la DMU.

A partir de este enfoque convencional, la estructura interna de MMF de las DMUs puede ser llevada a cabo, y se proponen dos tipos de MMF DEA. El primero, llamado MMF1, la DMU 0 está proyectada a la frontera eficiente T_{eff}^{MMF} , pero manteniendo la fracción de tiempo en que cada sistema opera en cada tipo de MFs. El segundo modelo, llamado MMF2, el modelo busca los puntos eficientes operacionales del sistema con una mejor asignación del tiempo para cada MFs.

Así:

\hat{x}_i^m cantidad objetivo de los input i para MF m en DMU 0

\hat{y}_k^m cantidad objetivo de los output k para MF m en DMU 0

$(\lambda_j^1, \lambda_j^2, \dots, \lambda_j^M)$ variables de intensidad para combinar linealmente los MFs de las DMUs observadas
(j=1,2,..n)

Modelo MMF1 Propuesto

$$SBI_0^{MMF1} = \text{Max} \left(\frac{1}{|I|} \sum_{i \in I} \frac{s_i^-}{g_i^x} + \frac{1}{|O|} \sum_{k \in O} \frac{s_k^+}{g_k^y} \right) \quad (3-2a)$$

s.t.

$$\sum_j \lambda_j^m \frac{x_{ij}^m}{t_j^m} = \hat{x}_i^m \quad \forall i \forall m \quad (3-2b)$$

$$\hat{x}_i = \sum_m \hat{x}_i^m = \sum_m x_{i0}^m - s_i^- \quad \forall i \in I \quad (3-2c)$$

$$\sum_j \lambda_j^m \frac{y_{kj}^m}{t_j^m} = \hat{y}_k^m \quad \forall k \forall m \quad (3-2d)$$

$$\hat{y}_k = \sum_m \hat{y}_k^m = \sum_m y_{k0}^m + s_k^+ \quad \forall k \quad (3-2e)$$

$$\sum_j \lambda_j^m = t_0^m \quad \forall m \quad (3-2f)$$

$$\lambda_j^m \geq 0 \quad \forall m \forall j \quad s_i^-, s_k^+ \geq 0 \quad \forall i \forall k \quad (3-2g)$$

Como puntos a tener en cuenta para este primer modelo MMF1, las variables de intensidad λ_j^m representan la fracción de tiempo que el sistema debería operar como DMU j para el MF m . Por lo tanto, el objetivo resulta de replicar los puntos de operación de las DMU observadas para ese MF, usando la asignación de tiempo dada por λ_j^m . Al igual que sucede en los modelos DEA convencionales, solamente los puntos eficientes pueden ser usados como puntos de referencia en la combinación de líneas óptimas que definen los puntos objetivos de cada MF.

Así, el modelo MMF1 consigue la eficiencia de una DMU eliminando las ineficiencias en los diferentes MFs, pero manteniendo siempre el tiempo estimado. No obstante, si el tiempo asignado no es óptimo, existe una ineficiencia de tiempo que hay que valorar en cada MFs que puede ser eliminada, se conseguiría transformando esta variable de tiempo, en una variable que el propio modelo la determine. Esto es lo que ocurre en el MMF2 que se obtiene a partir del MMF1:

α^m fracción de tiempo objetivo a la que cada punto debería estar operando empleando MF m

Y reemplazando (2f) por:

$$\sum_j \lambda_j^m = \alpha^m \quad \forall m \quad (3-3a)$$

$$\sum_m \alpha^m = \sum_m t_0^m \quad (3-3b)$$

$$\alpha^m \geq 0 \quad \forall m \quad (3-3c)$$

Como el modelo MMF2, es el modelo MMF1 con condiciones menos restrictivas, todas las soluciones admisibles de MMF1 también lo son en MMF2. Esto significa que $SBI_0^{MMF2} \geq SBI_0^{MMF1}$. Es decir, el modelo MMF2 es más discriminante que el modelo MMF1.

La expresión (3-3b) implica, que aunque el tiempo sea asignado en los diferentes MFs, el tiempo total operacional tiene que ser igual al observado para DMU 0.

4 MODELO DEA PARA PLANTAS DE SELECCIÓN DE RESIDUOS

En este apartado, se particularizan los modelos MMF-DEA de *Lozano y Villa (2016)* para el caso de plantas de selección en España.

Tal y como se ha visto en el punto anterior, las plantas de selección pueden trabajar tanto con la fracción de envases ligeros, como con la fracción de resto de RSU, aunque sin embargo, algunas plantas llegan a procesar ambos residuos en sus mismas instalaciones, tal y como se indica en *GBB [7]*, debido a las nuevas normativas establecidas. Por lo tanto, durante el funcionamiento de estas plantas, se pueden trabajar en dos modos de funcionamiento diferentes, y en cualquier instante cambiar de uno al otro a partir de pequeñas variaciones del sistema.

Así, para nuestro caso:

1. **MF1: Fracción “Resto de RSU” - RSU**
2. **MF2: Fracción “Envases ligeros” - EELL**

Por tanto, se puede definir que es la misma planta la que toma la decisión de emplear uno u otro modelo de funcionamiento con la intención de optimizar al máximo el proceso, y ser capaz de recuperar todo el material posible y, a consecuencia de este hecho, el tiempo empleado en cada uno de ellos afectará en la eficiencia de la planta.

Para el caso que nos ocupa, la definición de la **variable temporal** (es decir, tiempo en el que se está ejecutando cada modo de funcionamiento), dependerá de muchos factores. El más importante será la cantidad de material que se recibe de cada uno de los tipos de residuos, ya que si la cantidad de entrada de material de un tipo es muy baja, el tiempo en procesarlo será mucho menor que el del otro tipo de residuo que tiene mayor cantidad. Hecho que afectaría en la cantidad de material recuperado y, a su vez, en la eficiencia del procesado por cada modo de funcionamiento.

El primer paso para analizar la eficiencia de cualquier proceso, es definir las variables de entrada y de salida que afectarán en el análisis de la eficiencia.

Por un lado, las **variables de salida**, tal y como se ha visto en el punto 3.1.2. *Materiales Valorizables*, se identifican con los materiales que se recuperan en ambos modos de funcionamiento:

Tabla 4-1. Variables de Salida para el modelo DEA en plantas de selección de residuos.

Variables de Salida	Variables	Unidades
S1	PET	Tn.
S2	PEAD	Tn.
S3	BRICK	Tn.
S4	Acero	Tn.
S5	P/C - Papel y Cartón	Tn.
S6	PEBD	Tn.
S7	MIX	Tn.

Estos materiales son los que representan un mayor porcentaje del producto total dentro de las plantas de selección, en la mayoría de los casos.

A su vez, algunas de estas variables pueden ser nulas para alguno de los modos de funcionamiento, dado que la cantidad que se recupera de ese material es despreciable. Éste es el caso del papel y cartón en el MF2 o el de mix de plásticos y PEBD para el MF1 (ya que son productos que no acostumbran a tener presencia en dicho tipo de contenedores).

Cabe destacar que en este trabajo, consideraremos iguales los materiales obtenidos independientemente del modo de funcionamiento en el que hayan sido generados. Por lo tanto, no se tendrá en cuenta que los materiales que se obtienen en el modo de EELL acostumbran a ser de mayor calidad, debido a que este material llega a las plantas en un estado mucho mejor que el que se recupera en la fracción de RSU (ya que el contenedor de RSU acostumbra a tener más variedad de productos, incluido material orgánico que ensucia al resto y por tanto, le hace perder valor).

Respecto a las **variables de entrada**, se considerarán las cantidades en peso de residuos que llegan mensualmente a la planta de cada tipo de residuo (EELL y RSU), dado que esta variable es diferente según el mes, y de su valor dependerá directamente el valor de los productos recuperados.

Además, se podrían considerar otras variables de entrada que fuesen recursos del proceso como la energía consumida, la superficie de la planta, el número de años que llevan las instalaciones en el mismo estado, etc. Sin embargo, estas variables realmente no afectan al rendimiento de las plantas ya que no proporcionan unos valores significativos de comparación entre ellas: piénsese el caso en el que una planta más antigua en años y con una superficie muy inferior en m², procese menos cantidad de residuos, es decir, su caudal sea muy inferior al resto, y por tanto, el material entre en la planta más limpio (debido a que entrará más espaciado en tiempo), y en porcentaje recupere más cantidad de residuos. Estos parámetros, no determinarían unos resultados fiables. Para el caso de la energía, puede llegar a ser muy difícil determinar en qué casos afecta, dado que plantas más modernas que disponen de más equipos de tratamiento de residuos gastarán mucha más energía, y por tanto deberían de recuperar más cantidad de material, pero por otro lado, si tal y como sucedía en el ejemplo anterior, una planta procesa con menos equipos y más personal cualificado, con unos intervalos de tiempos más espaciados, podría llegar a tener mayor eficiencia. Por estos motivos, no vamos a tener en cuenta estas variables como posibles entradas de nuestro caso de estudio.

Existe, sin embargo, una variable de entrada determinante que aún no ha sido contemplada: el personal. El número de trabajadores de la planta, sí que puede afectar en la necesidad de poder obtener mayor eficiencia, dado que por ejemplo, no sería lo mismo tener tres personas dedicadas exclusivamente a recoger papel y cartón que una sola, y por tanto es un factor que puede determinar la eficiencia de la planta. Cabe destacar que la variable de personal será igual para ambos modos de funcionamiento, ya que no se puede distinguir en qué momento trabajan en un modo determinado.

Por tanto, las variables de entrada escogidas para las plantas de selección serían las siguientes:

Tabla 4-2. Variables de Entrada para el modelo DEA en plantas de selección de residuos.

Variables de Entrada	Variables	Unidades
E1	Material Tratado	Tn.
E2	Número de empleados	Un.

El material tratado en ambos casos, es una variable medida en Toneladas de material, y debe considerarse diferente entre el tratado en EELL al del RSU. La segunda variable de entrada, corresponde a la cantidad de trabajadores estipulados para cada una de las plantas.

De esta forma, nos quedaría un modelo DEA como el que podemos observar en la siguiente figura, con dos variables de entrada y siete de salida para dos modos de funcionamiento.

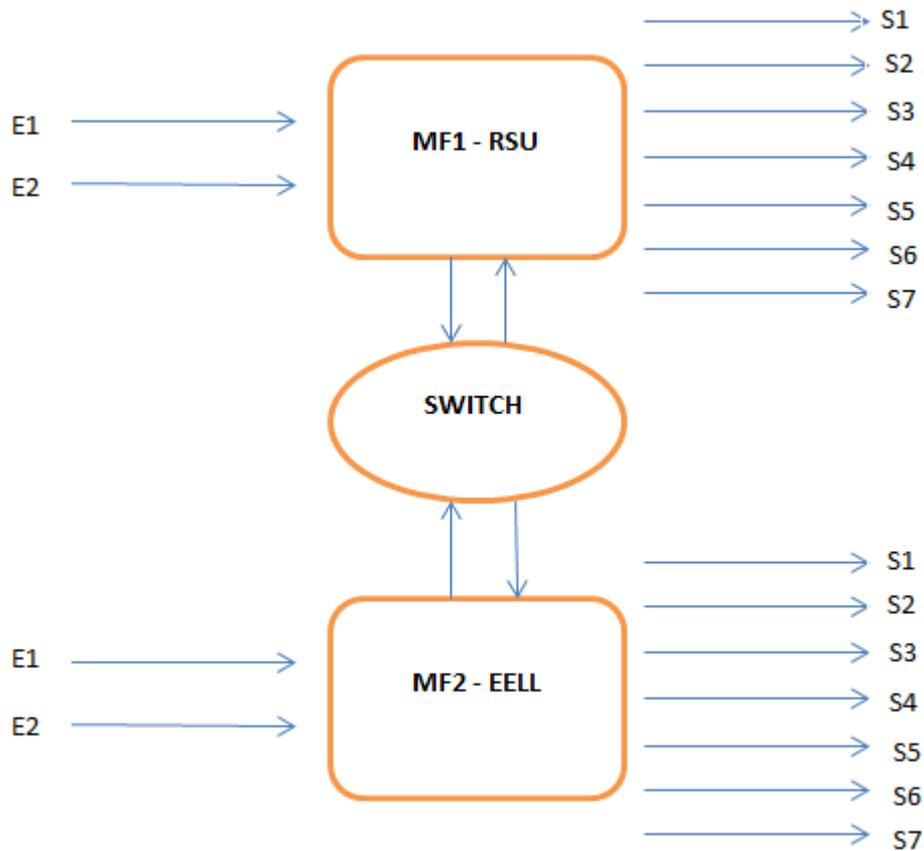


Figura 4-1. Esquema del modelo DEA para plantas de selección de residuos.

Fuente: Elaboración propia

Tal y como se observa, tenemos dos modos de funcionamiento con un “interruptor”, que posibilita la selección de un MF en cualquier momento. Este botón, nos dará unos tiempos estipulados para cada uno de los modos de funcionamiento, teniendo en cuenta que tiene que ser capaz de pasar por planta todo el material de entrada de ambos tipos de residuos, y obtener el mayor rendimiento entradas/salidas.

4.1 Modelo Matemático

Para la realización de este estudio, se considerarán cinco plantas Españolas MRF_j que pertenecen a una gran compañía de Servicios que dispone de plantas alrededor del estado.

Por un lado, las variables de entrada E1 se separarán entre las del material tratado en el MF1 y las del MF2.

RW_j Residuos de RSU procesados mensualmente cuando MRF_j funciona en MF1 (medido en toneladas).

PW_j Residuos de EELL procesados mensualmente cuando MRF_j funciona en MF2 (medido en toneladas).

Por otro lado tendremos una variable de entrada compartida E2:

LAB_j^m Personal empleado en MRF_j cuando funciona en $m=MF1, MF2$ (medido en equivalente a tiempo

trabajado, FTE).

Y por último tendremos las variables de salida:

Y_{kj}^m Cantidad de producto k =PET, PEAD, BRICK, PEBD, P/C, Acero y MIX, que se obtiene mensualmente por MRFj en el modo m =MF1, MF2 (medido en toneladas).

A partir de estas variables, primero se establecerá tal y como se realiza en *Lozano y Villa (2016)* el Modelo Elemental, para posteriormente, realizar los modelos MMF1 y MMF2.

4.1.1 Modelo Elemental

En este primer modelo no hay diferencias entre si el MRF se emplea en MF1 o MF2. Además, se realizará de tal forma, que las variables de entrada y de salida serán la suma de los dos MF. Esto no se hará para las variables de personal, en el que se ha empleado un promedio ponderado de variables LAB para MF1 y para MF2, usando como ponderación el tiempo empleado en cada modo de funcionamiento.

Así quedarían las siguientes ecuaciones:

(l_1, l_2, \dots, l_n) Variables de intensidad

s_k Holgas de los output k producidos por la DMU 0

Función Objetivo

$$\text{Max } \sum_k \frac{s_k}{\text{AVG}_k} \quad (4-1a)$$

s.a.

$$\sum_j \lambda_j \text{RW}_j^{\text{MF1}} \leq \text{RW}_0^{\text{MF1}} \quad (4-1b)$$

$$\sum_j \lambda_j \text{PW}_j^{\text{MF2}} \leq \text{PW}_0^{\text{MF2}} \quad (4-1c)$$

$$\sum_j \lambda_j \text{LAB}_j \leq \text{LAB}_0 \quad (4-1d)$$

$$\sum_j \lambda_j y_{kj} = y_{k0} + s_k \quad \forall k \quad (4-1e)$$

$$\sum_j \lambda_j = 1 \quad (4-1f)$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad \forall j \quad (4-1g)$$

$$AVG_k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{kj} = \frac{1}{n} \left(\sum_{j=1}^n y_{kj}^{MF1} + \sum_{j=1}^n y_{kj}^{MF2} \right) \quad (4-1h)$$

Así la FO para el modelo Elemental recaerá en la maximización de las holguras de los outputs, que tal y como se comentaba en el estado del arte, reflejan la existencia de ineficiencias con los datos actuales, en función de las cantidades de producto que produce cada planta, teniendo en cuenta ese mismo producto para todas las plantas, y por cada uno de los outputs (4-1h).

4.1.2 Modelo MMF1

Para la realización del modelo DEA MMF1, cabe destacar tal y como hemos visto en el estado del arte, que el factor diferencial es la asignación del tiempo t_j^m en que está operando cada uno de los MF. Para este modo este valor estará fijado.

$(\lambda_1^{MF1}, \lambda_2^{MF1}, \dots, \lambda_n^{MF1})$ variables de intensidad para el modo MF1

$(\lambda_1^{MF2}, \lambda_2^{MF2}, \dots, \lambda_n^{MF2})$ variables de intensidad para el modo MF2

Así:

Función Objetivo

$$\text{Max} \sum_k \frac{s_k}{AVG_k} \quad (4-2a)$$

s.a.

$$\sum_j \lambda_j^{\text{MF1}} \frac{\text{RW}_j}{t_j^{\text{MF1}}} \leq \text{RW}_0 \quad (4-2b)$$

$$\sum_j \lambda_j^{\text{MF2}} \frac{\text{PW}_j}{t_j^{\text{MF2}}} \leq \text{PW}_0 \quad (4-2c)$$

$$\sum_j \lambda_j^{\text{MF1}} \frac{\text{LAB}_j^{\text{MF1}}}{t_j^{\text{MF1}}} \leq \text{LAB}_0^{\text{MF1}} \quad (4-2d)$$

$$\sum_j \lambda_j^{\text{MF2}} \frac{\text{LAB}_j^{\text{MF2}}}{t_j^{\text{MF2}}} \leq \text{LAB}_0^{\text{MF2}} \quad (4-2e)$$

$$\sum_j \lambda_j^{\text{MF1}} \frac{y_{kj}^{\text{MF1}}}{t_j^{\text{MF1}}} = \hat{y}_k^{\text{MF1}} \quad \forall k \quad (4-2f)$$

$$\sum_j \lambda_j^{\text{MF2}} \frac{y_{kj}^{\text{MF2}}}{t_j^{\text{MF2}}} = \hat{y}_k^{\text{MF2}} \quad \forall k \quad (4-2g)$$

$$\hat{y}_k^{\text{MF1}} + \hat{y}_k^{\text{MF2}} = y_{k0}^{\text{MF1}} + y_{k0}^{\text{MF2}} + s_k \quad \forall k \quad (4-2h)$$

$$\sum_j \lambda_j^{\text{MF1}} = t_0^{\text{MF1}} \quad (4-2i)$$

$$\sum_j \lambda_j^{\text{MF2}} = t_0^{\text{MF2}} \quad (4-2j)$$

$$\lambda_j^{\text{MF1}}, \lambda_j^{\text{MF2}} \geq 0 \quad \forall j \quad (4-2k)$$

Para este modelo, se puede apreciar que todas las ecuaciones van determinadas según el valor de tiempo establecido para cada uno de los MF.

En este caso, las variables de intensidad λ_j^{MFm} representan el tiempo que el sistema debería operar como DMU para ese MF. Por tanto, el resultado resulta de ir aplicando los puntos de operación de cada DMU, para ese MF asignando el tiempo de la variable de intensidad.

A partir de este modelo, obtendremos unos resultados en los que veremos eliminadas las ineficiencias temporales pero, aún podemos encontrar casos en que el tiempo estimado no sea el óptimo, para que la propia DMU sea eficiente, por ello realizaremos también el modelo MMF2.

4.1.3 Modelo MMF2

El modelo DEA MMF2 coincide con el modelo MMF1 solo reemplazando las ecuaciones 4-2i y 4-2j por las siguientes:

α^{MF1} fracción de tiempo que DMU 0 tiene que estar en el modo MF1

α^{MF2} fracción de tiempo que DMU 0 tiene que estar en el modo MF2

$$\sum_j \lambda_j^{MF1} = \alpha^{MF1} \tag{4-3a}$$

$$\sum_j \lambda_j^{MF2} = \alpha^{MF2} \tag{4-3b}$$

$$\alpha^{MF1} + \alpha^{MF2} \leq t_0^{MF1} + t_0^{MF2} \tag{4-3c}$$

$$\alpha^{MF1}, \alpha^{MF2} \geq 0 \tag{4-3d}$$

Este modelo determina los tiempos óptimos de cada modo de funcionamiento, teniendo en cuenta que la suma podría incluso ser más pequeña que la usada en los datos.

Una vez realizado el estudio del modelo elegido, se realizará el modelaje y se analizarán los resultados obtenidos.

5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este apartado aplicaremos la metodología propuesta, para un total de 5 plantas de selección de residuos del territorio español. Los datos que se utilizarán serán mensuales, entre los meses de Enero y Agosto de 2016. En total se dispondrá de 36 DMUs para su estudio.

Los datos de este estudio se establecen en la *tabla 5-1*. Estos datos no se podrán mostrar debido a la Ley de Privacidad de Datos que tiene establecida la empresa. Por ello, se darán valores de la media, desviación estándar y valores mínimos y máximos, para cada una de las variables empleadas en el caso de estudio.

Tabla 5-1. Valores estadísticos mensuales de las 5 plantas de selección de residuos para los dos MF.

		E1-RW (tn.)	E1-PW (tn.)	E2-LAB (FTE)	S1-PET (tn.)	S2-PEAD (tn.)	S3-BRICK (tn.)	S4-ACERO (tn.)	S5-P/C (tn.)	S6-PEBD (tn.)	S7-MIX (tn.)	t1 (h)
MF1	V. Mínimo	3.190	-	32	26	6	0	17	27	-	-	121
	V. Máximo	14.650	-	215	138	48	55	248	273	-	-	327
	Media	8.100	-	75	72	25	23	98	116	-	-	237
	Desv. Estándar	3375,21	-	63,96	36,66	13,08	16,77	69,52	80,63	-	-	64,89

		E1-RW (tn.)	E1-PW (tn.)	E2-LAB (FTE)	S1-PET (tn.)	S2-PEAD (tn.)	S3-BRICK (tn.)	S4-ACERO (tn.)	S5-P/C (tn.)	S6-PEBD (tn.)	S7-MIX (tn.)	t1 (h)
MF2	V. Mínimo	-	67	32	12	4	2	5	-	6	0	40
	V. Máximo	-	559,53	215	135	52	65	73	-	82	36	271
	Media	-	245,66	75	49	20	20	28	-	31	15	118
	Desv. Estándar	-	164,51	63,96	35,26	16,26	16,45	20,66	-	22,86	10,49	79,61

Para la clasificación de cada planta, se establecerá un valor de la A a la E y la mensualidad, se dará con un valor numérico 1, 2, 3,... Por ejemplo, la DMU D4 se corresponderá a la planta D y al 4º mes considerado para el estudio.

En la *tabla 5-1* es apreciable destacar parámetros, ya comentados durante el proyecto, como por ejemplo para el MF1, no se recuperan materiales como el PEBD ni el MIX, o para el MF2 el P/C, debido a que son materiales que son prácticamente despreciables en dichos tipos de residuos.

Otro aspecto a destacar, es el de las cantidades con las que trabaja cada MF. Para el MF1 la cantidad de toneladas que entran se mueven en valores alrededor de las 3.000 y 15.000tn, por el contrario, el MF2 entre 50 y 600tn. Estas grandes diferencias son un aspecto que hay que destacarlo muchísimo, dado que el MF2 recupera un porcentaje de materiales mucho más elevado que el MF1, por tanto, la cantidad de material que se procesa para cada MF, es un aspecto muy a destacar a la hora de analizar los resultados. A pesar de ello, los tiempos empleados para los MF2 son, en comparación, mucho más elevados, por tanto habrá que analizarlo para cada MF por separado.

Una vez son conocidos los datos, se darán los resultados del modelo, tal y como se han ido exponiendo en los anteriores apartados. Se empezará por el EM, posteriormente el MMF1 y, por último, el MMF2. Los resultados, se obtienen a partir de los códigos para el programa “LingoV14” establecidos en los *Anexos*.

Modelo Elemental

Tabla 5-2. SBI y holuras de salida procesadas para el modelo elemental.

*Las DMU en **negrita** corresponden a las plantas eficientes.

DMU	SBI	S⁺ PET	S⁺ PEAD	S⁺ BRICK	S⁺ ACERO	S⁺ P/C	S⁺ PEBD	S⁺ MIX
A1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A5	0,39	6,25	0,00	0,00	8,30	0,00	7,65	0,33
A6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
A7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B4	1,31	8,75	0,31	0,00	0,00	9,19	14,73	9,82
B5	1,17	36,72	0,00	2,11	9,07	0,00	4,28	8,86

B6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
B8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
D1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
D2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
D3	0,70	13,02	6,90	6,14	3,65	6,98	2,43	1,86
D4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
D5	0,55	12,54	4,21	5,08	3,12	12,19	3,31	0,00
D6	0,86	13,71	5,01	16,21	2,07	0,00	7,62	0,00
D7	1,42	19,06	5,23	28,23	0,00	7,65	12,79	0,24
E1	1,97	29,81	12,61	0,00	0,00	0,00	19,84	11,67
E2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tal y como se aprecia en la *tabla 5-2* para el modelo elemental, 28 de las 36 DMU, más de un 75% de las mensualidades analizadas son eficientes. Destacando que la planta C es siempre eficiente, que las plantas A, B y E exceptuando en una o dos mensualidades son eficientes y, la única que empieza a dar evidencias que no será eficiente para ningún modelo es la planta D.

Además, se pueden apreciar que las ineficiencias para los materiales son bastante bajas, al igual que los SBI de ineficiencias. En el resto de modelos, se observará que los valores de ineficiencia son mucho más elevados. En este aspecto, cabe destacar que las ineficiencias son superiores para materiales como el PET y el PEBD.

Teniendo estos aspectos en cuenta, vemos que este modelo ofrece un panorama en el que pocas cosas se pueden mejorar, ya que la mayoría de mensualidades son eficientes, por tanto se empieza a

apreciar que este modelo no será un buen estudio de la eficiencia.

Modelo MMF1

Tabla 5-3. SBI y holguras de salida procesadas para el modelo MMF1.

*Las DMU en negrita corresponden a las plantas eficientes.

DMU	SBI	S ⁺ _{PET}	S ⁺ _{PEAD}	S ⁺ _{BRICK}	S ⁺ _{ACERO}	S ⁺ _{P/C}	S ⁺ _{PEBD}	S ⁺ _{MIX}
A1	1,76	20,39	8,81	9,61	64,13	76,93	0,00	0,00
A2	2,76	31,25	10,24	2,54	52,64	82,21	10,35	11,00
A3	2,00	28,83	10,68	13,57	54,21	90,37	0,00	0,00
A4	2,26	25,33	9,90	7,04	73,29	93,72	1,57	3,34
A5	2,66	27,57	7,61	12,26	84,78	95,76	6,30	3,99
A6	2,18	27,46	10,66	11,43	72,02	101,64	0,00	0,00
A7	2,11	21,45	8,52	18,97	44,78	99,67	2,76	0,00
B1	1,75	3,91	0,00	4,35	44,67	36,27	23,27	2,91
B2	2,18	1,88	0,00	1,91	47,29	54,34	36,73	1,25
B3	1,63	6,94	0,00	0,50	0,00	10,71	23,21	10,43
B4	2,14	11,66	0,00	2,91	11,71	1,37	39,70	8,52
B5	0,93	7,81	0,00	0,00	18,19	0,00	4,28	8,53
B6	2,00	29,30	0,00	15,04	2,24	84,35	5,12	7,36
B7	2,38	3,66	0,00	15,45	46,01	86,94	6,65	9,62
B8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C1	0,70	0,00	2,65	0,00	0,00	1,25	3,96	7,31
C2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C3	0,72	0,00	0,00	0,00	7,75	2,61	6,75	6,10
C4	0,58	0,00	0,00	0,00	7,08	0,00	9,02	3,41
C5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
C6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
D1	1,91	35,14	11,41	25,20	19,36	35,60	4,67	2,52
D2	1,22	22,49	7,16	18,80	19,45	33,54	0,00	0,00
D3	1,78	33,61	11,23	24,87	22,48	11,09	6,11	3,01
D4	0,11	0,01	0,00	0,19	3,66	0,00	2,34	0,00
D5	1,79	31,26	8,34	29,16	20,46	18,71	8,28	1,14
D6	1,84	27,97	7,70	27,65	21,87	6,51	10,22	3,45
D7	1,12	2,05	0,00	5,42	7,80	0,00	11,95	7,77
E1	2,63	23,15	7,77	13,20	0,00	39,07	31,51	8,77

E2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Para este segundo modelo, en el cual se tienen en cuenta los tiempos para cada modo de funcionamiento, ya se observa como la cantidad de plantas eficientes ha decrecido al 30%, dado que solo un total de 11 mensualidades no procesan ineficiencias en las salidas.

Este modelo tiene aspectos que son parecidos al modelo elemental. Seguimos viendo que la planta C es de las que más mensualidades eficientes obtiene, pero la planta E es la que realmente mantiene las mismas eficiencias que el modelo anterior. Por el contrario, el resto de plantas obtienen que la mayoría de sus mensualidades son ineficientes.

Por lo que concierne a la DBI, vemos que los valores de ineficiencia son más elevadas, sobre todo para plantas como A y B, mientras que para C son bastante pequeñas, con ello, se determina que la planta C está cerca de conseguir la eficiencia en la mayoría de meses.

Por último, para las ineficiencias de los materiales, vemos que se elevan a cantidades muy altas de P/C y de Acero. En este aspecto, cada planta tiene sus respectivas ineficiencias como analizaremos posteriormente.

Modelo MMF2

Tabla 5-4. SBI, fracciones de tiempo por MF y holguras de salida procesadas para el modelo MMF2.

*Las DMU en negrita corresponden a las plantas eficientes.

DMU	SBI	$\alpha_j^{MF1} - t_j^{MF1}$	$\alpha_j^{MF2} - t_j^{MF2}$	S⁺PET	S⁺PEAD	S⁺BRICK	S⁺ACERO	S⁺P/C	S⁺PEBD	S⁺MIX
A1	1,76	0,00	0,00	20,39	8,81	9,61	64,13	76,93	0,00	0,00
A2	2,78	-1,41	1,41	30,38	9,07	1,26	58,83	81,49	2,62	15,22
A3	2,12	3,38	-19,69	23,95	8,43	0,00	58,08	92,10	0,00	6,99
A4	2,43	8,92	-8,92	26,38	10,03	1,29	75,20	98,29	0,00	7,46
A5	2,85	9,22	-9,22	28,24	7,08	5,04	90,56	100,49	0,00	11,12
A6	2,18	0,00	0,00	27,46	10,66	11,43	72,02	101,64	0,00	0,00
A7	2,21	1,29	-16,20	16,63	6,06	7,24	50,40	100,34	0,00	7,31

B1	2,61	-44,67	8,73	0,00	0,23	4,23	87,30	115,78	7,72	8,27
B2	2,95	-42,22	17,07	0,00	0,00	11,81	82,99	130,88	21,01	2,99
B3	3,60	-65,27	-11,70	5,55	0,00	9,99	1,81	139,24	58,04	3,28
B4	3,44	-77,78	2,73	2,69	0,00	6,12	64,55	139,80	30,26	8,49
B5	2,76	-95,06	11,24	24,97	0,00	5,92	70,80	123,81	8,61	7,36
B6	2,62	-57,68	-0,88	24,09	0,00	11,80	37,50	132,13	5,24	7,92
B7	3,19	-27,42	-0,84	0,00	0,00	18,98	74,67	152,53	5,44	9,70
B8	0,00									
C1	2,35	-31,97	14,66	0,99	2,32	0,00	33,48	41,53	20,19	14,79
C2	0,00									
C3	0,81	-32,42	-4,14	0,00	0,00	6,14	1,72	13,87	3,57	6,10
C4	0,64	-26,94	-2,99	0,00	0,00	7,96	0,00	7,16	6,15	2,89
C5	1,54	-86,41	11,50	0,00	0,86	20,67	0,00	46,83	1,10	8,90
C6	0,00									
D1	2,30	-5,83	-56,16	28,06	8,95	23,91	25,23	37,26	6,37	8,58
D2	1,85	0,05	-98,96	13,87	4,20	18,15	29,20	33,57	5,69	7,50
D3	2,25	-17,44	-57,23	23,96	8,36	27,22	26,26	16,05	7,73	9,32
D4	1,69	-32,59	-40,70	16,88	3,04	26,83	23,29	6,22	7,54	5,51
D5	2,12	-6,42	-46,22	24,58	5,95	27,11	25,78	20,53	8,86	7,10
D6	2,25	-23,06	-42,77	17,74	4,68	29,98	24,15	13,07	9,94	9,93
D7	2,62	-47,69	-5,82	10,81	1,21	33,68	18,57	22,64	13,34	13,91
E1	2,80	-1,54	-38,16	0,00	0,35	10,97	0,00	53,86	46,08	8,46
E2	1,14	0,00	-28,42	2,81	0,05	0,00	1,54	0,00	10,94	10,96
E3	0,00									
E4	0,00									
E5	0,00									
E6	0,00									
E7	0,00									
E8	0,00									

Para este último modelo MMF2, se establecen las fracciones de tiempo necesarias para llegar a ser eficientes con los parámetros (α^m-t^m) para cada MF, es decir, la diferencia entre el tiempo estimado para procesar cada modo de funcionamiento, con el tiempo empleado para ese mismo modo. Tal y como se comentaba en el estado del arte, este es el modelo más restrictivo de todos ellos, en el que

únicamente aparecen 9 mensualidades eficientes.

Para este último modelo, las SBI son aún más elevadas que en los anteriores, por tanto las DMU están aún más alejadas de la eficiencia. Además, se aprecian diferencias temporales para obtener las eficiencias muy elevadas, como por ejemplo en el MF2 para la planta B, o el MF1 para la planta D. A todo ello, la planta E se mantiene como la planta más eficiente de todas ellas.

Por lo que respecta a los materiales, el P/C se mantiene como el material que menos se recupera para llegar a ser eficiente, seguido por el acero.

Un breve resumen de los valores obtenidos en las tablas anteriores, se puede observar en la *figura 5-1*, en la cual se observa el porcentaje de mensualidades eficientes de cada planta. Tal y como se ha comentado, el modelo elemental ofrece un porcentaje muy elevado de eficiencias que contrasta con las de MF1 y MF2, que para las plantas A y D no llegan a la eficiencia para ninguna mensualidad. Además, se aprecia que la planta E es la que mejor está trabajando en la actualidad, teniendo en cuenta todos los modelos.

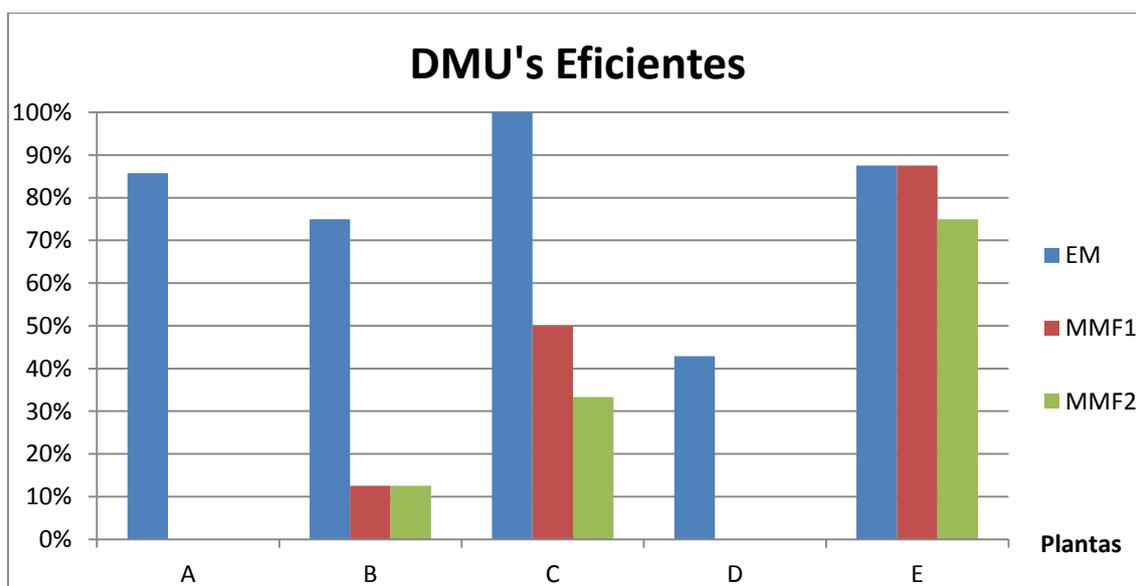
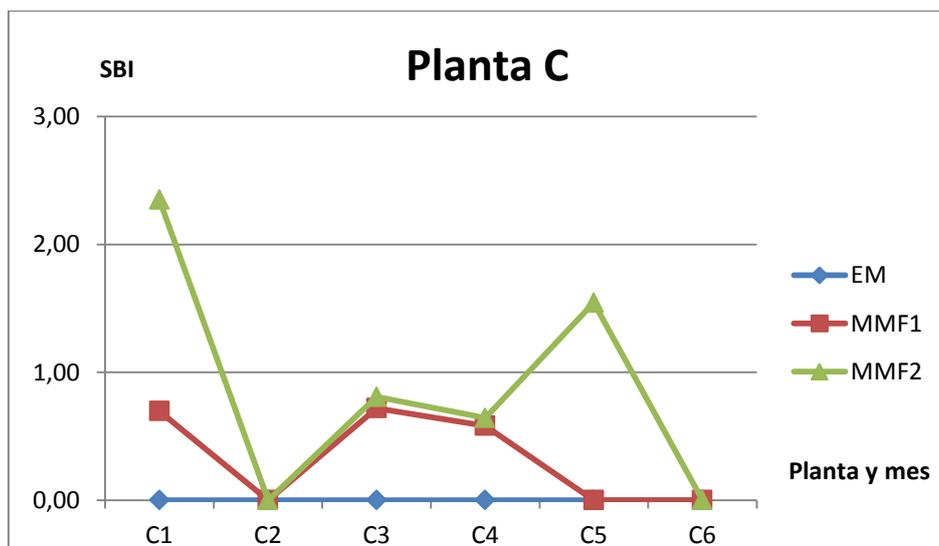
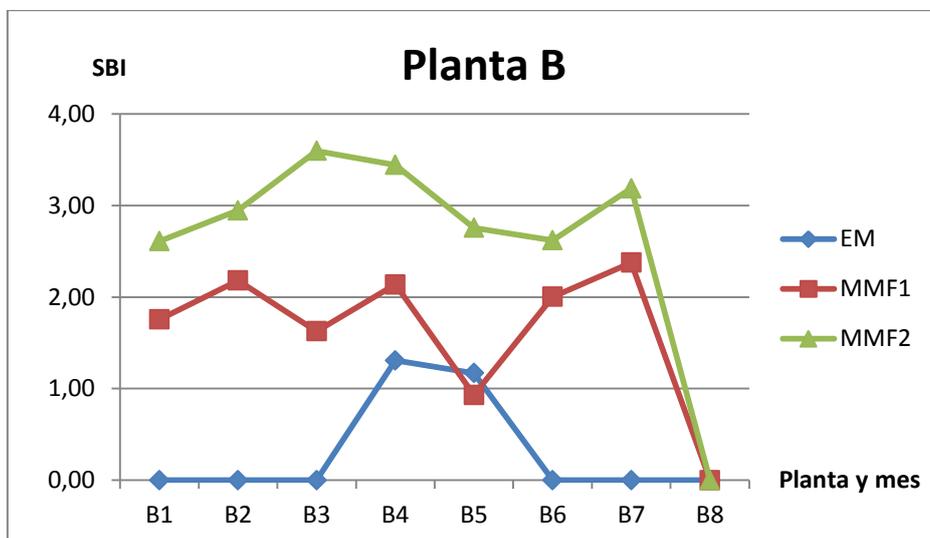
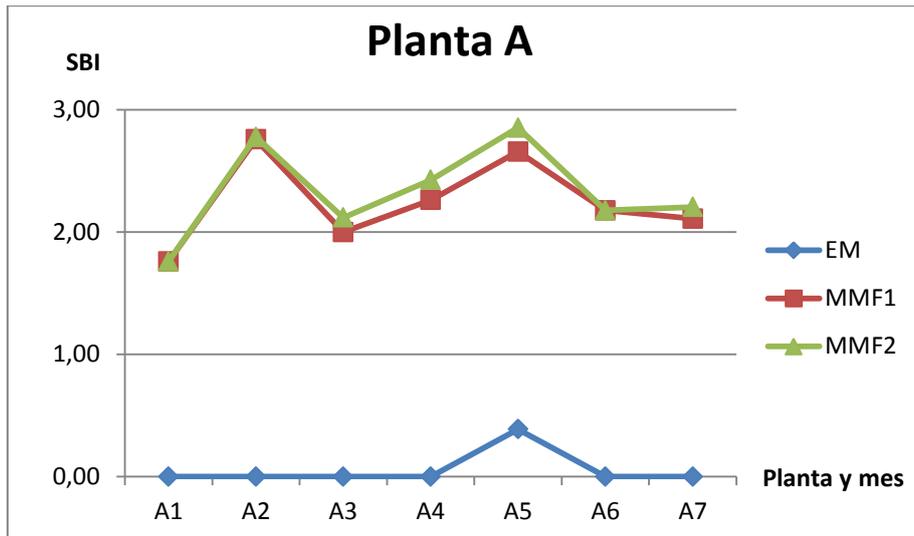


Figura 5-1. Porcentajes de DMU's eficientes para cada modelo por planta.

Antes de adentrarnos en profundidad en los resultados de cada planta, en la siguiente figura se puede ver una comparativa por planta de los resultados obtenidos para cada modelo. En ella, se pueden apreciar las diferencias de SBI observadas en las tablas anteriores, destacando que a mayor SBI, más alejado de la eficiencia estará esa DMU.



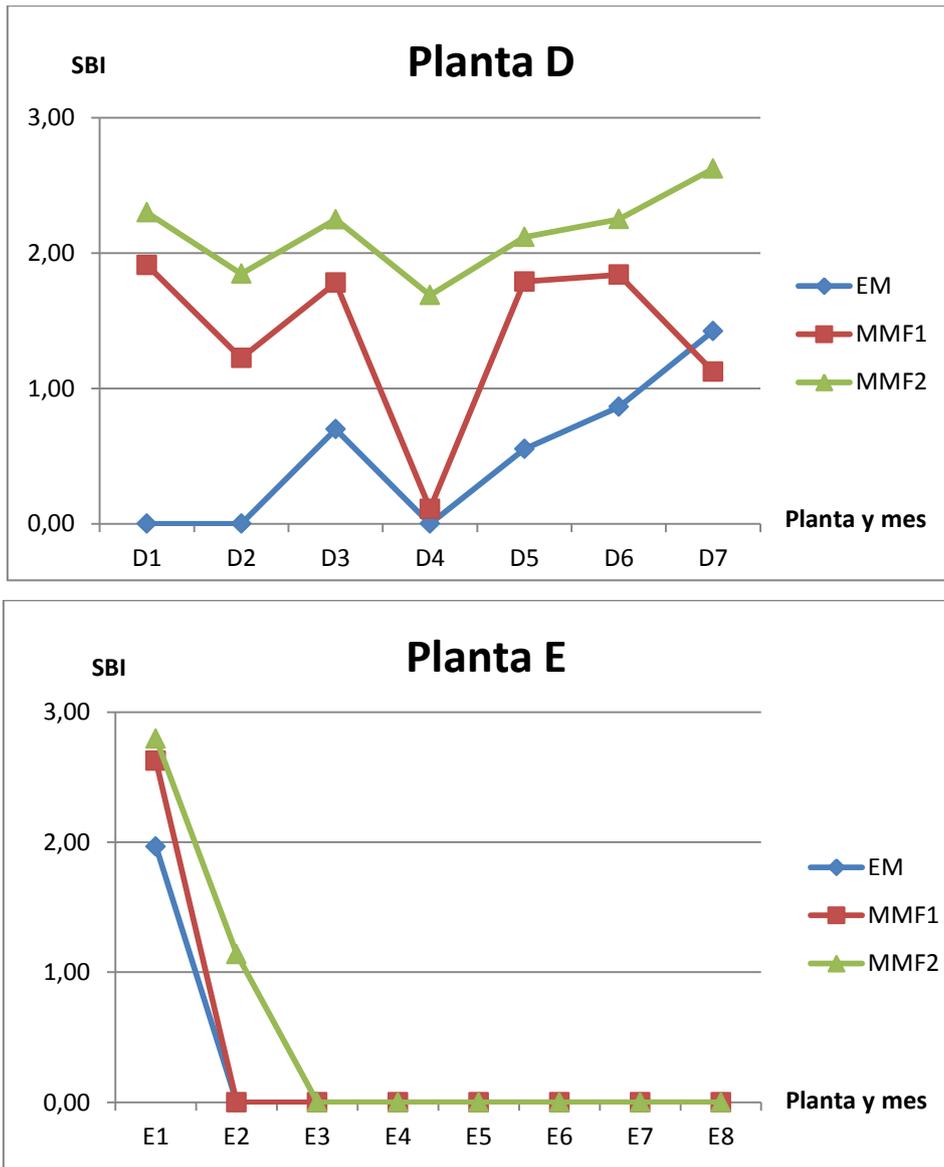


Figura 5-2. Gráficas de los resultados SBI para los modelos EM y MMF.

A simple vista, observando las gráficas, se aprecia que la planta E es la más eficiente de todas, al igual que se analizaba en la *figura 5-1*, ya que para todos los modelos hay al menos seis mensualidades que son eficientes. Resultados totalmente opuestos para la planta A, dado que siempre que se tiene en cuenta la variante temporal no tiene ningún punto eficiente, y la planta D, que le sucede algo bastante similar e incluso para el modelo elemental da resultados no eficientes.

A continuación, se analizará planta por planta sus resultados, comparando sus mensualidades, para posteriormente poder analizar los resultados entre ellas.

Para la planta A cabe destacar que es una de las plantas con menor capacidad, dado que la cantidad de toneladas de entrada es de las más bajas para cualquiera de los dos MF y, además, dispone de una cantidad de personal de los más reducidos. A su vez, tanto para el modelo MMF1 como MMF2, tiende a recuperar una cantidad de residuos muy por debajo de su eficiencia, pero por otro lado, los

tiempos estimados de operación que se observan en MMF2 no son tan desviados como para otras plantas ineficientes. Esta planta, realizó una modernización durante el año 2012 en la cual, el área de tratamiento de residuos se automatizó, hecho que verifica que el personal sea menor que en otras plantas y que los tiempos se acerquen a la eficiencia, conllevando a una recuperación de PEBD, PEAD, MIX y BRICK bastante equilibrada, dado que son recuperaciones automáticas, pero por el contrario destaca la gran ineficiencia en P/C, un proceso que se recupera de forma manual.

La planta B es un caso muy diferente al anterior. Esta planta de selección lleva desde principios de los años 2000 sin ninguna remodelación que pueda haber mejorado el rendimiento de la planta. Además, dispone de la menor cantidad de personal en comparación con el resto de plantas del estudio, y por el contrario, es la segunda que mayor cantidad de toneladas tiene que procesar. Si se analizan los datos, se aprecia una tendencia a la mejora en eficiencia de la planta, se han realizado varios cambios para focalizarse en recuperar mayores cantidades de PET y PEAD, poniendo más personal en estas áreas de recuperación, además de realizar mejoras para la recuperación automática de PEBD. Esto ha provocado que los tiempos estimados que se observan en la *tabla 5-4* para esta planta, se hayan ido estabilizando, y reduciendo con el tiempo de operación a medida que pasaban los meses. Se ha notado una notable mejora en la recuperación desde el mes 4 hasta el 8, a excepción del mes 7.

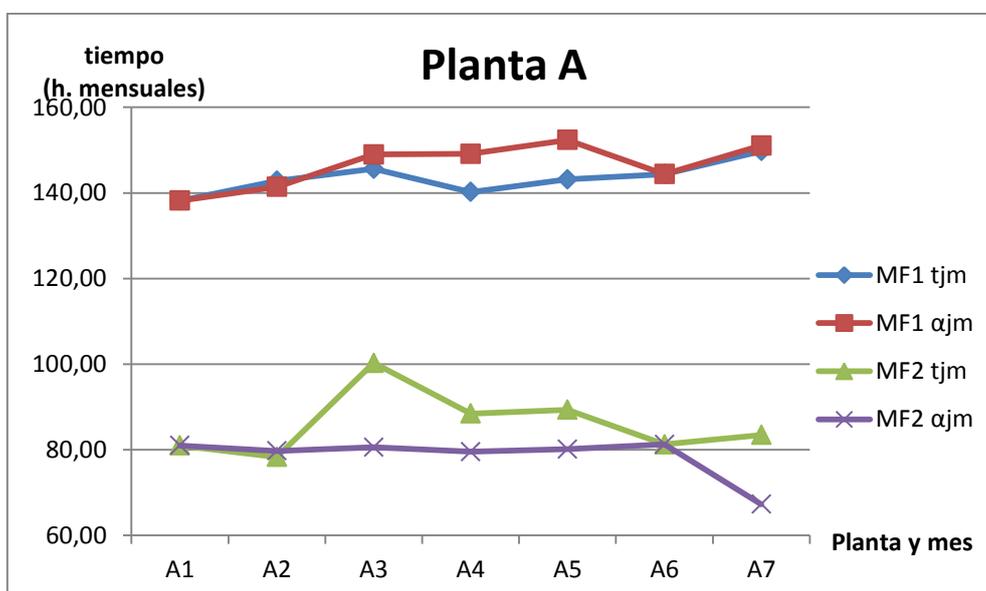
La planta C obtiene valores de eficiencia muy altos durante todas las mensualidades, y para todos los modelos de estudio. Por tanto, a primera vista se puede considerar que es una planta que está trabajando correctamente pero le falta pulir algunos detalles para mantener esta eficiencia. Durante el año 2010 se realizó una modernización de los equipos de triaje, con la intención de mejorar el rendimiento en la selección de materiales y, a su vez, se creó una nueva planta de subproductos plásticos para cualquiera de los dos MF, creando además nuevos puestos de trabajo. Por ello, actualmente dispone de una cantidad de personal más elevada que las plantas anteriores, y a su vez, recupera una mayor cantidad de material. Por otro lado, debido a las grandes diferencias entre las toneladas de entrada para cada MF, los tiempos que procesa cada uno de ellos son bastante ineficientes para algunas mensualidades, por ello, habría que ajustarlos. Para poder mantener esta eficiencia, los parámetros a mejorar serían la recogida por un lado de PEBD y de P/C, procesos que para la cantidad de personal que tienen deberían de focalizarse en mejorarlos.

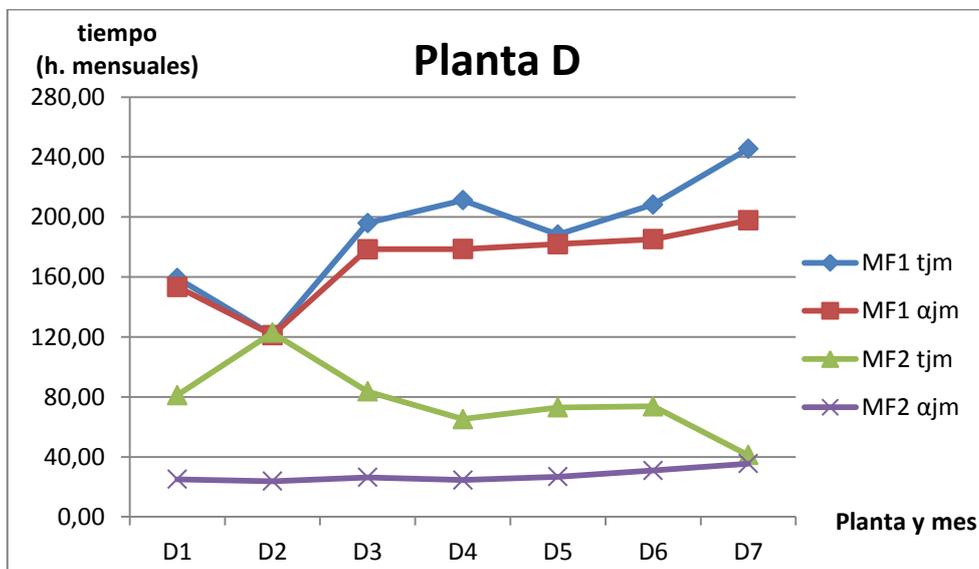
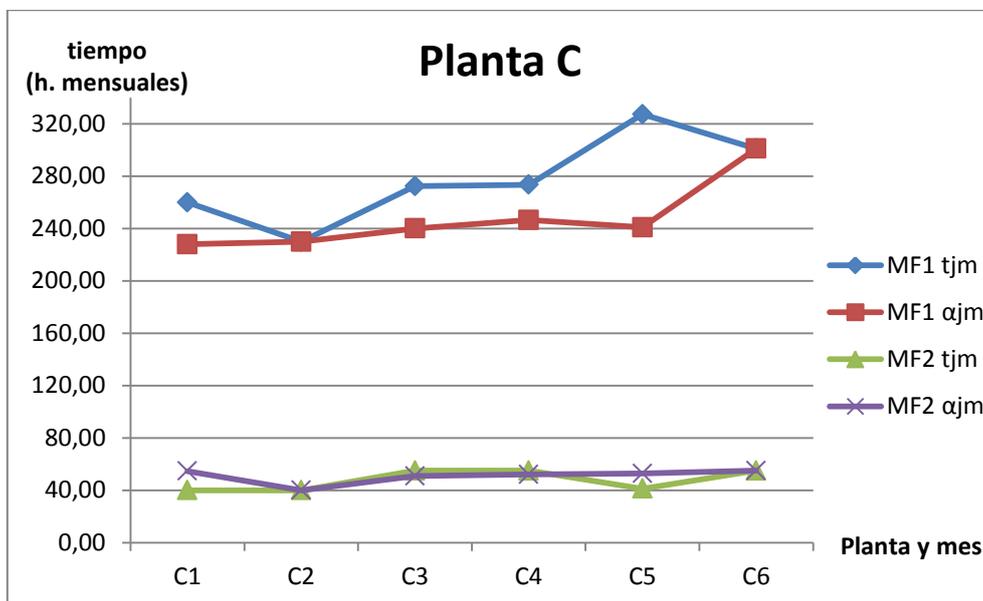
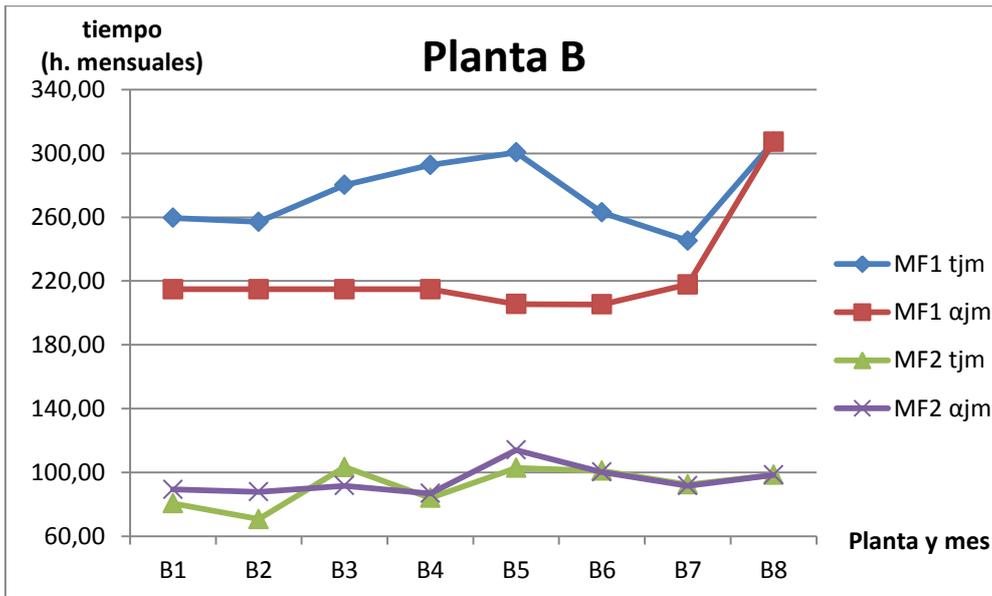
La planta D es una planta en la que sus recursos son bastante descompensados. Por un lado, es la planta que menos material tiene que procesar, pero a su vez, es la que mayor cantidad de personal tiene trabajando en ella. Esto es debido a que esta planta no está tan automatizada como el resto, y necesita una gran cantidad de personal para poder recuperar cada uno de los componentes. Analizando los resultados, se observa que ninguna mensualidad es eficiente, siempre y cuando se tenga en cuenta el tiempo de procesamiento. Destaca para el modelo MMF2, los tiempos para su eficiencia tendrían que ser menores a los que se están realizando, acentuado para el modo de envases

ligeros. A su vez, los resultados de recuperación vemos que están muy alejados a la eficiencia, sobre todo en componentes como Brick, que para el modo de funcionamiento de RSU no recuperan prácticamente nada y P/C, que se recupera de forma manual, y teniendo en cuenta la cantidad de personal que trabaja en la planta, es muy inferior a lo esperado. Cabe destacar, que al ser una planta que trata una cantidad muy inferior al resto, es más difícil poder recuperar más material dado que dependes de cómo se recicle en esa zona.

Por último, la planta E destaca por encima del resto. Esta planta sobresale debido a que es la que más cantidad de RSU procesa con diferencia, pero además para Envases Ligeros procesa prácticamente el doble que las demás, hecho que es muy relevante dado que en este modo de funcionamiento se acostumbra a recuperar un porcentaje mucho más elevado de material que en RSU, hecho que conlleva a que recupere una cantidad mayor que el resto. Los resultados para cada modelo hablan por sí solos, las primeras mensualidades son un poco peores, con indiferencias de tiempo en el modo de envases ligeros y recuperando cantidades inferiores de P/C y PEBD, pero a partir de ellas, se puede observar que la planta es la que mayor eficiencia tiene, y ha de continuar con el mismo modus operandi para mantenerse siempre en esta situación.

Estos datos se reafirman con las siguientes figuras para cada planta, en las cuáles se verán de forma más detallada las diferencias entre los tiempos reales del proceso t_j^m y los tiempos estimados α_j^m para conseguir la eficiencia, extraídos en el modelo MMF2 para cada MF.





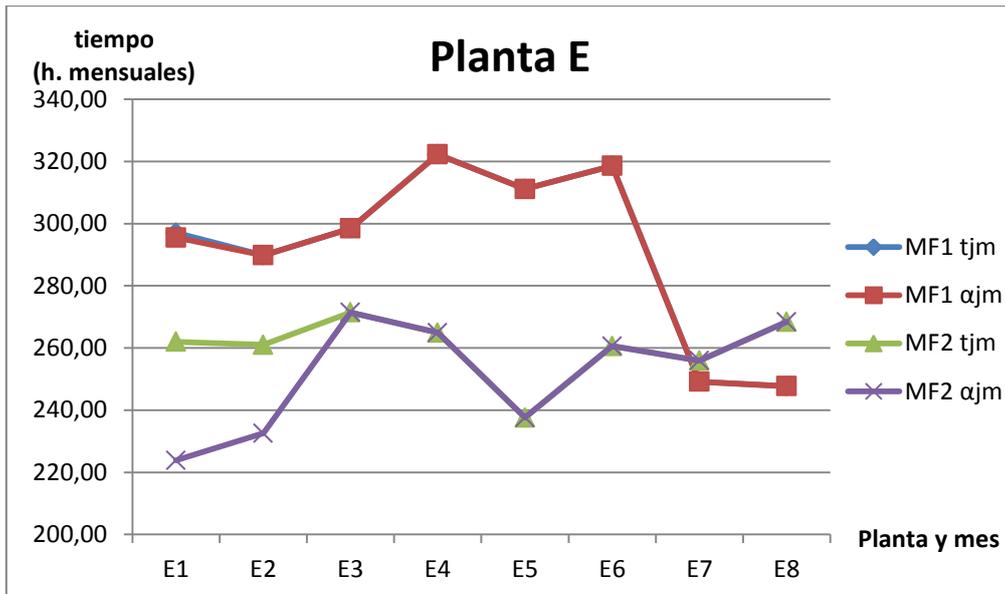


Figura 5-3. Gráficas de los resultados t_j^m frente α_j^m para los MF1 y MF2.

Estas gráficas, demuestran que las mayores diferencias se encuentran para las planta D en MF1 y para la planta B para MF2. Se puede considerar a nivel general, que la tendencia de todas las plantas es bastante positiva a nivel de tiempos, dado que a excepción de algún caso concreto, todas ellas se encuentran cada vez más cerca de los tiempos estimados a medida que transcurren las mensualidades, en la que la planta E es la que mejor trabaja. Esto nos lleva a una primera conclusión: las grandes ineficiencias pueden ser debidas más a la cantidad de material recuperado, que al tiempo en que se esté realizando este proceso.

Una vez analizadas cada planta por separado, es interesante poder observar las diferencias entre ellas, y realizar una comparación dentro de sus respectivas variables. Para ello, utilizaremos en exclusiva los modelos MMF1 y MMF2, ya que nos darán mejores resultados, más ajustados al sistema.

En la figura 13, se podrá observar la tendencia de la eficiencia de cada planta, en las diferentes mensualidades. Cuanto más alejado a la unidad, más ineficiente será esa mensualidad. Con ello, se ratifica la planta E como la más eficiente. La planta C, va teniendo mensualidades eficientes, y en comparación con el resto de plantas, sus valores ineficientes están más cercanos a la unidad, por ello es una planta que está trabajando de forma adecuada, pero necesita acabar de mantenerse.

Por otro lado, las plantas A, B y D sus valores acostumbran a ser mucho más ineficientes que los del resto. Hay meses que sirven como excepción, por ejemplo B8 o D4 que se acercan a la eficiencia, o incluso llegan a ser eficientes, pero habría que seguir viendo la evolución para saber si esta tendencia se mantiene.

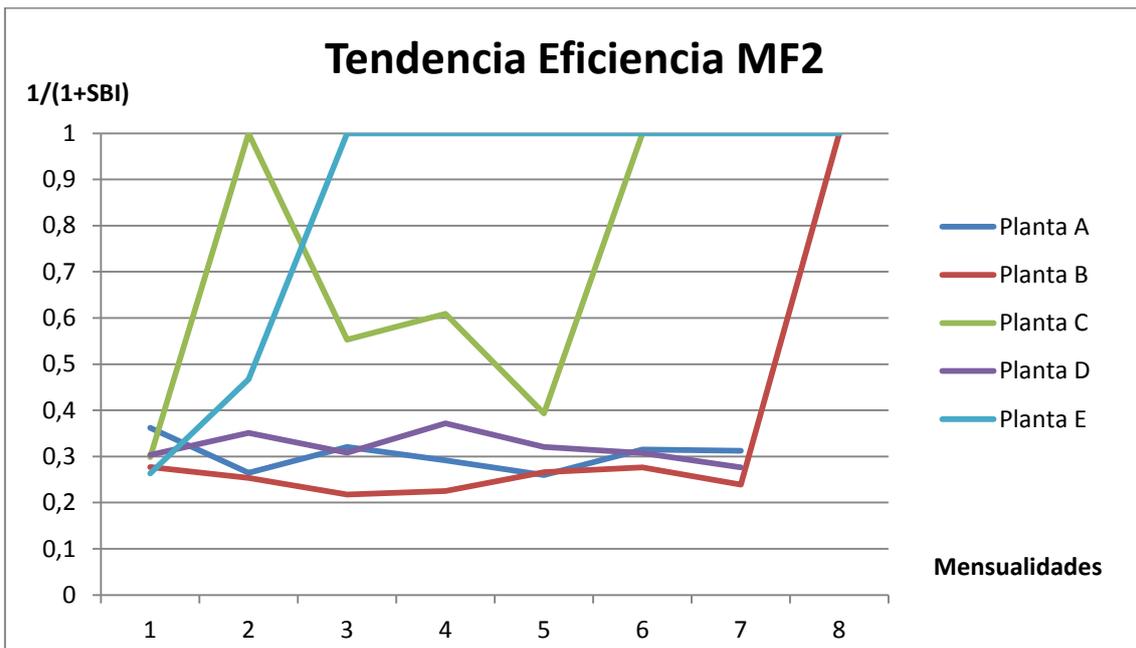
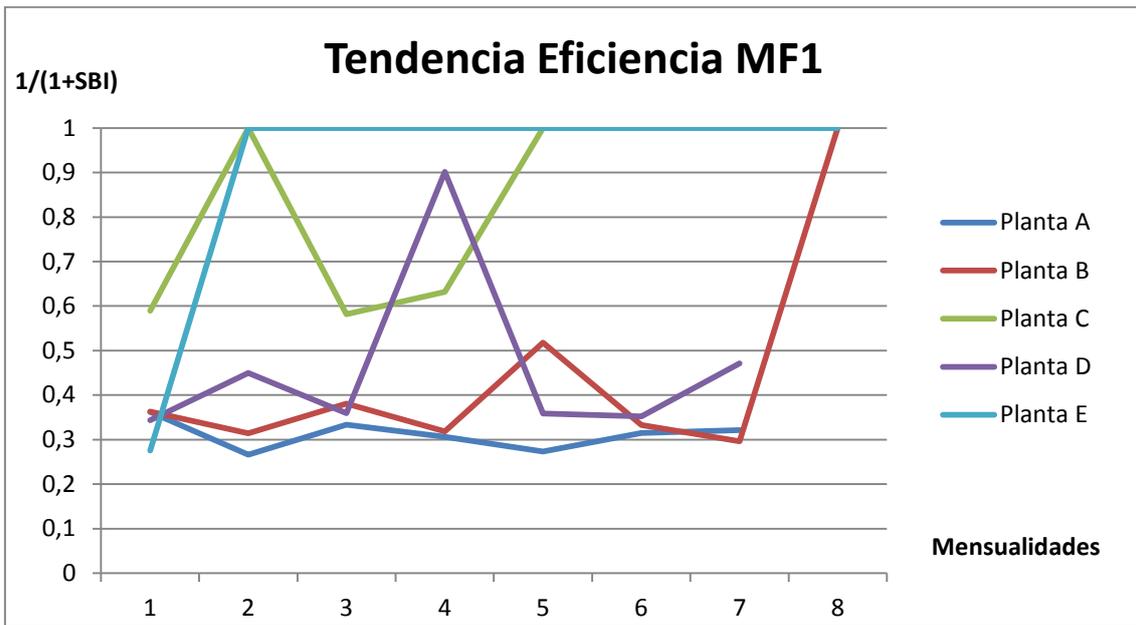


Figura 5-4. Gráficas de la tendencia de la eficiencia por planta.

Esta comparativa, nos demuestra lo comentado anteriormente, todas las plantas deben tomar espejo en la planta E dado que tiene eficiencia prácticamente en todas las mensualidades, y donde realmente se ve la diferencia es teniendo en cuenta los tiempos de procesamiento para MMF1 y MMF2, dado que el resto de plantas necesitan acabar de ajustar estos tiempos y, a partir de ese punto, trabajar con la mayor recuperación de material.

Uno de los mayores problemas es la cantidad de material de entrada, dado que las plantas que menos material reciben A y D, son las que mayores ineficiencias obtienen junto a B. Esto puede ser debido, a que cuanto menor es la cantidad de material, es más difícil recuperar un porcentaje mayor de los diferentes componentes, ya que depende de cómo se haya realizado la separación de residuos a nivel municipal. A pesar de ello, la planta C también recibe una cantidad bastante inferior a las otras dos plantas, y sí que obtiene resultados bastante aceptables. Esto puede ser debido a las infraestructuras a nivel de recuperación de plásticos, PET, PEAD,... de las que disponen, qué les hace recuperar una gran cantidad de material. La planta C sería una buena manera de reflejarse para A y D siempre y cuando tengan en cuenta una mejora de la recuperación de residuos manual, como es el P/C que la planta C no tiene bien desarrollada.

La planta B por su lado, tiene una base bastante aceptable para la situación en que se encuentra actualmente. Tiene ineficiencias en base a los tiempos de procesamiento, que poco a poco parece que van resolviendo, pero se tendrían que comparar con la planta E, dado que las variables de entrada son bastante parecidas, tanto para material tratado como personal. Centrándose en una pequeña mejora de la recuperación de PET, Brick y Acero, y por otro lado en la recuperación manual de P/C. Habría que realizar un breve estudio sobre cómo se está realizando la recuperación de este material en la planta E porque es la única que tiene unos resultados aceptables para este componente.

También cabe destacar, que la planta C tiene unas recuperaciones muy correctas, con pequeñas diferencias para poder llegar a su eficiencia, donde no se acaba de ajustar es en el tiempo de proceso para el MF1, dado que debería de conseguir los mismos resultados con un menor tiempo. Una reducción de este tiempo, podría conllevar a una menor recuperación, por tanto interesaría dar su foco de atención en el caudal de residuos que entra para RSU y trabajar con ello, para que no llegue a afectar a su recuperación. La planta A podría ser el espejo donde reflejarse para este caso.

Todas estas medidas, son opciones que las plantas deberían de tomar para poder conseguir la eficiencia y a partir de ella, seguir trabajando para mantenerla.

Para cerrar este apartado, se puede destacar que este análisis ha ayudado a establecer la importancia de los tiempos dentro de este proceso. Observando los resultados obtenidos con el modelo elemental, está claro que no se adecuaba a nuestro proceso, por tanto es clave destacar que el tiempo de uso de cada MF es el primer enfoque en el que tienen que trabajar las plantas, y tal y como se ha observado en la *figura 5-3*, la tendencia es muy positiva.

Por otro lado, los materiales recuperados son los que mayores ineficiencias crean en las plantas. Se observan ciertos materiales que tienen tendencia a ser ineficientes, como el P/C o el acero, por ello hay que crear acciones específicas para cada planta con la intención de ir mejorando y llegar a esa eficiencia deseada.

6 RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este TFM se ha medido la eficiencia de diferentes plantas de selección de residuos que tienen dos modos de funcionamiento, uno para RSU y otro para EELL, con la intención de garantizar un modelo de estudio que se adecúe correctamente con el proceso que se realiza en este tipo de plantas. Se realizó un estudio para elegir el tipo de modelo a realizar, el cuál finalmente fue un modelo DEA de múltiples modos de funcionamiento.

Este modelo elegido nos permitió realizar una comparativa entre el EM, un modelo que no tiene en cuenta la estructura interna de este tipo de plantas, y los modelos MMF1 y MMF2 que tienen en cuenta una asignación de tiempos para cada MF fija, o calculada respectivamente. Una de las primeras conclusiones que se pueden extraer con los resultados es que este modelo crea unos resultados más discriminantes, y a su vez, nos da una perspectiva mucho más real del funcionamiento de la planta.

Una vez analizado el estudio para las 5 plantas con sus diferentes mensualidades como DMU, se pueden extraer grandes conclusiones por el funcionamiento de ellas:

- La planta E tendría que ser la planta de referencia para el resto. Obteniendo prácticamente todas sus mensualidades eficientes, es la mejor planta del estudio.
- Con el MMF2 se aprecian los tiempos estimados para la eficiencia y se observa, que todas las plantas tienen una tendencia positiva, dado que a medida que pasan las mensualidades se acercan a estos tiempos estimados. A pesar de ello, plantas como la D para el MF2 o las plantas B y C para el MF1 tienen que seguir trabajando para intentar mantener estos tiempos más acorde a la necesidad. Esto se podría realizar haciendo estudios de los caudales de entrada del material para cada modo de funcionamiento, controlar las paradas de línea, estudiando la gestión del personal para poder tratar ese material durante el tiempo estipulado.

- Las mayores ineficiencias se pueden apreciar en la recuperación de materiales, destacando el P/C en la mayoría de plantas, una recuperación que se realiza manualmente por personal, por tanto, tendrían que realizar modificaciones en gestión de personal para su recuperación. Para el acero, plantas como A y B tienen unas ineficiencias muy elevadas, por tanto requeriría una inversión en este sentido, mejorando los equipos de selección de acero. Por último, es muy destacable para las plantas A y D la deficiencia en los diferentes plásticos, PET, PEAD y Brick, por ello requerirían un análisis exhaustivo de sus instalaciones de recuperación de plásticos, un proceso totalmente automático que tendría que revisarse.
- Se observa que las plantas que más material procesan, son las que consiguen tener más mensualidades eficientes, por el contrario cuanto menos material se procesa, es más difícil conseguir obtener eficiencia. Esto puede ser debido a la importancia del buen reciclaje a nivel municipal. A más material a procesar, se pueden obtener unas cantidades de todos los materiales aceptables, pero cuando procesas menos, no se llega a obtener esos resultados.

En general, podemos decir que el estudio con el modelo DEA de múltiples modos de funcionamiento, crea un modelo que se asemeja al proceso real, que es lo que más nos interesaba en el proyecto, y ayuda a ver las debilidades que tiene cada planta para poder crear áreas de mejora dentro de ellas. Está claro, que para llegar a conseguir un proceso más real, quizás se podría tener en cuenta, factores como el precio que se obtiene por cada material, que en muchos casos difiere según se recupere en un modo de funcionamiento u otro, podría mejorar en el estudio de la eficiencia de cada planta. A pesar de ello, en nuestro caso de estudio nos interesa la recuperación global de la planta, por ello no se ha creído necesario el estudio de estos objetos. Otra posible mejora para el estudio del caso, podría ser si se tuvieran en cuenta las posiciones de cada trabajador dentro de la planta, porque dependiendo sus funciones puede ser que afecten dentro de la eficiencia, pero no disponíamos de datos suficientes como para realizar un análisis tan completo.

Con el estudio realizado, se consigue adentrarse en la importancia de estas plantas. El mero hecho de obtener unas plantas totalmente eficientes, afectaría directamente a la cantidad de material que se envía a los depósitos controlados, que en muchos casos es material que puede llegar a ser reciclado, pero que no se selecciona correctamente. Por otro lado, provocaría que se reutilizaran y se enviaran a centros de reciclaje mayor cantidad de material, que conllevaría al reaprovechamiento de una mayor cantidad de materiales al mes. Un ejemplo del potencial de este estudio sería que para la planta D, para el mes 3, según MMF2, necesitaría recuperar un total de 79tn más de todos los materiales y, según MMF2, 119tn para llegar a ser eficiente. Hay que pensar que a nivel anual, se podrían obtener datos muy interesantes para mejorar los porcentajes de reciclaje que se están obteniendo a nivel

español actualmente.

Por último, es interesante remarcar la importancia que tiene para estas plantas de selección de residuos una buena separación a nivel urbano de estos residuos. Cómo se ha podido ir viendo, el proceso es bastante complejo y depende de muchos factores, por tanto, si se mejorara la separación en su base, posteriormente tanto a nivel humano como para las propias máquinas será más sencillo seleccionarlos. Si el material que llega a las plantas, tiene una gran cantidad de materiales impropios, esto conllevará a que el proceso sea más complejo, y la recuperación sea más dificultosa. Este hecho se puede observar con las plantas que recogen menos cantidad de residuos, que les es más difícil llegar a recuperar las cantidades de materiales suficientes para llegar a ser eficientes.

En conclusión, se ha obtenido un resultado que satisface los objetivos expuestos al inicio del trabajo. El modelo elegido ha mostrado unos resultados bastante lógicos para las diferentes plantas de selección de residuos estudiadas, y esto ha facilitado el análisis de resultados. Un análisis que ha conseguido dar con puntos clave en cada una de las plantas, para que puedan focalizarse y atacar esas ineficiencias y conseguir, en un futuro cercano, mantener su planta eficiente todas las mensualidades.

REFERENCIAS

Artículos

Albores, P., Petridis, K., & Dey, P. K. (2016). Analysing efficiency of waste to energy systems: using data envelopment analysis in municipal solid waste management. *Procedia Environmental Sciences*, 35, 265-278.

Antón, M. R. G., & Bercero, J. R. G. (1997). *Los plásticos y el tratamiento de sus residuos*. Universidad Nacional de Educación a Distancia.

Amirteimoori, A., Kordrostami, S., & Azizi, H. (2016). Additive models for network data envelopment analysis in the presence of shared resources. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 48, 411-424.

Bovea, M. D., Ibáñez-Forés, V., Gallardo, A., & Colomer-Mendoza, F. J. (2010). Environmental assessment of alternative municipal solid waste management strategies. A Spanish case study. *Waste Management*, 30(11), 2383-2395.

Castelli, L., Pesenti, R., & Ukovich, W. (2010). A classification of DEA models when the internal structure of the decision making units is considered. *Annals of Operations Research*, 173(1), 207-235.

Castrillón, L., Fernández-Nava, Y., Ulmanu, M., Anger, I., & Marañón, E. (2010). Physico-chemical and biological treatment of MSW landfill leachate. *Waste Management*, 30(2), 228-235.

Chen, Y., Cook, W. D., Li, N., & Zhu, J. (2009). Additive efficiency decomposition in two-stage DEA. *European Journal of Operational Research*, 196(3), 1170-1176.

Chen, Y., Du, J., Sherman, H. D., & Zhu, J. (2010). DEA model with shared resources and efficiency decomposition. *European Journal of Operational Research*, 207(1), 339-349.

Chen, Y. T., & Chen, C. C. (2012). The privatization effect of MSW incineration services by using data envelopment analysis. *Waste management*, 32(3), 595-602.

Colón, J., Ponsá, S., Álvarez, C., Vinot, M., Lafuente, F. J., Gabriel, D., & Sánchez, A. (2017). Analysis of MSW full-scale facilities based on anaerobic digestion and/or composting using respiration indices as performance indicators. *Bioresource technology*, 236, 87-96.

Cook, W. D., Hababou, M., & Tuentner, H. J. (2000). Multicomponent efficiency measurement and shared inputs in data envelopment analysis: an application to sales and service performance in bank branches. *Journal of productivity Analysis*, 14(3), 209-224.

- Cooper, W. W., Seiford, L. M., & Tone, K. (2006). *Introduction to data envelopment analysis and its uses: with DEA-solver software and references*. Springer Science & Business Media.
- Fan, Y., Bai, B., Qiao, Q., Kang, P., Zhang, Y., & Guo, J. (2017). Study on eco-efficiency of industrial parks in China based on data envelopment analysis. *Journal of environmental management*, *192*, 107-115.
- Färe, R., Grosskopf, S., & Whittaker, G. (2007). Network dea. In *Modeling data irregularities and structural complexities in data envelopment analysis* (pp. 209-240). Springer, Boston, MA.
- Fukuyama, H., & Weber, W. L. (2009). A directional slacks-based measure of technical inefficiency. *Socio-Economic Planning Sciences*, *43*(4), 274-287.
- Fukuyama, H., & Weber, W. L. (2010). A slacks-based inefficiency measure for a two-stage system with bad outputs. *Omega*, *38*(5), 398-409.
- Gershman, Brickner & Bratton, Inc. (2015). *The Evolution of Mixed Waste Processing Facilities 1970-Today*.
- Gundupalli, S. P., Hait, S., & Thakur, A. (2017). A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling. *Waste management*, *60*, 56-74.
- Halkos, G. E., Tzeremes, N. G., & Kourtzidis, S. A. (2014). A unified classification of two-stage DEA models. *Surveys in operations research and management science*, *19*(1), 1-16.
- Kao, C., & Hwang, S. N. (2008). Efficiency decomposition in two-stage data envelopment analysis: An application to non-life insurance companies in Taiwan. *European journal of operational research*, *185*(1), 418-429.
- Kao, C. (2014). Network data envelopment analysis: A review. *European journal of operational research*, *239*(1), 1-16.
- Kao, C. (2009). Efficiency measurement for parallel production systems. *European Journal of Operational Research*, *196*(3), 1107-1112.
- Kumar, S. (2016). *Municipal solid waste management in developing countries*. CRC Press.
- López, P. M. D; (2017). *Recogida y transporte de residuos urbanos o municipales*. Editorial CEP, S.L.
- Lozano, S. (2011). Scale and cost efficiency analysis of networks of processes. *Expert Systems with Applications*, *38*(6), 6612-6617.
- Lozano, S. (2015). Alternative SBM model for network DEA. *Computers & Industrial Engineering*, *82*, 33-40.
- Lozano, S. (2016). Slacks-based inefficiency approach for general networks with bad outputs: An

application to the banking sector. *Omega*, 60, 73-84.

Mirdehghan, S. M., & Fukuyama, H. (2016). Pareto–Koopmans efficiency and network DEA. *Omega*, 61, 78-88.

Robert, G., Marcin, P., & Marek, M. (2017). Analysis of picked up fraction changes on the process of manual waste sorting. *Procedia Engineering*, 178, 349-358.

Sarra, A., Mazzocchitti, M., & Rapposelli, A. (2017). Evaluating joint environmental and cost performance in municipal waste management systems through data envelopment analysis: Scale effects and policy implications. *Ecological indicators*, 73, 756-771.

Seoáñez Calvo, M. (1999). *Residuos: Problemática, descripción, manejo, aprovechamiento y destrucción. Manual para políticos, técnicos, enseñantes y estudiosos de la Ingeniería del Medio Ambiente.*

Tone, K. (2001). A slacks-based measure of efficiency in data envelopment analysis. *European journal of operational research*, 130(3), 498-509.

Tone, K., & Tsutsui, M. (2009). Network DEA: A slacks-based measure approach. *European journal of operational research*, 197(1), 243-252.

Lozano, S., & Villa, G. (2016). Data Envelopment Analysis of systems with multiple modes of functioning. *Annals of Operations Research*, 1-25.

Wei, Y., Li, J., Shi, D., Liu, G., Zhao, Y., & Shimaoka, T. (2017). Environmental challenges impeding the composting of biodegradable municipal solid waste: A critical review. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 51-65.

Wu, J., Zhu, Q., Ji, X., Chu, J., & Liang, L. (2016). Two-stage network processes with shared resources and resources recovered from undesirable outputs. *European Journal of Operational Research*, 251(1), 182-197.

Webs

[1] El País, Manuel Planelles [02/2018].
http://politica.elpais.com/politica/2018/02/27/actualidad/1519762019_799103.html

[2] Eurostat Statistics Explained, [05/2018].
http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics

[3] Plan Nacional Integrado de Residuos para el período 2008-2015, (2009). Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, BOE-A-2009-3243.
<http://www.boe.es/boe/dias/2009/02/26/pdfs/BOE-A-2009-3243.pdf>

[4] Cicla Consulting Services, Diseño de Instalaciones de Tratamientos de Residuos [03/2018].
<http://www.ciclaconsulting.com/servicios/disen-de-instalaciones/>

[5] Ecoembes, [03/2018].
<https://www.ecoembes.com/es/ciudadanos/sobre-nosotros/sobre-ecoembes/quienes-somos>

[6] Ecovidrio, [03/2018].
<https://www.ecovidrio.es/conocenos/nosotros/nosotros>

[7] GBB. The evolution of mixed waste processing facilities (1970-Today), [03/2018].
<http://gbbinc.com/>

[8] istockphoto, vídeos de reciclaje, [08/2018].
<https://www.istockphoto.com/es/v%C3%ADdeos/reciclaje?offlinecontent=include&phrase=reciclaje>

[9] Direct Industry. Clasificador Rotativo / Automático / De desechos, [08/2018].
<http://www.directindustry.es/prod/brt-recycling-technologie-gmbh/product-89853-942173.html>

[10] Residuos Profesional. Separador Óptico, [08/2018].
<https://www.residuosprofesional.com/tag/separador-optico>

ANEXOS

El modelo se ha realizado a partir del programa Lingo V14 con el siguiente código:

SETS:

!conjuntos primitivos;

ENTRADA/1..2/:XCR1,XCR2;

SALIDA/1..7/:YCR1,YCR2,SRY;

DMU/1..69/:FO,ALPHAC1,ALPHAC2,VSOLC1,VSOLC2,SV,T1,T2,VC1,VC2;

!conjuntos derivados;

SALIDA_DMU(SALIDA,DMU):YSOLC1,YSOLC2,SY;

ITERACION(DMU):LANDAC1,LANDAC2;

DMU_ENTRADA_DMU(DMU,ENTRADA):XC1,XC2;

DMU_SALIDA(DMU,SALIDA):YC1,YC2;

ENDSETS

DATA:

!Importamos los datos desde una hoja excel;

XC1,XC2,YC1,YC2,VC1,VC2,T1,T2=@OLE

('C:\PROYECTO\DATOS_RSU.xlsx','XC_1','XC_2','YC_

1','YC_2','VC_1','VC_2','TIME1','TIME2');

ENDDATA

SUBMODEL RSU:

!Funcion objetivo sin ventas;

MAX= @SUM(SALIDA(K):(SRY(K)/PT));

!Restricciones;

FOBJ= @SUM(SALIDA(K):(SRY(K)/PT));

```

PT=@SUM(SALIDA(K):(YC1(R,K)+YC2(R,K)));
VT=VC1(R)+VC2(R);
@FOR (ENTRADA(I):
    @SUM(DMU(J):
        LANDAC1(J)*(XC1(J,I)/T1(J)) <= XC1(R,I);
@FOR (ENTRADA(I):
    @SUM(DMU(J):
        LANDAC2(J)*(XC2(J,I)/T2(J)) <= XC2(R,I);
@FOR (SALIDA(K):
    @SUM(DMU(J):
        LANDAC1(J)*(YC1(J,K)/T1(J)) = YCR1(K);
@FOR (SALIDA(K):
    @SUM(DMU(J):
        LANDAC2(J)*(YC2(J,K)/T2(J)) = YCR2(K);
@FOR (SALIDA(K):
    YCR1(K)+YCR2(K)=YC1(R,K)+YC2(R,K)+SRY(K);

!RESTRICCIONES PARA MMF1;
!@SUM(DMU(J):LANDAC1(J))= T1(R);
!@SUM(DMU(J):LANDAC2(J))= T2(R);

!RESTRCCIONES PARA MMF2;
@SUM(DMU(J):LANDAC1(J))= ALPHARC1;
@SUM(DMU(J):LANDAC2(J))= ALPHARC2;
ALPHARC1 + ALPHARC2 <= T1(R)+T2(R);

ENDSUBMODEL

CALC:
@SET( 'TERSEO', 2);

```

```
@FOR (ITERACION(ITER):  
R=ITER;  
@SOLVE(RSU);  
ALPHAC1(ITER)=ALPHARC1;  
ALPHAC2(ITER)=ALPHARC2;  
FO(ITER)=FOBJ;  
@FOR (SALIDA(K):SY(K,ITER)=SRY(K));  
SV(ITER)=SVR;  
@FOR (SALIDA(K):YSOLC1(K,ITER)=YCR1(K));  
@FOR (SALIDA(K):YSOLC2(K,ITER)=YCR2(K));  
VSOLC1(ITER)=VCR1;  
VSOLC2(ITER)=VCR2;  
);  
ENDCALC
```

