

Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología

Grado en Ingeniería en Organización Industrial

Curso Académico 2025/2026 Trabajo de Fin de Grado

Diseño técnico y económico de un sistema industrial de reciclaje de PET integrado a un modelo de renting de máquinas de retorno.

Autor: Tomás Juan Trebino Nelli

Tabla de contenido

1. Resumen 4

2. Introducción 5

2.1. Contexto actual: sostenibilidad, reciclaje y economía circular 5

2.2. Situación actual del reciclaje de envases en España 6

2.3. Análisis del entorno y situación del mercado 6

2.3.1. Situación actual del reciclaje de PET y latas 6

2.3.2. Generación de plásticos en España 7

2.3.3. Consumo de plástico en España 8

2.3.4. Estimaciones de demanda a medio plazo 10

2.3.5. Cuantificación de capacidad ausente 11

2.4. Planteamiento del problema 11

2.5. Justificación del proyecto 11

3. Objetivos 13

3.1. Objetivo general 13

3.2. Objetivos específicos 13

4. Metodología 14

5. Solución técnica 15

5.1. Descripción del proyecto y modelo de negocio 15

5.1.1. Descripción general del sistema propuesto 15

5.1.2. Propuesta de valor 15

5.1.3. Destinatarios del servicio 16

5.2. Alcance del proyecto 16

5.3. Tendencias existentes en el mercado (línea secundaria) 17

5.4. Análisis competitivo del proyecto 17

5.4.1. Análisis DAFO 17

5.4.2. Beneficios para los supermercados por la adopción de sistemas SDDR 19

5.5. Caracterización de la materia prima 19

5.5.1. Tipología de residuos recolectados 19

5.5.2. Composición del material 20

5.6. Estimaciones de flujo de entrada 21

5.6.1. Estimación de captación mediante Ecoembes 21

5.6.2. Estimación de captación mediante clientes SDDR 21

5.6.3. Flujos de entrada final 25

5.7. Ingeniería de producto: máquinas SDDR 26

5.7.1. Función del producto dentro del sistema 26

5.7.2. Requisitos técnicos de las máquinas 27

5.7.3. Criterios de selección básicos 27

5.7.4. Selección del modelo 28

5.8. Diseño del proceso productivo, selección y dimensionamiento 29

5.8.1. Criterios básicos de diseño 29

5.8.2. Procedimiento para la selección 29

5.8.3. Capacidad instalada y escalabilidad 30
5.8.4. Diagrama general del proceso 30
5.8.5. Maquinaria para reciclaje de PET 31
5.8.6. Resumen de maquinaria seleccionada y flujos de materia 48
5.8.7. Cálculos reales de obtención de producto 49
5.9. Diseño de la planta industrial 49
5.9.1. Localización de la nave 49
5.10. Nave 52
5.10.1. Tamaño según capacidad 52
5.10.2. Requisitos técnicos 52
5.10.3. Layout propuesto 53
5.11. Plan económico financiero 54
5.11.1. Inversión inicial 54
5.11.2. Costes de financiación 56
5.11.3. Costes de operación 56
5.11.4. Valor del producto reciclado 59
5.11.5. Ingresos del sistema 59
5.11.6. Análisis de viabilidad económica 60
6. Conclusiones 61
7. Bibliografía 63
Dedicatoria 68
Anexo 69

1. Resumen

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo el diseño y análisis de viabilidad de una cadena industrial integrada para el reciclaje de envases, centrada principalmente en el reciclaje y valorización de residuos de PET y aluminio. El proyecto surge en el contexto actual, en el que se busca una transición hacia modelos de economía circular. La relevancia del trabajo radica en la necesidad de mejorar los sistemas de recogida actuales, mediante la implementación de un sistema innovador, aumentando la tasa de reciclaje y la calidad del material recuperado. En este sentido, este trabajo propone un modelo basado en la integración de máquinas de retorno (sistemas de depósito, devolución y retorno) ubicadas en supermercados, combinadas con una planta industrial capaz de procesar de forma eficiente los materiales recogidos. Este enfoque permite optimizar la logística de recogida, mejorar la trazabilidad de los residuos y aumentar el valor del material reciclado.

Los principales objetivos del proyecto son diseñar técnicamente la planta de reciclaje, definir el conjunto de máquinas necesarias y su disposición en la planta, analizar los procesos industriales implicados en la clasificación y tratamiento del material, estimar la inversión inicial y los costes operativos, y evaluar la viabilidad económica del proyecto mediante herramientas financieras como el VAN y el periodo de retorno. La metodología empleada combina análisis técnico e ingeniería de procesos con evaluación económica-financiera. Para la correcta estimación de las capacidades de la maquinaria, se llevó a cabo un análisis del consumo de plásticos a nivel nacional, con especial atención al PET y aluminio utilizado en envases de bebidas. A partir de estos datos, se dimensionaron las máquinas de retorno y las líneas de proceso de la planta, garantizando su adecuación a los volúmenes previstos y evitando tanto infrautilización como cuellos de botella en la operación.

Posteriormente, se ha realizado una selección de maquinaria específica para cada etapa del proceso, incluyendo sistemas de alimentación, separación (trómel, separadores ópticos NIR, corrientes de Foucault), transporte y compactación. A su vez, para la selección de las máquinas SDDR, se ha continuado con el mismo procedimiento. Identificando los proveedores existentes y especificaciones de los productos en el mercado, para poder escoger el producto adecuado para la demanda existente. A la vez, se ha diseñado el Layout de la planta con el objetivo de optimizar los flujos de material y minimizar costes operativos. Además, se han estimado los consumos energéticos en base a un régimen de funcionamiento definido, así como los costes fijos y variables asociados a la operación. En lo económico, se ha calculado la inversión inicial, incluyendo maquinaria, instalaciones y costes asociados. Asimismo, se han estimado los ingresos derivados de la venta de material reciclado y provenientes del Renting de SDDR. A partir de estos datos, se ha realizado un análisis de viabilidad mediante el cálculo del Valor Actual Neto (VAN), la tasa de descuento y otros indicadores financieros relevantes.

Los resultados obtenidos muestran que el proyecto presenta una viabilidad técnica sólida, con un proceso industrial eficiente y escalable. Desde el punto de vista económico, los indicadores reflejan que, bajo determinadas condiciones de mercado y volumen de tratamiento, el proyecto puede ser rentable a medio plazo, destacando la importancia de optimizar los costes operativos y asegurar un flujo constante de entrada de material.

En conclusión, este trabajo demuestra que la integración de sistemas de recogida inteligente con procesos industriales avanzados constituye una solución viable para mejorar la eficiencia del reciclaje de envases. Además, pone de manifiesto el potencial de este tipo de modelos para contribuir a la sostenibilidad ambiental y generar valor económico, alineándose con las tendencias actuales en economía circular y gestión de residuos.

2. Introducción

2.1. Contexto actual: sostenibilidad, reciclaje y economía circular

En las últimas décadas, el aumento del consumo y expansión de la distribución global han provocado un incremento significativo en la generación de residuos. Entre ellos destacan, de forma significativa, los envases de plástico y las latas metálicas, estrechamente vinculados al consumo de bebidas y productos alimenticios envasados en plásticos de un solo uso. La magnitud de este incremento puede observarse en la Figura 1, que muestra la evolución de la generación de plásticos en la Unión Europea durante el periodo 2011-2021. El reciclaje de estos materiales constituye actualmente uno de los principales desafíos ambientales a los que se enfrentan España y el resto del mundo .

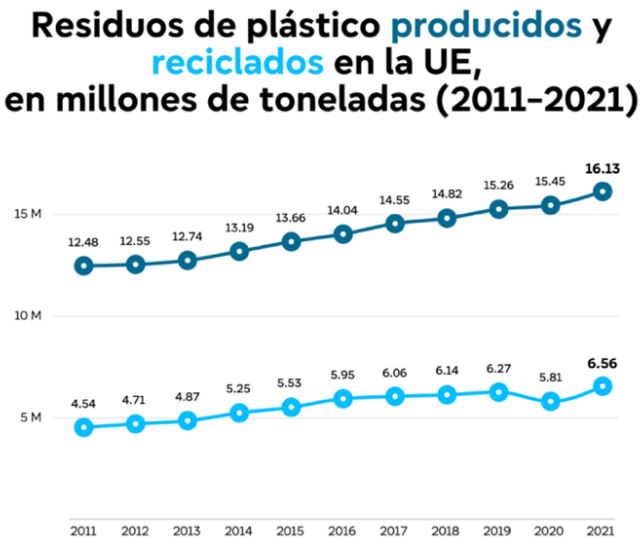


Figura 1: Evolución de residuos en la UE 2011-2021 (1).

El plástico, particularmente el PET, es el material más utilizado para el envasado de bebidas debido a sus propiedades técnicas: bajo peso, resistencia mecánica, transparencia, facilidad de moldeo y reducido coste. A su vez, las latas de aluminio se han consolidado como un envase ampliamente extendido gracias a su ligereza, elevada reciclabilidad y capacidad para preservar las cualidades del producto. Sin embargo, la evolución y el aumento en el consumo de este tipo de envases, cuando no van acompañados de una gestión adecuada en términos de reciclaje, puede generar un impacto ambiental significativo. De este modo, la creciente demanda de este tipo de productos debe avanzar en paralelo con sistemas de reciclaje capaces de gestionar eficazmente estos residuos.

En este contexto, los sistemas de reciclaje adquieren un papel estratégico y se integran plenamente en el marco de la economía circular, un modelo que busca mantener los materiales en uso durante el mayor tiempo posible mediante su reutilización, reciclaje y revalorización. La reutilización del PET y del aluminio permite reducir el consumo de materias vírgenes, disminuir la huella de carbono y limitar la acumulación de residuos, en línea con los objetivos de desarrollo sostenible establecidos por la Unión Europea. No obstante, para que estos beneficios se materialicen, resulta imprescindible disponer de sistemas eficientes de recogida, clasificación y tratamiento. Con el avance de la tecnología, se han desarrollado diferentes soluciones, entre las cuales destacan los sistemas de depósito, devolución y retorno (SDDR), basados en máquinas automáticas de recogida. Estos sistemas permiten aumentar las tasas de recuperación y mejorar la calidad del material recolectado para su posterior procesamiento.

2.2. Situación actual del reciclaje de envases en España

En España, el sistema actual de reciclaje de envases se articula a través del modelo de responsabilidad ampliada del productor (RAP). Este enfoque establece que las empresas mismas que ponen envases en el mercado deben responsabilizarse la gestión de los residuos que se generan una vez consumidos sus productos. La entidad que gestiona este sistema para los envases domésticos ligeros es Ecoembes, encargada de coordinar la recogida, clasificación y envío a reciclaje de envases de plástico, metal, briks, papel y cartón mediante acuerdos con administraciones locales y gestores autorizados (2). La recogida se realiza principalmente a través del sistema de contenedores urbanos. En particular, el contenedor amarillo está destinado a plásticos y metales, residuos que constituyen el foco de este estudio. Los residuos depositados en estos contenedores son recogidos por los servicios municipales o, en su defecto, por operadores privados, y son posteriormente transportados a plantas de selección. En estas instalaciones se lleva a cabo la separación por materiales y la preparación de las fracciones recuperadas para su posterior reciclaje, asegurando así su adecuada reincorporación al ciclo productivo.

2.3. Análisis del entorno y situación del mercado

2.3.1. Situación actual del reciclaje de PET y latas

2.3.1.1. PET

España ocupa actualmente una posición destacada en el ámbito del reciclaje de plásticos en Europa. Según un informe de *Plastics Recyclers Europe* (3), se sitúa como el segundo país con mayor capacidad instalada de reciclaje en Europa, con aproximadamente 2.000.000 de toneladas en el año 2024. A continuación, en la Figura 2 se muestra la distribución de la capacidad instalada según el tipo de residuo tratado:

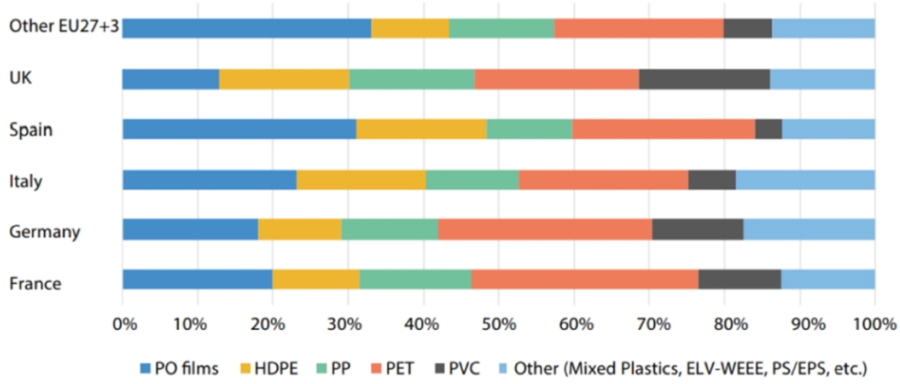


Figura 2: Capacidad instalada por polímero (3).

A partir de estos datos, y considerando la distribución porcentual mostrada anteriormente, es posible realizar una estimación específica para el PET. En concreto, este polímero representa aproximadamente el 25% de la capacidad total instalada. Por tanto, puede estimarse la siguiente capacidad para España en 500.000 Tm en 2024. A su vez, este mismo informe también advierte de una reducción significativa de la capacidad de reciclaje en los últimos años. En el siguiente extracto, se recoge uno de los motivos de esta reducción:

"En los últimos tres años han cerrado alrededor de 50 plantas de reciclaje, con una pérdida de capacidad en 2025 casi triplicada respecto a 2023. El PET representa el 21 % de la capacidad perdida, reflejando la creciente presión competitiva derivada de importaciones que no siempre cumplen estándares ambientales y de trazabilidad equivalentes." (4)

Una de las razones que explican la pérdida de competitividad de España en el mercado de reciclaje es la falta de trazabilidad. La intervención de múltiples agentes en diferentes fases del proceso de gestión de un mismo residuo dificulta la trazabilidad completa del material. Esto provoca pérdidas de información, incrementos de costes e ineficiencias operativas. Esta conclusión será relevante más adelante, al analizar la principal fortaleza del modelo propuesto en este proyecto. De manera paralela, y según el Parlamento Europeo, la Unión Europea (UE) ha tenido que exportar 1,3 millones de toneladas de residuos plásticos fuera de su territorio debido a la insuficiencia de capacidad y de tecnología de tratamiento. Una parte importante de estos residuos se enviaban históricamente a China para su reciclaje. Sin embargo, el endurecimiento de la legislación china respecto a la importación de residuos ha reducido drásticamente la entrada de materiales procedentes de la UE. Esta situación ha impulsado a las instituciones europeas a buscar soluciones más circulares, autosuficientes y ambientalmente responsables para la gestión de los residuos plásticos dentro de su propio territorio (1).

2.3.1.2. Aluminio

Aunque el aluminio no será la materia prima principal de la cadena de reciclaje propuesta resulta relevante analizar su situación actual para comprender la contribución potencial del proyecto dentro de la economía circular de este material. Según datos recientes:

"España ha logrado un hito ambiental anticipado. En 2024 se reciclaron 78.297 toneladas de envases de aluminio, lo que equivale al 50,7% del total puesto en el mercado, cumpliendo así el objetivo de reciclaje que la Directiva Europea 2018/852 establecía para el año 2025. Esta cifra, calculada conforme a los criterios del Real Decreto 1055/2022 sobre envases y residuos de envases, demuestra un avance notable en la concienciación social y eficiencia de la gestión de residuos." (5).

A partir de esta proporción de aluminio reciclado sobre el aluminio puesto en mercado, se puede aproximar que el consumo anual de aluminio para envases en España se sitúa en 154.432 Tm y también puede afirmarse que el país se encuentra dentro de los estándares establecidos por la UE. Sin embargo, el incremento continuo en el consumo y las crecientes las exigencias regulatorias hacen necesario ampliar la capacidad de reciclaje, con el fin de mantener y, en su caso, mejorar los porcentajes de recuperación de los próximos años. Si bien esta cifra es suficiente para cumplir los objetivos actuales, el contexto normativo europeo exige reforzar la infraestructura de reciclaje para garantizar la autosuficiencia y la trazabilidad del proceso. En este sentido, el modelo propuesto en este proyecto podría contribuir a mejorar la eficiencia de la cadena, optimizando la recuperación de envases de aluminio en fases tempranas del ciclo y asegurando un flujo de material más controlado y de mayor calidad.

2.3.2. Generación de plásticos en España

A la hora de dimensionar la problemática objeto de este estudio, es fundamental disponer de información sobre el consumo de residuos plásticos en España. No obstante, para contextualizar adecuadamente estos datos, resulta igualmente relevante analizar primero la producción nacional de plásticos, lo que permitirá posteriormente compararla con el consumo y determinar qué parte del material utilizado en el país procede de importaciones.

Plastics Europe, una asociación belga dedicada al análisis y divulgación de información sobre la industria del plástico en Europa, presentó en 2024 su informe sobre economía circular en el continente europeo. En él se detallan los porcentajes de producción de plásticos de cada país europeo, así como los principales usos de estos materiales (6) tal y como se muestra en la Figura 3.

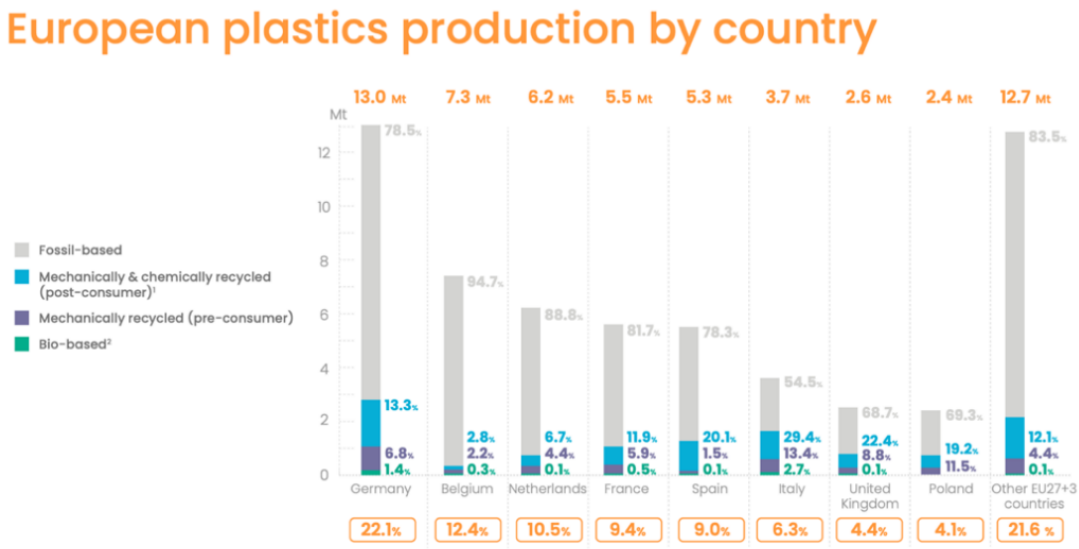


Figura 3: Producción europea de plástico por país (6).

A partir de estos datos, se observa que España concentra aproximadamente el 9% de toda la producción plástica europea, lo que equivale a unos 5,3 millones de toneladas anuales. Este dato servirá como punto de referencia para comparar la producción nacional con el consumo interno, y permitirá identificar qué porcentaje del material plástico utilizado en el país debe ser importado, aspecto relevante para comprender el balance real de flujos de plástico y las implicaciones que ello tiene para la economía circular.

2.3.3. Consumo de plástico en España

Basándose en los datos publicados por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, se estima que en España se consumen anualmente alrededor de 13,6 millones de toneladas de plástico (7). Esta cifra equivale aproximadamente a 302,2 kg de plástico por habitante y año, un dato que permite dimensionar la magnitud del reto asociado a la gestión y al reciclaje de estos materiales. Este indicador resulta especialmente relevante a la hora de evaluar la capacidad instalada necesaria para cumplir los estándares establecidos por la UE en materia de economía circular. Al comparar este volumen de consumo con el informe de *Plastics Recyclers Europe* (3), que detalla una capacidad instalada de España para reciclaje de plásticos cercana a los 2 millones de toneladas, se evidencia una insuficiencia estructural en la infraestructura española ya que la capacidad actual representa únicamente el 14,7% del consumo anual.

Esta diferencia pone de manifiesto la necesidad de ampliar la red de plantas de reciclaje, optimizar los procesos existentes y garantizar una mayor trazabilidad en la cadena de gestión de residuos.

Dado que el presente proyecto se orienta específicamente al PET, es importante realizar un análisis más detallado por tipo de polímero. Para ello se recurre al informe elaborado por Thermolympic (8), en el cual se presenta una distribución porcentual de los diferentes tipos de plásticos producidos en España tal y como se muestra en la Figura 4.

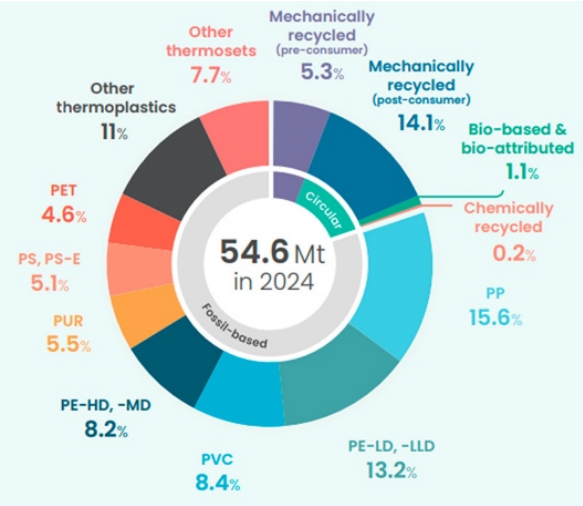


Figura 4: Producción de plásticos según tipo de polímero (8).

Se observa que el PET representa el 4,6% del total de los plásticos puestos en el mercado. Este porcentaje hace referencia exclusivamente al PET producido a partir de materia prima virgen, ya que los materiales reciclados se diferencian explícitamente en la figura y representan cerca del 20% de la producción total de plásticos en 2024. Con esta información, será posible determinar con mayor exactitud la producción y el consumo específico de PET en España, así como estimar la capacidad de reciclaje necesaria para garantizar el cumplimiento de los objetivos europeos en materia de economía circular y sostenibilidad. La producción anual de PET en España se sitúa en 243.800 toneladas, mientras que el consumo alcanza aproximadamente 625.600 toneladas. Esta diferencia entre producción y demanda pone de manifiesto, por un lado, la dependencia estructural de importaciones de PET para cubrir las necesidades internas del país y, por otro, el infra-dimensionamiento de la capacidad nacional de reciclaje, incapaz de compensar este déficit mediante la recuperación de material posconsumo. Ambos factores evidencian la necesidad de reforzar la infraestructura asociada al tratamiento y reciclado del PET, con el fin de avanzar hacia un modelo más autosuficiente y alineado con los principios de la economía circular.

Al analizar la capacidad de reciclaje disponible en España, se observa que la cobertura actual se sitúa muy por debajo de los estándares fijados por la UE. Esta insuficiencia estructural coincide con los argumentos expuestos por el Parlamento Europeo al justificar el envío de residuos fuera del territorio comunitario para su tratamiento.

En relación con los materiales que competen a este proyecto, principalmente PET y aluminio, las tasas oficiales de reciclaje podrían sugerir, a primera vista, un desempeño adecuado. Sin embargo, la capacidad instalada presenta dos limitaciones técnicas fundamentales: (i) Porcentaje real de utilización de instalaciones; (ii) Crecimiento constante de la demanda frente a una capacidad limitada. El primer factor es determinante para interpretar correctamente los datos disponibles. Aunque una cobertura de reciclaje cercana al 80 % podría parecer satisfactoria, ninguna planta industrial opera a su capacidad máxima de manera continua. Este fenómeno responde a dos elementos técnicos ampliamente documentados (9):

- Factor de utilización: ineficiencias relativas al uso y utilización de los equipos y maquinaria.
- Eficiencia: ineficiencias relacionadas con el factor humano y su rendimiento.

A estas limitaciones intrínsecas de las plantas se suman las ineficiencias en la cadena completa de gestión, que incluyen la coordinación entre la recogida, la logística y el tratamiento. Esto reduce de manera significativa la capacidad efectiva del sistema y constituyen precisamente uno de los problemas que el

modelo propuesto por este proyecto pretende abordar. Para establecer una estimación teórica de utilización real, deben considerarse elementos como las paradas de limpieza, la variabilidad en la entrada de material, el mantenimiento preventivo y los ajustes de línea. Sobre esta base, puede asumirse un factor de utilización aproximado de 0,8. Por otro lado, dado que se trata de sistemas mayoritariamente automatizados, con una dependencia relativamente baja del operador humano, puede adoptarse un factor de eficiencia estimado en 0,95. Por tanto la capacidad real sería de aproximadamente 360.000 Tm.

El segundo fenómeno que condiciona la capacidad del sistema es el crecimiento constante de la demanda, característico de materiales considerados esenciales dentro del mercado. Este incremento, que sigue un comportamiento de naturaleza exponencial, hace imprescindible la expansión progresiva de la infraestructura de reciclaje para evitar que la brecha entre capacidad instalada y necesidades reales continúe aumentando. En conjunto, estos elementos ponen de manifiesto la necesidad de reforzar la estructura de reciclaje en España, tanto desde el punto de vista de la capacidad física instalada como de la eficiencia operativa en toda la cadena, con el fin de alinearse con los objetivos europeos y avanzar hacia un modelo más robusto de economía circular.

2.3.4. Estimaciones de demanda a medio plazo

Para justificar la necesidad de incrementar la capacidad nacional de reciclaje de PET, es importante cuantificar el crecimiento previsto en el consumo de este material. Con este fin, es necesario estimar la evolución anual de la demanda, relacionándola tanto con la tendencia global de consumo de plásticos de un solo uso como con la dinámica demográfica.

Un estudio elaborado por *Wood Mackenzie* (10), firma internacional de referencia en el análisis del sector energético, estima que la demanda de plásticos de un solo uso crecerá a un ritmo anual aproximado de 2,7% hasta el año 2040, con un incremento acelerado en Asia. Este comportamiento ascendente, permite proyectar la evolución del consumo a medio plazo, y así obtener una visión más precisa del contexto en el que deberá dimensionarse el proyecto.

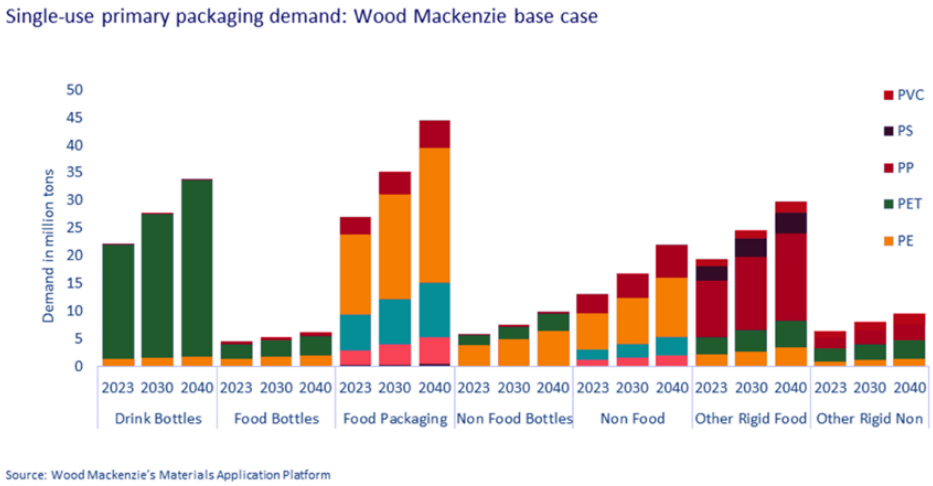


Figura 5: Evolución de la estimación de demanda de plásticos de un solo uso (10).

Como se observa en la Figura 5, el segmento de las botellas de plástico, fabricadas mayoritariamente con PET, sufrirá de un aumento significativo en los próximos años. Este crecimiento previsto refuerza la necesidad de ampliar la capacidad de actual reciclaje para asegurar la recuperación eficiente de este material. Bajo este escenario de crecimiento, las proyecciones indican que el consumo de PET en España podría alcanzar aproximadamente 734.000 toneladas en el año 2030. Aplicando el mismo razonamiento al aluminio, se estima que su consumo ascenderá a unas 181.000 toneladas en ese mismo horizonte temporal.

2.3.5. Cuantificación de capacidad ausente

La operación de las plantas de reciclaje a plena capacidad resulta inviable desde el punto de vista técnico y operativo, por lo que la cobertura real del mercado debe calcularse sobre niveles de utilización inferiores. Según la plataforma de *benchmarking* KPI Depot, una utilización situada entre el 85-90% se considera habitual en instalaciones eficientes y competitivas (11), ya que permite absorber eventuales picos de demanda y mantener márgenes operativos adecuados. Con este criterio, los valores deben ajustarse a una utilización óptima del 90 %, lo que supondría una capacidad efectiva de unas 450.000 Tm de PET y 70.500 Tm de aluminio. Considerando las proyecciones de consumo anual estimado para el año 2030, las tasas de reciclaje asociadas a dicha capacidad se situarían en torno al 71,9 % en el caso del PET y aproximadamente en el 45,75 % para el aluminio. Este nivel de cobertura evidencia que la capacidad instalada resulta insuficiente para acompasar el crecimiento previsto del consumo. En consecuencia, la ampliación de la infraestructura de reciclaje se perfila como un requisito imprescindible para evitar un aumento progresivo de la brecha entre demanda y capacidad de tratamiento.

2.4. Planteamiento del problema

Como reflejan las cifras expuestas, existe un desajuste significativo entre el consumo previsto para el 2030 y la capacidad actual de reciclaje de los materiales analizados. Esta diferencia representa un desafío importante para la economía circular española y subraya la necesidad urgente de ampliar la infraestructura de reciclaje, con el objetivo de evitar que el país continúe exportando sus residuos para su tratamiento en otros países. La falta de capacidad interna implica, además, un aumento de costes para las industrias que consuman y traten plástico en el país, ya que, de acuerdo con la normativa vigente, estas empresas son responsables de la correcta gestión y tratamiento de los residuos generados.

Esta problemática es escalable a los consumidores finales de plástico, ya que un incremento de costes en las fábricas repercutirá directamente en un aumento de precios para la ciudadanía, dado que estas empresas difícilmente asumirán una reducción de su margen comercial para compensar dichos costes adicionales.

A este contexto se suma el marco regulatorio derivado de los compromisos europeos. Tal como señala el Pacto Mundial Red España (12), *"A más tardar el 1 de enero de 2030 o tres años después de la fecha de entrada en vigor del acto de ejecución, la parte de plástico de los envases introducidos en el mercado contendrá el siguiente porcentaje mínimo de contenido reciclado valorizado a partir de residuos plásticos postconsumo: el 30 % en el caso de los envases de plástico aptos para el contacto cuyo principal componente en la fabricación sea el tereftalato de polietileno (PET), el 10 % en el caso de los envases de plástico aptos para el contacto cuyo principal componente en la fabricación no sea el PET, el 30 % en el caso de las botellas de plástico de un solo uso para bebidas".* Este objetivo implica de manera directa la necesidad de aumentar la producción de PET reciclado si se pretenden mantener los niveles actuales de consumo para el 2030 sin incrementar la dependencia exterior. En otras palabras, será fundamental producir PET reciclado en cantidades acordes a la demanda, evitando así la importación de materia prima para la fabricación de productos tan esenciales y de uso extendido como los envases.

2.5. Justificación del proyecto

Dado este contexto, existe dos causas principales que otorgan a este proyecto una relevancia estratégica. La primera radica en la capacidad insuficiente para cumplir con la normativa actual de reciclaje y los estándares de composición exigidos para la fabricación de nuevos plásticos. Con las condiciones actuales, España se ve obligada a exportar sus residuos para su tratamiento e importar PET reciclado para

garantizar el abastecimiento de materia prima secundaria. Actuar sobre esta problemática no solo contribuirá de forma directa al avance de la economía circular nacional, sino que también permitirá reducir los costes de producción de envases al disminuir la dependencia de mercados externos y optimizar el aprovechamiento del material recuperado. La segunda causa responde al principal factor que explica la pérdida de competitividad del sector del reciclaje en España: la falta de trazabilidad. El desarrollo de un proyecto que integre la cadena de valor completa del residuo plástico posibilitará una mayor eficiencia operativa, al unificar flujos de información, reducir costes derivados de la fragmentación del sistema y maximizar el rendimiento de la materia prima recuperada. Un modelo integrado permite un control más preciso del material desde su generación hasta su reincorporación al ciclo productivo, favoreciendo la calidad del material reciclado y el cumplimiento de las exigencias regulatorias europeas.

Además de dar respuesta a estas necesidades críticas, el proyecto y la solución propuesta se alinean con diversos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que se muestran en la Figura 6, contribuyendo así al cumplimiento de metas globales vinculadas a la producción responsable, la acción climática y la protección del medio ambiente.



Figura 6: ODS del proyecto (13).

En el Anexo 1.1 se puede ver de qué manera cada uno de estos ODS se alinea con las dinámicas del proyecto planteado.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

El objetivo principal del presente trabajo es el diseño y evaluación tecno-económica de una planta piloto de reciclaje de envases de PET, integrada a un sistema de captación con doble modalidad. El propósito es analizar la viabilidad y efectividad de un modelo industrial y de negocio basado en la economía circular y en el renting de equipamiento. El proyecto se centra en el diseño del sistema industrial completo, abarcando los procesos de tratamiento del material, las estimaciones de consumo, la logística asociada a Ecoembes, la selección de maquinaria, el diseño de la implantación industrial y la evaluación económica.

3.2. Objetivos específicos

- Definir las condiciones del contrato como socio operativo de Ecoembes, para disminuir riesgos y asegurar las condiciones de trabajo efectivas para el desarrollo del proyecto.

- Definir un proceso técnico eficiente para la valorización de PET, adecuada a una escala piloto industrial, contemplando las distintas etapas de reciclaje.

- Seleccionar y dimensionar la maquinaria necesaria para el reciclaje de envases de PET y la compactación de latas de aluminio, en función de los volúmenes de entrada, la capacidad de tratamiento requerida y los criterios de eficiencia.

- Diseñar el Layout y la implantación industrial dentro de una nave alquilada, garantizando operatividad, optimización de espacio y seguridad.

- Analizar técnicamente las máquinas automáticas de retorno y su integración dentro del sistema global de reciclaje, evaluando su funcionamiento correcto y mejorando la eficiencia.

- Estimar los volúmenes de material recuperado y los costes logísticos asociados a la recolección externalizada.

- Determinar la estructura básica de costes necesaria para la operación de la planta.

- Evaluar la rentabilidad económica del proyecto mediante un análisis financiero que incluya la estimación de inversiones iniciales, costes operativos e ingresos derivados de la venta del reciclado, con el fin de validar la viabilidad del modelo industrial y del negocio propuesto en un escenario piloto.

4. Metodología

El desarrollo de este trabajo se ha llevado a cabo mediante una metodología estructurada en distintas fases, siguiendo un enfoque secuencial que permite dimensionar cada etapa con la mayor precisión posible. La combinación de análisis de consumo, análisis técnico, diseño de procesos industriales y evaluación económico-financiera posibilita un desarrollo integral de la cadena de reciclaje que, junto con el modelo de negocio propuesto, permite demostrar su viabilidad.

En una primera fase, se analiza el contexto y el mercado, con especial atención al consumo y producción de plásticos en España. A partir de datos estadísticos y estudios sectoriales, se estima la generación potencial de residuos y las tasas de recuperación alcanzadas en otros países. Este análisis resulta fundamental para establecer la capacidad aproximada necesaria para el diseño y dimensionamiento de la maquinaria contemplada en el proyecto. Tras este análisis inicial, se evalúa la factibilidad del modelo de negocio mediante herramientas de estrategia empresarial.

La segunda fase se centra en el diseño del proceso industrial. Una vez definido el tipo de residuo a tratar y la estimación de volúmenes a reciclar en el marco del proyecto, se analizan las distintas alternativas tecnológicas disponibles en el mercado del reciclaje. Para ello, se estudian plantas existentes y se comparan sus configuraciones con los objetivos del proyecto, empleando estas referencias como modelo de “benchmarking”. A partir del entendimiento de las tecnologías implicadas, se revisan las fichas técnicas de los fabricantes y se seleccionas aquellos equipos que más se adecúan a las necesidades planteadas.

Posteriormente, se aborda el dimensionamiento de la instalación, seleccionando los equipos adecuados en función de los caudales de entrada estimados y definiendo los regímenes de operación de la planta. Evaluando los criterios necesarios para optimizar los procesos en la planta, se realiza además un estudio para identificar la ubicación más conveniente para el desarrollo del proyecto, teniendo en cuenta factores como la existencia de plantas similares, la accesibilidad y los costes logísticos. En la siguiente fase, con la localización establecida y los equipos seleccionados, se elabora un *layout* mediante AutoCAD, con el objetivo de dimensionar la distribución y los flujos operativos de la planta.

A continuación, se analizan los costes asociados a la implantación y consecuente funcionamiento de la planta. Se consideran la inversión inicial, los costes operativos y las posibles contingencias, para poder elaborar un presupuesto aproximado del proyecto. Esta cuantificación de costes, apoyada en el análisis de precios de mercado, permite desarrollar el estudio económico-financiero necesario para evaluar la viabilidad. Asimismo, se realiza una estimación de ingresos basada en los precios actuales de mercado. Una vez estimados los parámetros necesarios se lleva a cabo el estudio de la rentabilidad y viabilidad económica del proyecto a través del cálculo de flujos de caja, análisis de VAN y Payback (aplicando primas de riesgo).

En cuanto a las herramientas empleadas, se utilizan hojas de cálculo para el tratamiento de datos, estimaciones y cálculos financieros; softwares de diseño para elaboración de planos y diagramas de flujo para el proceso industrial y documentación técnica, estudios de mercado y referencias existentes para sustentar el desarrollo metodológico. En conjunto, la metodología aplicada permite abordar el proyecto de forma sistemática y coherente, garantizando consistencia en la toma de decisiones, los diseños propuestos y las evaluaciones generales.

5. Solución técnica

En el siguiente trabajo se presentará la solución propuesta como modelo de negocio, que integrará un sistema innovador de captación de residuos, combinado con una planta de reciclaje que tiene como fin ampliar la capacidad de reciclaje existente, con el objetivo de solucionar la problemática planteada.

5.1. Descripción del proyecto y modelo de negocio

5.1.1. Descripción general del sistema propuesto

La empresa se configurará como un partner y operador industrial especializado en reciclaje, cuyo modelo de negocio se basa en la economía circular, integrando el procesamiento y valorización de envases de PET y aluminio derivados del sistema Ecoembes, así como una línea secundaria de captación mediante renting de máquinas automáticas de retorno (SDDR).

La generación de valor económico se centrará principalmente en los ingresos obtenidos del renting propio, del procesamiento de los residuos asignados por Ecoembes y la venta del material reciclado, compartiendo los beneficios según un esquema de participación definido (50/50 sobre el precio de venta). El sistema propuesto tiene como funciones principales la recepción de residuos provenientes de Ecoembes, su procesamiento industrial hasta obtener materia prima secundaria y su comercialización, complementado por la captación selectiva de envases mediante SDDR para optimizar la eficiencia técnica del sistema.

5.1.2. Propuesta de valor

La empresa plantea un modelo de negocio centrado en la transformación industrial de residuos de PET y aluminio, actuando como socio operativo (partner) de Ecoembes para ampliar la capacidad efectiva de reciclaje del sistema.
Ante la limitación de capacidad de tratamiento existente, la empresa se posiciona como un agente complementario dentro de la cadena de gestión de residuos, poniendo a disposición instalaciones propias y una cadena de reciclaje diseñada específicamente para el procesamiento de flujos homogéneos de PET y aluminio.
En este esquema, Ecoembes deriva a la planta aquellos residuos de PET y aluminio que no pueden ser absorbidos por la capacidad de reciclaje disponible en un determinado período. La empresa se encarga de:

- El procesamiento industrial de los residuos.
- Su acondicionamiento como materia prima secundaria.
- La comercialización del material reciclado en el mercado.

Los ingresos derivados de la venta de los materiales reciclados se reparten entre ambas partes, bajo un esquema de participación 50/50 sobre el precio de venta, alineando incentivos y compartiendo el valor generado. Los detalles de la colaboración entre empresas serán detallados en el Anexo 4.

De forma complementaria, la empresa desarrolla una línea de negocio secundaria basada en el renting de máquinas SDDR, orientada a la captación selectiva de envases y a la generación de flujos de entrada altamente homogéneos, reforzando la eficiencia técnica y económica del sistema.
Este modelo permite maximizar la valorización de residuos, reducir cuellos de botella en el sistema de reciclaje y aumentar la tasa efectiva de recuperación de materiales.
El servicio ofrecido por la empresa se dirige a dos tipos de destinatarios claramente diferenciados.

5.1.3. Destinatarios del servicio

1. Ecoembes (destinatario principal)

- Socio estratégico para la derivación de residuos de PET y aluminio.
- Beneficiario directo del incremento de capacidad de reciclaje sin necesidad de inversión en nuevas instalaciones.
- Participante en los ingresos generados por la venta del material reciclado.

2. Operadores y entidades adheridas al sistema SDDR (línea secundaria)

- Supermercados u otros agentes que implementen máquinas de retorno.
- Acceso a las máquinas mediante modelo de renting, sin necesidad de inversión inicial.
- Contribución a la generación de flujos de residuos de alta calidad.

5.2. Alcance del proyecto

El alcance comprende:

- Diseño técnico completo de la cadena de reciclaje de envases PET, desde la recepción del material hasta la obtención de un producto reciclado comercializable.
- Descripción del modelo de coparticipación con una empresa externa y adecuaciones a este tipo de contrato.
- Selección y dimensionamiento de la maquina principal y auxiliar, definición del proceso productivo, Layout de planta, balances de materia y estimación de consumos energéticos.
- Diseño de la implantación industrial interior en una nave alquilada, incluyendo distribución de equipos, zonas operativas y de almacenamiento.
- Selección técnica y análisis funcional de 15 máquinas automáticas de retorno de envases, adquiridas en propiedad y destinadas a un modelo de renting a supermercados.
- Análisis de estimaciones de uso de máquinas SDDR, para cálculo complementario de dimensionamiento de planta.
- Integración del tratamiento de latas de aluminio mediante compactación y posterior comercialización por peso, sin desarrollo de procesos metalúrgicos.
- Análisis preliminar de la logística de recolección, considerando la externalización del servicio y la estimación de volúmenes, frecuencias y costes asociados.
- Definición básica de recursos humanos a utilizar, limitada al número de empleados, roles y costes.
- Estimación de precios de mercado del material reciclado, sin desarrollar la gestión comercial de clientes finales.
- Estimación de ingresos en base al estudio de consumo y recepción de materia prima.
- Evaluación económica financiera preliminar del modelo, considerando la inversión inicial, costes operativos e ingresos por renting y venta del material reciclado.

En el Anexo 2 se pueden ver las limitaciones del proyecto, como también el plan futuro de crecimiento del mismo definido en plazos temporales acorde a su evolución.

5.3. Tendencias existentes en el mercado (línea secundaria)

Actualmente, la modalidad de sistemas de depósito, devolución y retorno (SDDR) no tienen gran relevancia. Máquinas innovadoras presentes en supermercados o instalaciones mixtas, que permiten al consumidor devolver sus envases a cambio de un pequeño retorno económico. Debido a la dinámica actual, desarrollada al comienzo, este tipo de máquinas no han sido protagonistas en España.

A pesar de esto, muy recientemente, el 1 de junio del 2025, por primera vez, se comenzó un proyecto donde este tipo de máquinas se han implementado para promover el reciclaje en España. Este proyecto tuvo lugar en Zangoza, comunidad autónoma de Navarra y fue impulsado por el departamento de desarrollo rural y medio ambiente de la comunidad (14). Los resultados de esta iniciativa han tenido resultados muy positivos, los datos técnicos ofrecidos por el mismo municipio representaron un retorno en torno al 75% de los envases recolectados.

Otros proyectos de reciente implementación de estos sistemas demuestran la alta eficacia en el proceso de recolección. Entre alguno de estos, se encuentra Letonia, que en tan solo dos años ha logrado una tasa de recuperación del 80%, según un informe de Tomra Systems (proveedora de SDDR) (15) y Lituania que ha logrado en su primer año un 74,3% de tasa de retorno y un 90% para fines del 2025 (16).

Estos resultados sirven de referencia para evidenciar que es un sistema ya probado en el mercado moderno y que, integrando la eficiencia de estos sistemas con la cadena de reciclaje, se puede lograr una mayor reintegración de plásticos reciclados en la cadena de producción. A pesar de que las conductas no sean exactamente las mismas, se pueden aproximar a un futuro escenario español, ya que se comparten características territoriales y a gran escala, países que se rigen con las mismas legislaciones.

Estos parámetros y valores, se utilizarán a la hora de realizar las estimaciones específicas que acuden a este proyecto. Valores de referencia para aproximar el porcentaje de recuperación de residuos y dimensionar instalaciones.

5.4. Análisis competitivo del proyecto

5.4.1. Análisis DAFO

Al establecer un proyecto que integra varios sistemas dentro de un mismo modelo de negocio, es fundamental realizar un análisis competitivo que contemple tanto los factores internos como los externos que puedan influir en su desarrollo y desempeño a lo largo del tiempo. Este tipo de evaluación permite obtener una visión global del entorno en el que operará la iniciativa.
Asimismo, este análisis actúa como uno de los primeros filtros para delimitar la viabilidad del proyecto, ya que facilita la identificación de los principales agentes, riesgos y oportunidades que incidirán directamente en su factibilidad técnica, económica y estratégica. De este modo, no solo se evalúan las fortalezas y debilidades internas del sistema propuesto, sino también las amenazas y oportunidades derivadas del entorno externo.
En este contexto, se ha elaborado un análisis DAFO del proyecto planteado, con el objetivo de estructurar y sintetizar de manera clara estos elementos clave, sirviendo como base para la toma de decisiones y el diseño de estrategias que permitan maximizar el potencial del proyecto y mitigar sus posibles limitaciones.

Tabla 1: Análisis DAFO.

Fortalezas	Oportunidades
Posicionamiento como *partner* industrial: • Integración en el sistema nacional de reciclaje como agente complementario. • Acceso a flujo estable y constante de PET y aluminio. Modelo de ingresos por valorización de residuos: • Participación directa en el valor generado por la venta del material reciclado. • Incentivos alineados con la eficiencia técnica y la calidad del producto final. Uso de tecnologías industriales probadas: • Empleo de maquinaria operativa y validada en el mercado. Menor riesgo tecnológico y mayor fiabilidad operativa. Alta homogeneidad del material procesado: • Residuos previamente clasificados por Ecoembes, complementado por las SDDR. • Mejora del rendimiento del proceso y del valor de mercado del PET y aluminio reciclado. Escalabilidad: • Posibilidad de ampliación modular para aumentar la capacidad de la planta. Alineación con objetivos de desarrollo sostenible: • Contribución directa a la protección del medio ambiente, mejora de tasas efectivas de reciclaje y reducción de uso de materia prima virgen. En el Anexo 7, se encuentra el cálculo de reducción de emisiones.	Capacidad limitada de reciclaje a nivel nacional: • Existe una diferencia significativa entre residuos gestionados y los realmente reciclados. • Necesidad de absorber los excedentes de PET y aluminio. Marco normativo favorable: • Objetivos crecientes de reciclaje y recuperación de residuos en la normativa nacional y europea. • Existen incentivos para empresas dedicadas a estas actividades. Creciente demanda de materiales reciclados: • La demanda de materiales reciclados para los próximos años aumenta significativamente respecto a la producción. Ampliación en conjunto: • El incremento de demanda o la necesidad de ampliación de capacidad puede desarrollarse de forma coordinada con Ecoembes según evolucione el proyecto. Línea secundaria de renting SDDR: • Modelo de negocio complementario con elevado potencial de expansión a nivel nacional. • Incremento significativo de ingresos asociado a la adopción creciente de este tipo de sistemas.
Debilidades	**Amenazas**
Alta inversión inicial: • Alto coste de maquinaria industrial, adecuación de la nave e implantación de las SDDR. Dependencia de acuerdos con Ecoembes: • El proyecto solo podrá ejecutarse una vez formalizada la colaboración como *partner*. • El volumen de entrada dependerá de la asignación y control de flujo por parte de Ecoembes. Costes fijos relevantes: • Gastos asociados a la nave industrial, consumo energético y salarios.	Variabilidad del precio de los materiales reciclados: • Las fluctuaciones del mercado obligarán a ajustar los precios de venta según el contexto económico. Dependencia de socio principal: • Los cambios estratégicos de Ecoembes afectarán directamente al funcionamiento de la planta. Riesgos logísticos y operativos: • Posibilidad de picos de entrada de material que superen la capacidad instalada. • Alta dependencia de planificación y coordinación entre ambas partes.

5.4.2. Beneficios para los supermercados por la adopción de sistemas SDDR

1. Cumplimiento normativo y reducción del riesgo regulatorio:

La implantación de sistemas SDDR permite a los supermercados alinearse con los objetivos legales de recogida y reciclaje de envases establecidos en el marco de la responsabilidad ampliada del productor. Esta medida reduce la exposición a futuras sanciones y a posibles incrementos de exigencias normativas. Además, facilita la adaptación anticipada ante escenarios regulatorios más restrictivos.

2. Optimización de la gestión interna de residuos:

La separación en origen realizada por las máquinas SDDR genera flujos de residuos homogéneos y de alta calidad. Esto disminuye la carga sobre los sistemas convencionales de gestión de residuos del establecimiento. Como resultado, se mejora la organización interna y se reducen incidencias operativas asociadas a la manipulación de envases.

3. Reducción del volumen y del espacio destinado a residuos:

La compactación de envases realizada por las SDDR reduce significativamente el volumen ocupado por PET y aluminio. Esta reducción permite optimizar el uso del espacio en zonas de almacenamiento interno y disminuir la frecuencia de retirada de residuos, mejorando la eficiencia logística.

4. Incremento del tráfico de clientes y fidelización:

Las SDDR actúan como un punto de atracción para los consumidores, incentivando visitas recurrentes al establecimiento. La devolución de envases suele estar asociada a beneficios económicos o promociones, lo que incrementa la probabilidad de compra. Este efecto contribuye a la fidelización de clientes y al aumento del tráfico en tienda.

5. Mejora de la imagen corporativa y del posicionamiento:

La adopción de sistemas SDDR refuerza el compromiso del supermercado con la sostenibilidad y la economía circular. Este posicionamiento resulta especialmente relevante en estrategias de marketing y de responsabilidad social corporativa. Además, mejora la percepción del establecimiento por parte de consumidores y entidades reguladoras.

6. Acceso a tecnología sin inversión inicial mediante renting:

El modelo de renting permite a los supermercados implementar sistemas SDDR sin necesidad de realizar una inversión inicial elevada. La cuota mensual facilita la planificación financiera y reduce el riesgo asociado a la adopción tecnológica. Este enfoque favorece la implantación del sistema en establecimientos de distinto tamaño.

5.5. Caracterización de la materia prima

A la hora de trabajar en la transformación de residuos, es muy importante conocer con precisión los materiales que se van a procesar. A pesar de que la mayoría de las botellas y latas en el mercado presentan composiciones similares, la proporción de polímeros y aditivos puede variar entre productos y fabricantes. Por ello, es necesario estudiar en detalle la materia prima que se utilizará en el proceso.

5.5.1. Tipología de residuos recolectados

Para estudiar la tipología de residuos que se recolectarán, se debe tener en cuenta que las máquinas SDDR están equipadas con escáneres capaces de reconocer envases mediante criterios como el peso, la forma o el código de barras. Esta tecnología permite aceptar únicamente envases previamente definidos, garantizando desde el origen una corriente de residuos altamente homogénea.

5.5.1.1. Envases de PET

La fracción de PET que se procesará está compuesta principalmente por:

- Botellas de bebidas (agua, refrescos, zumos).

- Botellas transparentes o ligeramente coloreadas.

El sistema de reconocimiento de las máquinas SDDR excluye otros tipos plásticos (HDPE, PVC, PP), así como envases multicapa, asegurando una tipología uniforme, controlada y adecuada para un proceso de reciclaje optimizado.

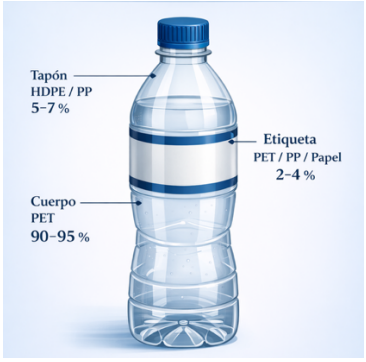


Figura 6: Composición en peso de polímeros de una botella típica de PET.

Características físicas y mecánicas:

1. Densidad y volumen
   - Densidad del PET ≈ 1,38 g/cm^3.
   - Bajo peso específico del envase vacío lo que se traduce en una alta relación volumen-peso.
2. Comportamiento en compactación:
   - Alta capacidad de reducción volumétrica por compactación.
   - Buen comportamiento frente a compactadoras y prensas verticales.
   - Baja recuperación elástica tras la compactación.
   - Estabilidad térmica y mecánica tras reciclado.

5.5.1.2. Envases de aluminio

La fracción aluminio está compuesta principalmente por:

- Latas de bebidas (refrescos, cerveza, bebidas energéticas).
- Envases monomateriales, sin aleaciones complejas.

Características físicas y mecánicas:

1. Densidad y ligereza:
   - Densidad del aluminio ≈ 2,7 g/cm^3.
   - Envases extremadamente ligeros y huecos.
2. Comportamiento en compactación:
   - Reducciones volumétricas superiores al 80-90%.

5.5.2. Composición del material

5.5.2.1. Composición del PET

Aunque el residuo se clasifica como PET, su composición real incluye:

- Cuerpo principal: PET (entre el 90 y 95% en peso).
- Tapa: normalmente HDPE o PP.
- Etiqueta: PET, PP o papel con adhesivos.
- Humedad residual: muy baja, limitada a gotas que queden retenidas en el interior. La tecnología de reconocimiento por peso no permite introducir botellas con líquidos en su interior.

5.5.2.2. Composición del aluminio:

La fracción de aluminio procedente de latas presenta la siguiente composición:

- Material principal: aluminio (entre el 98 y 99% en peso).
- Recubrimientos internos: barnices poliméricos alimentarios.
- Tinta exterior: capas muy finas, irrelevantes en términos de masa.

En conjunto, ninguno presenta limitaciones significativas para su almacenamiento, manipulación o procesamiento. No obstante, se tendrá en cuenta la composición específica de cada residuo en el diseño de la línea de reciclaje.

5.6. Estimaciones de flujo de entrada

Para el dimensionamiento de la maquinaria es necesario trabajar con unidades de caudal másico, definido como:

$$\dot{m} = \frac{peso(kg)}{tiempo(h)}$$

Una vez que el conjunto de equipos de la primera etapa esté funcionando a plena capacidad, se requiere establecer supuestos razonables que permitan estimar un flujo de entrada estable procedente de los dos sistemas de captación previamente definidos.

5.6.1. Estimación de captación mediante Ecoembes

Para obtener una estimación de la cantidad de residuos que Ecoembes podría destinar a las instalaciones del proyecto, se toman como referencia los datos analizados en la introducción:

$$Capacidad\ a\ cubrir\ PET = 118.138 \frac{toneladas}{año}$$

$$Capacidad\ a\ cubrir\ aluminio = 18.662 \frac{toneladas}{año}$$

Estas cifras representan alrededor del 25% de la capacidad instalada en España en la actualidad. Por tanto, no sería realista dimensionar la planta basándose directamente en dichos valores. Tras estudiar el número de plantas operativas en España y sus capacidades, se estima razonable cubrir alrededor del 10 % de la cuota de mercado no absorbida actualmente, proyectada hacia el horizonte temporal de 2030. Esto conduciría a las siguientes capacidades objetivo:

$$Capacidad\ propia\ PET = 11.814 \frac{toneladas}{año}$$

$$Capacidad\ a\ cubrir\ aluminio = 1.867 \frac{toneladas}{año}$$

Estas magnitudes servirán como referencia preliminar para el cálculo del caudal másico y el dimensionamiento de los distintos equipos que conformarán la línea de tratamiento.

5.6.2. Estimación de captación mediante clientes SDDR

Este estudio tiene como principal objetivo dimensionar la capacidad de las SDDR. Pero a su vez, servirá para poder estimar la captación de residuos por máquina en cada supermercado, flujo que complementará al de Ecoembes, proveniente de la línea de negocio secundaria. Para esto, se hará una

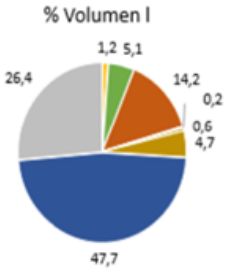
estimación en base a consumos y se ajustará con coeficientes acordes a la captación en países que recientemente hayan implementado esta metodología.

5.6.2.1. Estimaciones de consumo de plástico y latas

Según el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, el consumo per cápita del 2023 de todas las bebidas fue de 135,85 litros (17) cuya distribución porcentual en función del tipo de bebida se muestra en la Figura 8.

	Consumo doméstico de T.Bebidas	% Variación 2023 vs. 2022	% Variación 2023 vs. 2019
Volumen (miles l)	6.355.296,74	-0,7 %	1,0 %
Valor (miles €)	6.144.643,02	5,6 %	18,3 %
Consumo x cápita (l)	135,85	-1,8 %	-0,4 %
Gasto x cápita (€)	131,35	4,4 %	16,6 %
Parte de mercado volumen (%)	23,71	1,71	-0,06
Parte de mercado valor (%)	7,87	0,12	-0,28
Precio medio (€/l)	0,97	6,4 %	17,1 %

Figura 7: Resultados totales de consumo de bebidas(17).



% Evolución 2023 vs 2022	Valor	Volumen
TOTAL BEBIDAS	5,6%	-0,7%
BEBIDAS DERIVADAS VI	6,3%	-0,4%
TOTAL VINOS	1,0%	-4,5%
CERVEZAS	6,1%	-3,9%
SIDRAS	-8,0%	-9,2%
T.BEBIDAS ESPIRITUOSA	1,8%	-3,3%
TOTAL ZUMO Y NECTAR	6,7%	-5,8%
AGUA DE BEBIDA ENVAS.	8,5%	1,9%
GASEOSAS Y BEBID.REFR	8,1%	-1,7%

Figura 8: Porcentaje en volumen de residuos y variación del consumo 2022-2023 según tipo de bebida (17).

Con la información recogida en la figura, se plantean los siguientes supuestos:

- El "agua de bebidas envasadas" (47,7%) y la mitad de las "gaseosas y bebidas refrescantes", es decir, el 13,2% de su total de 26,4%, se asocia al consumo de botellas de plástico de un solo uso.
- La otra mitad de "gaseosas y bebidas refrescantes" (13,2% restante) y la mitad del consumo de "cervezas" (7,1% de su total de 14,2%) se asocia al consumo de latas de aluminio.
- Se considera un volumen medio de 0,75 litros por envase de plástico, acorde con las capacidades habituales del mercado.
- Se adopta un volumen medio de 0,4 litros por envase de aluminio, coherente con los formatos estándar de latas.

Con estas premisas, se calcula el consumo diario de este tipo de bebidas por persona:

$$Consumo\ envases\ PET = \frac{135{,}85 * (0{,}477 + 0{,}132)}{365 * 0{,}75} = 0{,}302\ envases\ diarios/hab$$

$$Consumo\ envases\ Aluminio = \frac{135{,}85 * (0{,}071 + 0{,}132)}{365 * 0{,}4} = 0{,}188\ envases\ diarios/hab$$

Los valores calculados evidencian consistencia y se encuentran dentro de intervalos razonables, alineados con comportamientos observados en escenarios reales. Estos se utilizarán como referencia para los volúmenes de recogida necesarios y efectivos para las máquinas SDDR. No obstante, con el objetivo de realizar estimaciones más precisas, es necesario considerar que los consumidores no concentran todas sus compras en un único establecimiento.

Por ello se utilizará el concepto de marketing de lealtad o "adhesión" del cliente. Según un artículo de *Puro Marketing* (18), basado en un informe global de Nielsen sobre "Fidelidad del Consumidor", el 77% de los españoles es completamente o muy leal a su establecimiento habitual, especialmente en el caso de las bebidas carbonatadas. Este permite estimar el porcentaje de consumo total que se realiza en un único supermercado. A efectos de modelización, se asume que el porcentaje de clientes leales se traduce en una proporción equivalente del volumen de compra, considerando que el 77% del consumo de bebidas se concentra en el supermercado principal. Los cálculos a efecto de la modelización para un supermercado individual y basados en los envases diarios estimados previamente, dan lugar a los siguientes resultados tanto para PET como para aluminio:

$$Venta\ PET\ por\ cliente = 0{,}302 * 0{,}77 = \ 0{,}233\ envases\ diarios/hab$$

$$Venta\ Aluminio\ por\ cliente = 0{,}188 * 0{,}77 = \ 0{,}145\ envases\ diarios/hab$$

5.6.2.2. Estimaciones de tráfico por supermercado

Con la información obtenida en apartados anteriores, se retoma el objetivo de estimar la capacidad de recolección por máquina SDDR. Una vez conocidos los envases diarios consumidos por cliente, el siguiente paso consiste en estimar el tráfico diario por instalación de supermercado tipo y ajustar posteriormente estos valores mediante la tasa de reinserción observada en países con reciente implementación de este sistema.

El tráfico diario de cada supermercado en Madrid dependerá principalmente de su localización. No obstante, para evitar un infra dimensionamiento de la máquina, se trabajará con el escenario de mayor tráfico. De este modo, para los supermercados con menor tráfico, al tener un menor flujo de entrada y misma capacidad, el tiempo de llenado de depósitos será mayor, lo que desencadenará en un ahorro final en costes logísticos.

Para iniciar la modelización, se toma como referencia un estudio específico sobre comportamiento de compra en supermercados. Este estudio asegura que el 99% de los consumidores acude al supermercado varias veces por semana, y que cada cliente realiza una media de 2,5 compras semanales (19). Transformado este valor a visitas diarias sería un total de 0,357 visitas por día.

Para aproximar la cartera potencial de clientes de un supermercado madrileño, se define su zona de afluencia. En Madrid existe una alta densidad urbana, donde los supermercados de proximidad son los centros de compra más comunes. Asumir los supermercados de proximidad como criterio de elección tiene como finalidad la simplificación del cálculo. Con los datos de residentes en Madrid (3.527.924 personas (20)) y el número aproximado de supermercados (2.200 (21)), se puede estimar una media de clientes por supermercado:

$$Media\ de\ clientes\ por\ supermercado = \frac{3.527.924}{2200} \cong 1604 \frac{clientes}{supermercado}$$

Dado que se trata de un valor medio y no se dispone de datos reales por establecimientos, se definen 3 escenarios, construidos de manera simétrica alrededor la media y con un valor límite inferior de 1000 clientes para supermercados de baja demanda, tal y como se muestra en la Figura 9.

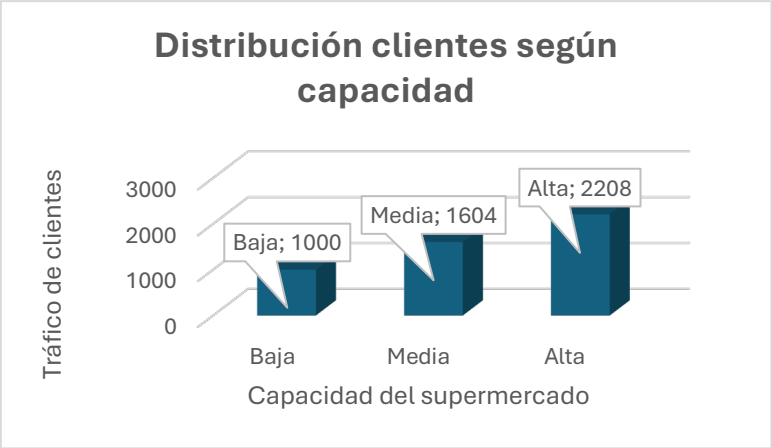


Figura 9: Distribución discreta de escenarios simétrica.

Tal y como se estableció al inicio, el dimensionamiento se realizará en función del escenario alcista para garantizar que la capacidad de la máquina SDDR no resulte insuficiente. De esta manera, la estimación se llevará a cabo utilizando el valor superior del rango (2208 clientes):

$$Tráfico\ diario\ por\ supermercado = 0{,}357 * 2208 \cong 789 \frac{clientes}{día}$$

5.6.2.3. Estimación de depósito

A continuación, se presenta la estimación del depósito diario por supermercado, aplicando los supuestos previamente definidos. Para ello, en primer lugar, se determina el volumen de venta diario para PET y para aluminio en el escenario alcista:

$$Venta\ PET = 789 * 0{,}233 \cong 184 \frac{botellas}{día}$$

$$Venta\ Aluminio = 789 * 0{,}188 \cong 149 \frac{botellas}{día}$$

Utilizando los porcentajes reales de reinserción de plásticos a través de estas máquinas observados en países con implantación reciente de sistemas SDDR (Latvia y Lituania) y el experimento piloto en Navarra, se adopta una tasa de retorno efectiva del 75%, obteniéndose los siguientes resultados:

$$Depósitos\ PET = 184 * 0{,}75 = 138 \frac{envases}{día}$$

$$Depósitos\ Aluminio = 149 * 0{,}75 \cong 111 \frac{envases}{día}$$

Con estos valores, calculados bajo las condiciones más exigentes de tráfico, será posible dimensionar técnicamente la capacidad mínima de almacenamiento de las máquinas SDDR. Estos datos formarán parte de la ingeniería de producto asociada a dichas máquinas. En términos operativos, las máquinas deberán ser capaces de almacenar la producción diaria estimada, manteniendo holgura suficiente para evitar saturación. Para ello, se asumirán un total de 15 máquinas SDDR en servicio en supermercados clasificados como de “alta capacidad”. De este modo, a partir de los depósitos diarios, se establecen los flujos de PET y aluminio.

Se escogen 15 máquinas para esta etapa, ya que esta cantidad, al precio de renting establecido, permite recuperar la inversión en un plazo aproximado a dos años. Un mayor número de máquinas incurriría en un riesgo más que moderado.

$$Flujo\ PET = 966 \frac{envases}{semana} * máquina$$

$$Flujo\ Aluminio = 777 \frac{envases}{semana} * máquina$$

Para transformar las unidades de materia prima a kilogramos, se asume una media de 22 gramos por g botella de PET (media entre botellas de 0,5 a 1,5 litros) y una media de 15 gramos por lata de aluminio (22).

$$PET = 966 \frac{envases}{semana} * 15\ máquinas * 0{,}022\ \frac{kg}{botella} \cong 319 \frac{kg}{semana} \cong 16{,}59 \frac{toneladas}{año}$$

$$Aluminio = 777 \frac{envases}{semana} * 15\ máquinas * 0{,}015\ \frac{kg}{botella} \cong 175 \frac{kg}{semana} \cong 9{,}1 \frac{toneladas}{año}$$

5.6.3. Flujos de entrada final

Considerando las dos fuentes principales de aporte de materia prima (la captación mediante Ecoembes y la línea secundaria de recogida mediante sistemas SDDR), se obtiene el flujo de entrada para cada tipo de residuo, resultando en un total de aproximadamente 11.831 toneladas/año de PET y 1.877 toneladas/año de aluminio. Para el correcto dimensionamiento de la planta, es necesario establecer un estándar de horas útiles, teniendo en cuenta los días operativos, turnos, descansos, tiempos de limpieza y la disponibilidad de la línea tal y como se muestra en la Tabla 2, basado en la guía de Ecoembes (23).

Tabla 2: Cálculo de horas útiles.

Estándar de horas útiles	
Días de trabajo/año	250
Horas/turno	8
Turnos	2
Tiempos de descanso/turno	0,5
Tiempos de limpieza/turno	0,15
Disponibilidad de la línea	95%
Horas útiles/año	**3491**

Teniendo las horas útiles calculadas (3491 horas), la capacidad de nominal se obtiene dividiendo el flujo total de entrada entre las horas útiles anuales:

$$Capacidad\ nominal = \frac{13.708}{3.491} \cong 3{,}93 \frac{toneladas}{hora}$$

Aplicando un factor de utilización del 0,9 para contar con margen de seguridad, se calcula la capacidad de diseño:

$$Capacidad\ de\ diseño = \frac{3{,}93}{0{,}9} \cong 4{,}37 \frac{toneladas}{hora}$$

Finalmente, para contemplar posibles picos de demanda y variabilidad en la alimentación, se incrementa ligeramente la capacidad objetivo, fijándolo en 4,5 toneladas por hora.

5.7. Ingeniería de producto: máquinas SDDR

5.7.1. Función del producto dentro del sistema

5.7.1.1. Función técnica principal

La máquina SDDR actúa como el punto de entrada de los residuos al sistema industrial, integrando al consumidor final de plásticos dentro de la cadena de reciclaje de PET y aluminio. Su función principal es captar, identificar, acumular y separar los envases post-consumo para su posterior transporte y tratamiento de reciclaje en planta. Este sistema cumple una función clave en la cadena ya que garantiza un flujo homogéneo de material que ingresará a la planta de reciclaje. Una de las mayores virtudes de este sistema es que incorpora el proceso de separación de residuos en origen, evitando costes de separación asociados a los métodos tradicionales de clasificación. La figura 10, muestra el diagrama de flujo interno del funcionamiento de este tipo de máquinas:

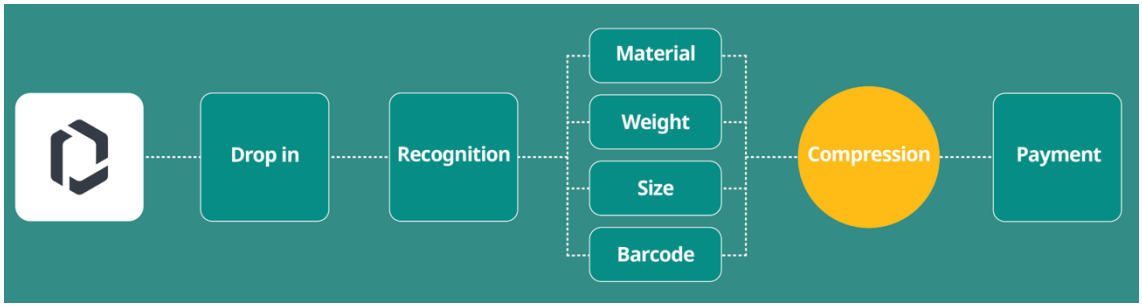


Figura 10: Diagrama de flujo de proceso interno (24).

5.7.1.2. Funciones técnicas específicas

1. Captación y recepción del material:
   - Recibe envases vacíos devueltos voluntariamente por el consumidor.
   - Actúa como interfaz con el usuario, imprimiendo el “vale de compra” o ticket asociado a la devolución.

2. Identificación y validación del envase:
   - El software verifica mediante escaneo 3D el formato aceptado del envase.
   - Ese mismo escaneo permite identificar el estado y condiciones del producto.

3. Almacenamiento y reducción volumétrica:
   - Compacta y almacena los envases, reduciendo su volumen y aumentando la capacidad útil de los depósitos.
   - Indirectamente optimiza costes de recolección y transporte, mientras que prepara el material para una manipulación industrial eficiente.

4. Trazabilidad y generación de datos:
   - La máquina permite registrar número de envases recogidos, tipo de material y producto, nivel de llenado y tiempos de operación.

5.7.2. Requisitos técnicos de las máquinas

Las máquinas SDDR deben cumplir una serie de requisitos básicos para alinearse tanto con las necesidades del proyecto como con las exigencias operativas de los supermercados. Estos requisitos son obligatorios para la selección de proveedores y la comparación entre modelos disponibles en el mercado:

- Consumo energético y eficiencia: se priorizarán máquinas que trabajen con una potencia máxima de 2,6 kW y un consumo en reposo de aproximadamente 70 W. Se adopta este criterio por analogía con equipos industriales de pequeña potencia (como cintas transportadoras o sistemas auxiliares), donde rangos de 2–3 kW permiten un funcionamiento continuo eficiente sin sobredimensionar la instalación eléctrica.
  Asimismo, un consumo en reposo reducido (70 W) es coherente con estándares de eficiencia en equipos eléctricos, minimizando pérdidas energéticas en periodos de inactividad.

- Dimensión máxima: 2 m^2 de sección máxima en superficie, debido a que la disponibilidad de espacio en cualquier supermercado tiene un valor relevante.

- Capacidad adecuada: una vez definida la estimación diaria de depósito, el principal criterio de selección será una capacidad de almacenamiento acorde a la demanda.

- Fiabilidad de la máquina: la presencia de su fabricante en el mercado hablará de la fiabilidad de sus productos. A pesar de no tener información exacta, modelos que se mantienen comercialmente durante años suelen haber superado filtros competitivos basados en rendimiento y durabilidad.

- Cumplimiento normativo: los fabricantes deberán tener sus productos certificados bajo la normativa europea de Directiva de Máquinas (2006/42/CE) y el respectivo marcado CE.

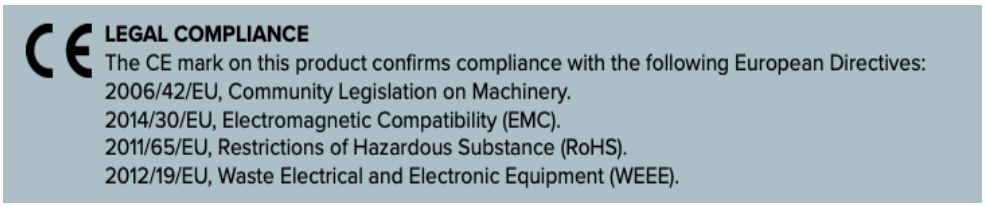


Figura 11: Normativas exigidas para maquinaria EU (25).

- Interfaz disponible: las máquinas no solo tienen que ser capaces de almacenar los residuos indicados, sino que deben contar con tener un interfaz que permita interactuar con el cliente, imprimir su ticket y que integre el software analítico para el supermercado.

5.7.3. Criterios de selección básicos

El criterio de selección estará basado en el cumplimiento de requisitos técnicos y el análisis de los precios ofrecidos. Los criterios con mayor peso en esta decisión serán la capacidad de la máquina, los tipos de envase que procese y el coste asociado. Para asegurar el criterio de fiabilidad anteriormente mencionado, se ha optado por recurrir a los tres fabricantes lideres en el mercado de las SDDR, localizados en Europa, por disminuir costes de importación y aduanas. Las empresas seleccionadas son: Tomra Systems, Sielaff GmbH & Co. KG, Returmatic y Trautwein. En el Anexo 5, se incluye una descripción detallada del perfil de cada empresa y sus soluciones.

5.7.3.1. Capacidad

El dimensionamiento de la capacidad de depósito, busca optimizar la logística, siendo ideal contar con un plan de recogida semanal como máximo. Por ello, se consideran los tamaños de los depósitos y la presencia de sistemas de compactación. Según los cálculos previos, la capacidad de almacenamiento de las máquinas debería permitir la acumulación de unos 966 envases PET y unos 777 envases de aluminio por semana. Por tanto, los modelos seleccionados de cada compañía deberán ser capaces de almacenar como mínimo estas cantidades.

5.7.3.2. Tipos de envases

La máquina deben procesar exclusivamente envases de PET y aluminio. Muchos modelos del mercado incluyen módulos para vidrio, equipados con tecnologías como *SoftRoll*, diseñadas para evitar roturas.
Sin embargo, dado que este proyecto no contempla la recogida de vidrio, la adquisición de sistemas preparados para dicho material incrementaría innecesariamente el coste, añadiría tecnología que no aporta valor e introduciría componentes no requeridos por el modelo de negocio.

5.7.3.3. Fiabilidad y coste

El análisis de fiabilidad de los modelos evaluados se apoya en los años de experiencia comercial de cada fabricante, la continuidad de sus líneas de producto y la confianza del mercado en sus equipos. Aunque no se cuente con indicadores técnicos exactos, esta aproximación es válida para un proceso de selección competitivo. Una vez definidos los modelos que cumplen los requisitos técnicos básicos de cada fabricante, la selección final se realizará en función de la mejor relación precio-calidad.

5.7.4. Selección del modelo

En este apartado, se estudiará el modelo más indicado de cada compañía, en función de su descripción general, las capacidades, tecnologías integradas, ventajas competitivas y requisitos de instalación para finalmente escoger uno. Antes de abordar cada fabricante es necesario aclarar una equivalencia habitual en la logística del reciclaje: el *Europallet*. Estas equivalencias dependen del formato del envase y del grado de compactación, pero los proveedores aproximan que 1 Europallet equivale a 1500 botellas de PET o a 6000 latas de aluminio.

En el Anexo 6, se incluye un resumen de cada uno de los modelos evaluados, junto con sus especificaciones técnicas más relevantes para el análisis comparativo, de cada una de las 4 empresas proveedoras escogidas.
Los modelos escogidos de cada una de las empresas se alinean con los criterios previamente desarrollados. Los modelos seleccionados son: Tomra T70 Dual, SiCompact XL, R20 y BottleComp Two.

En el análisis comparativo de las distintas alternativas de máquinas de retorno evaluadas, se observa en primer lugar que, en términos de aceptación de residuos, las cuatro opciones consideradas cumplen con los requisitos establecidos en el proyecto. Asimismo, todas ellas incorporan sistemas de compactación, lo que permite incrementar la densidad del material almacenado y, por tanto, optimizar la capacidad efectiva de sus depósitos.
En lo relativo a la capacidad de almacenamiento, los modelos SiCompact XL y T70 destacan por su elevado volumen, posicionándose como soluciones adecuadas en contextos de alta demanda. No obstante, este criterio debe analizarse conjuntamente con la flexibilidad operativa del sistema. En este sentido, la Returmatic R20 presenta una ventaja diferencial al combinar una capacidad significativa con una configuración modular de sus depósitos, permitiendo adaptar el volumen destinado a cada tipo de residuo en función de las necesidades específicas del cliente o de la variabilidad en los patrones de consumo.
Por otro lado, el análisis del espacio requerido para la instalación pone de manifiesto que los modelos BottleComp y el equipo de Sielaff no cumplen con las restricciones de superficie previamente definidas,

lo que limita su aplicabilidad en entornos como supermercados, donde la optimización del espacio disponible constituye un factor crítico para la implantación del sistema.

Como resultado de estas consideraciones, el análisis se centra en los modelos T70 y Returmatic R20, ambos capaces de satisfacer los requisitos técnicos fundamentales. Desde el punto de vista tecnológico, presentan prestaciones similares; sin embargo, la Returmatic R20 destaca por su menor consumo energético, tanto en régimen operativo como en estado de inactividad, lo que repercute directamente en la eficiencia global del sistema.
Adicionalmente, la capacidad configurable de la Returmatic R20 permite ajustar dinámicamente el volumen de almacenamiento en función de la demanda real, evitando sobredimensionamientos y mejorando la gestión logística. Esta modularidad facilita la reconfiguración interna del equipo ante cambios en los hábitos de reciclaje, aportando una mayor resiliencia operativa y una ventaja competitiva frente a soluciones más rígidas.
En consecuencia, la combinación de flexibilidad operativa, eficiencia energética, adaptabilidad a distintos entornos de implantación y optimización logística posiciona a la Returmatic R20 como la alternativa más adecuada para su integración en el sistema propuesto.

5.8. Diseño del proceso productivo, selección y dimensionamiento

5.8.1. Criterios básicos de diseño

Dentro de los criterios de diseño, se identifican una serie de características que condicionarán la elección de la maquinaria. Algunos de estos criterios serán no negociables, mientras que otros deberán ajustarse lo máximo posible a un estándar óptimo para el funcionamiento eficiente de la planta.

1. Función técnica: las máquinas deben de cumplir con un objetivo específico en la cadena de reciclaje para obtener el producto final deseado. No se contemplarán procesos ni equipos innecesarios, y toda la maquinaria deberá estar estrictamente orientada a procesar los tipos de residuos definidos en el proyecto.
2. Capacidad: constituye el criterio más relevante. Las instalaciones no pueden ser infradimensionadas, ya que ello comprometería el rendimiento operativo. En caso de no suponer un incremento de precio significativo se podrá sobredimensionar moderadamente, siempre que esté técnicamente justificado.
3. Eficiencia energética: se priorizarán equipos de bajo consumo, alineados con los objetivos de sostenibilidad del proyecto. Este será un factor relevante ya que, además, repercutirá en los costes variables de la planta.
4. Tamaño: el diseño del *layout* debe favorecer un flujo direccional claro y eficiente del material a lo largo de la planta. Para ello, será necesario que el tamaño de las máquinas se adapte a las restricciones físicas del recinto y permita configurar un circuito de procesos funcional y seguro.
5. Vida útil: se priorizarán equipos con una mayor vida útil, siempre en equilibrio con el criterio económico. El objetivo es seleccionar maquinaria que ofrezca una relación coste-valor favorable.
6. Criterios de seguridad: todas las máquinas deberán cumplir la normativa principal en materia de seguridad industrial. En concreto, deberán ajustarse a la Directiva CE 2006/42, transpuesta en España mediante Real Decreto 16644/2008 (26), que establece los requisitos esenciales para que una planta pueda trabajar legalmente en la planta.

5.8.2. Procedimiento para la selección

Teniendo en cuenta estos criterios, el procedimiento para el diseño y selección de la maquinaria de la planta se estructurará de la siguiente manera:

1. Recapitular la capacidad de diseño.
2. Definir un flujo general de proceso.
3. Seleccionar la maquinaria adecuada para dichos procesos.
4. Diseño del *layout* de la planta.

5.8.3. Capacidad instalada y escalabilidad

Retomado la capacidad instalada de la planta, esta se dimensiona en función del estudio de mercado y de la cuota futura que se pretende cubrir. Tal y como se detalla en el apartado 5.3.3, los cálculos de capacidad de diseño, bajo las condiciones laborales establecidas en el mismo punto, conducen a una capacidad de diseño de 4,5 Tm/h.

Para garantizar el procesamiento de este flujo másico, cada máquina deberá dimensionarse con una capacidad mínima equivalente. Además, lo ideal es dimensionar cada uno de los agentes de la planta con una capacidad igual o similar, para evitar tener máquinas con capacidad ociosa. Una capacidad homogénea en el sistema de máquinas que conformarán la planta es clave para garantizar un flujo estable y evitar cuellos de botella en el procesamiento del reciclado.

Los cálculos de capacidad de diseño se han realizado tomando como referencia la previsión de crecimiento del consumo a 2030, por lo que el diseño de la planta cubrirá los objetivos de procesamiento establecidos para mantener un aporte proporcional acorde a las tasas de reciclaje proyectadas para los próximos años. Una vez alcanzado este horizonte temporal, la escalabilidad de la planta se puede plantear como plan de mejora para plazos posteriores a 2030. Por esta razón, la selección de la ubicación de la planta contemplará una superficie adicional disponible, que permitirá ampliar la capacidad instalada de acuerdo con los objetivos definidos en el apartado 2.7.2.3 a medio plazo.

5.8.4. Diagrama general del proceso

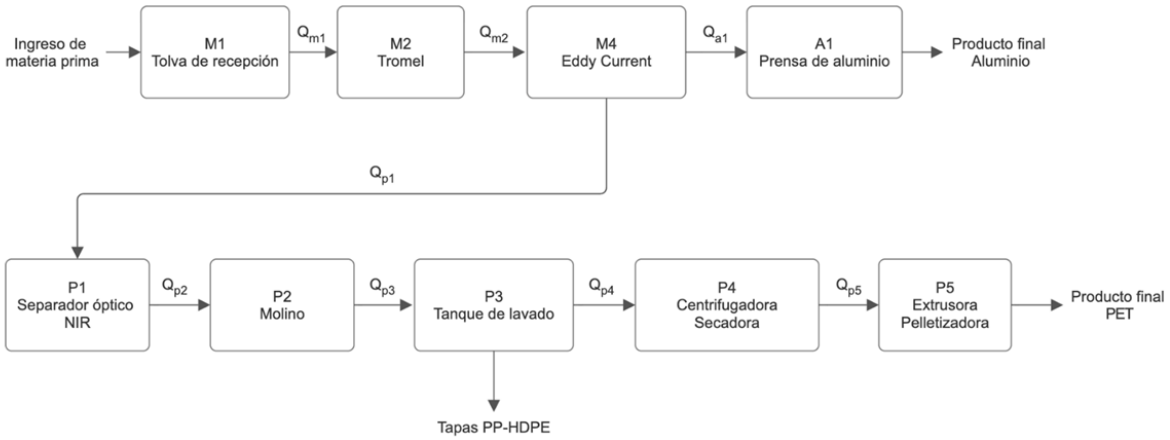


Figura 12: Diagrama general del proceso (maquinaria). Elaboración propia.

Definición de los flujos:

- Qm1: Flujo regulado y estabilizado de materia prima mixta (plástico y aluminio).
- Qm2: Flujo mixto con separación granulométrico (finos y suciedad eliminada).
- Qa1: Flujo de aluminio puro.
- Qp1: Flujo de plástico puro.
- Qp2: Flujo de plástico semi-purificado a PET (eliminación química de otros polímeros).
- Qp3: Flujo de PET semi-purificado en astillas de 12 mm.
- Qp4: Flujo de PET purificado por diferencia de densidades en tanque.
- Qp5: Flujo de PET con humedad menor al 1%.

5.8.5. Maquinaria para reciclaje de PET

Teniendo en cuenta los criterios definidos en apartados anteriores, la selección de la maquinaria se dividirá en dos partes: identificación de funciones y selección específica del equipo.

5.8.5.1. Playa de descarga

La playa de descarga será el área destinada a la recepción y almacenamiento temporal de los residuos transportados por los vehículos de recolección. Este área consistirá en un galpón cubierto y cerrado, desde el cual los equipos de alimentación recogerán el material para introducirlo en la línea de proceso. Estimando un aprovisionamiento de residuos para dos días de producción considerando la capacidad de diseño, 16 h de trabajo al día (dos turnos de 8h), una densidad del residuo de 50 kg/m^3 y una altura máxima de acumulación de 3 metros por razones de seguridad, se puede estimar la superficie necesaria de la siguiente forma:

$$Superficie\ de\ la\ playa = \frac{4{,}5\ \frac{Tm}{h} * \frac{1000\ kg}{1\ Tm} *\ 32\ h}{3\ m *\ 50\ \frac{kg}{m^3}} = 960\ m^2$$

Esta superficie deberá estar disponible en la ubicación seleccionada, garantizando un acceso directo y eficiente hacia la cadena de procesos.

5.8.5.2. Tolva de recepción y cinta transportadora metálica

La función principal de estos dos equipos es la de alimentación a la cadena de reciclaje. Este sistema estará compuesto por la tolva, que regulará y dosificará el caudal en régimen continuo, mientras que la cinta transportadora, funcionará como sistema de traslación. Esta llevará los residuos desde el punto de depósito hacia el primer equipo de la cadena.

5.8.5.3. Tolva de recepción

La tolva se diseñará con capacidad suficiente para dos depósitos de una excavadora hidráulica de agarre para chatarra, como la mostrada en la Figura 13.



Parámetros principales

Largo ancho alto	7200*2500*3000mm
Capacidad de agarre	0,8-0,9 t
Ángulo de rotación de la garra	360°
Potencia nominal	93KW
Peso de la máquina	12500KG

Figura 13: Excavadora de agarre de chatarra (27).

Según las especificaciones del fabricante, esta máquina tiene una capacidad de agarre de 0,8 toneladas, por tanto, teniendo en cuenta que la capacidad de diseño es de 4,5 toneladas a la hora. En una hora aproximadamente tendrá que hacer 6 operaciones, lo que equivale a una operación cada 10 minutos.

La tolva deberá tener un ángulo mínimo de inclinación de 70º de inclinación en la arista de los diedros que conforman la estructura, ya que pendientes inferiores pueden generar atascos en el efecto embudo. La tolva funcionaría con la inclinación tal como muestra el esquema de la Figura 14, pero con una única cinta transportadora.



Figura 14: Sistema de alimentación propuesto (28).

Se dimensionará la tolva en relación a la alimentación definida y estableciendo márgenes industriales que aseguren el correcto funcionamiento y flujo continuo de materia, evitando atascos y acumulación de material. Teniendo en cuenta la capacidad de agarre (0,8 Tm) y la densidad de los residuos (50 kg/m^3), la capacidad requerida para la tolva es de 16 m^3:

$$Capacidad\ requerida = \frac{800}{50} = 16\ m^3$$

Aplicando un margen industrial de un 25%, la capacidad final de la tolva es de 20 m^3, lo que garantiza una operación continua sin interrupciones. Teniendo en cuenta esta capacidad, el mercado ofrece opciones adaptables al requerimiento del comprador. Un producto que se adecúa a esta necesidad es el siguiente, de la compañía Mecalsa (Figura 15), diseño apto para capacidad de carga entre 12-20 m^3.



Figura 15: Tolva de recepción de materia, Mecalsa (29).

5.8.5.4. Cinta transportadora

La cinta transportadora será de placas metálicas tipo *Pan Conveyor*, adecuada para materiales ligeros y voluminosos como los envases PET y aluminio. Este sistema está compuesto por dos ejes (uno impulsor y el otro de retorno), cada uno equipado con coronas dentadas en cada extremo que arrastran las cadenas del sistema de rodadura que soporta las placas. Un esquema del sistema de transporte propuesto se muestra en la Figura 16.

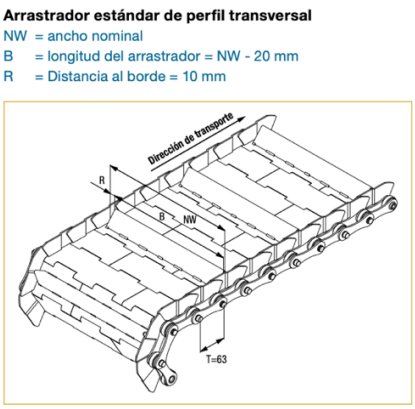


Figura 16: Sistema de placas metálicas propuesto (30).

Las paredes laterales actúan como bordes de contención, evitando pérdidas de material durante la alimentación procedente de la tolva. En el eje impulsor se acoplará un motorreductor, responsable de transmitir el movimiento al tambor y, mediante las cadenas, al conjunto de placas metálicas, tal como se observa en la Figura 17.

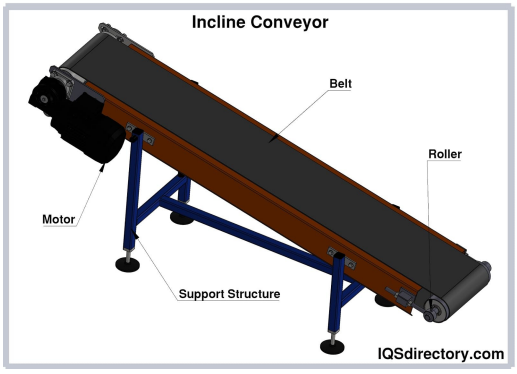


Figura 17: Esquema de ubicación de tambor impulsor (31).

Además, el sistema contará con arrastradores planos, que permiten separar el flujo en secciones más pequeñas, gracias a la inclinación de los mismo. En la Figura 18, se muestra un corte transversal del sistema de placas metálicas con arrastradores planos.

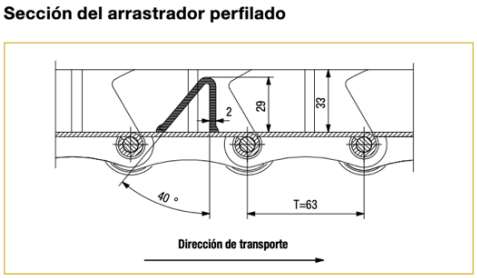


Figura 18: Sección del arrastrador (30).

Para el cálculo del área efectiva de la cinta transportadora, en primer lugar se determina el caudal volumétrico a partir del caudal másico de residuos (4,5 Tm/h, o lo que es lo mismo, 4500 kg/h).

$$Q_v = \frac{Q_m}{\rho}\frac{4500}{50} \cong 0{,}025\frac{m^3}{s}$$

La cinta se instala con una inclinación de 40º para que los residuos se separen mediante los arrastradores, lo que reduce la sección efectiva. Asumiendo una reducción del 25% de la capacidad operativa, se determina el área efectiva según la siguiente ecuación.

$$A_{efectiva} = \frac{Q_v}{v * 0{,}75}$$

Donde v corresponde a la velocidad de la cinta transportadora, fijada en 0,4 m/s, valor seleccionado para garantizar que los residuos dispongan del tiempo suficiente para desplazarse adecuadamente entre las secciones generadas por los arrastradores. Sustituyendo:

$$A_{efectiva} = \frac{0{,}025}{0{,}4 * 0{,}75} \cong 0{,}09\ m^2$$

Suponiendo una altura media (h) de los residuos en la cinta de 0,15 m, se procede a calcular el ancho de la cinta:

$$An_{cinta} = \frac{0{,}09}{0{,}15} = 0{,}6\ m$$

Debido a que no se utiliza el ancho completo (bordes, arrastradores, contención), se aplica un factor de ajuste, obteniendo $An_{min} = 0{,}8\ m$. Con base en estos cálculos, se recurre al catálogo ofrecido por Allert, proveedor industrial de este tipo de cintas (véase Figura 19) ("Paso 63, con arrastrador perfilado [NW:800]"):

NW mm Ancho nominal Tolerancia ±2,0 mm	NB mm Ancho útil Tolerancia ±2,0 mm	B1 mm Ancho exterior Tolerancia ±2,0 mm	B2 mm Distancia entrecentros cadena Tolerancia ±1,5 mm	B3 mm Anchura total máxima Tolerancia ±2,0 mm	Peso kg por metro lineal
200	194	205	246	304	20,5
250	245	256	296	354	22,3
300	295	306	346	404	24,1
350	345	356	396	454	25,9
400	395	406	446	504	27,7
450	445	456	496	554	29,5
500	495	506	546	605	31,3
550	545	556	596	654	33,1
600	595	606	646	704	34,9
650	645	656	696	754	36,7
700	695	706	746	804	38,5
750	745	756	796	854	40,3
800	795	806	846	904	42,1
850	845	856	896	954	43,9
900	895	906	946	1.004	45,7
950	945	956	996	1.054	47,5
1.000	995	1.006	1.046	1.104	49,3
1.050	1.045	1.056	1.096	1.154	51,1
1.100	1.095	1.106	1.146	1.204	52,9
1.150	1.145	1.156	1.196	1.254	54,7
1.200	1.195	1.206	1.246	1.304	56,5

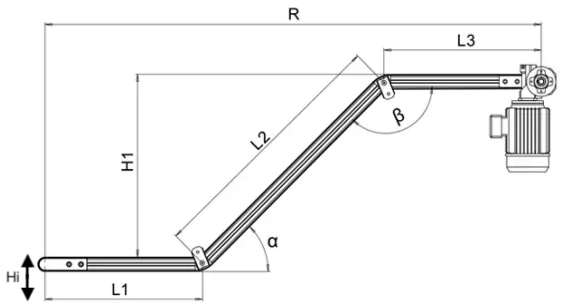
Anchos nominales mayores bajo pedido.

Figura 19: Catálogo Allert. Con un recuadro en rojo se destacan las especificaciones correspondientes al ancho seleccionado (30).

Siguiendo el esquema de la Figura 17, la cinta se instalará en altura, comenzando a 1 metro con respecto del suelo, y ascendiendo hasta 3 metros sobre el nivel del suelo, es decir, 2 metros de desnivel con respecto a la entrada. Teniendo en cuenta la inclinación de la cinta y la altura deseada, el largo se calcula de la siguiente manera:

$$Largo = \frac{2}{sen(40º)} \cong 3{,}11\ m$$

A este tramo habrá que sumarle el tramo plano donde la tolva deposita su material (L1) y el tramo de descarga (L2) tal y como se muestra en la Figura 20, lo cual implicará un aumento 2 metros y 1 metro, respectivamente. De este modo, el largo total resulta asciende a 6,11 metros.



$H_i = 1\ m$
$H_1 = 2\ m$
$L_1 = 2\ m$
$L_2 = 3{,}11\ m$
$L_3 = 1\ m$
$\alpha = 40º$

Figura 20: Sistema acotado de carácter ilustrativo (32).

El proveedor suministrará las estructuras de soporte con el diseño conforme a normativa para trabajos en altura. Aunque el proveedor suministra el motor ya dimensionado para el sistema solicitado, se realiza una comprobación técnica condierando un caudal másico de 1,25 kg/s equivalente a 4500 kg/h.

$$P_{mínima} = Q_m * g * H_1 = 1{,}25 * 9{,}81 * 2 = 24{,}5\ W$$

Incluyendo pérdidas por fricción y rozamiento, rendimiento del motor eléctrico y coeficientes industriales, se estima una potencia mínima de entre 0,1 y 0,25 KW.

5.8.5.5. Trómel de clasificación

La función de esta máquina en la cadena es de mediante un cribado por tamaño, retener las piezas grandes y dejar pasar fracciones pequeñas a través de sus orificios. De este modo, realiza una clasificación granulométrica, eliminando del flujo fracciones finas, como roturas de tapones, suciedad suelta y restos, y manteniendo en el tambor solo las fracciones de interés para las etapas posteriores. Este equipo realiza una limpieza previa a la separación magnética, evitando sobrecargar a los demás equipos.
Otra función importante que cumple es la de descompactar el material proveniente de la playa de descarga. Este puede haber sido compactado por la misma presión de los residuos que tiene encima, o por el transporte hasta la planta. En conjunto, todas estas funciones convierten al trómel en un módulo de acondicionamiento previo fundamental para el proceso.

El trómel seleccionado deberá cumplir las siguientes especificaciones:

- Trómel de finos: trómel con material cribante de baja luz de malla, diseñada para filtrar únicamente material de pequeño tamaño (40-60 mm).
- Dos flujos de salida: uno pasante y el otro de rechazo. El flujo de rechazo que es la fracción útil debe ser guiado mediante una tolva inferior hacia el siguiente depósito o etapa del proceso.
- Inclinación de trabajo: Según *Edge Innovate* (33), plataforma especializada en tecnologías de cribado, estos equipos deben trabajar con una inclinación de 5º ya que favorece el avance del material y el rendimiento de clasificación.



Figura 21: Factores que afectan la operación de cribado (33).

El siguiente aspecto a determinar es la velocidad de giro del tambor y el tiempo de residencia del material en el interior del trómel. Para ello, se selecciona un modelo comercial compatible con el caudal volumétrico definido ($Q_v = 0{,}025\ m^3/s$) y que cumpla con los requisitos operativos del proceso.
Con las dimensiones de un equipo disponible en el mercado, se procederá a realizar los cálculos necesarios para definir su velocidad de trabajo y comprobar si el modelo es capaz de adaptarse al flujo de la cadena. En este sentido, la Figura 22 muestra diferentes modelos de trómel.

Technical Specifications

Model	Specification	Diameter	Rotating speed (rpm)	Power (kW)
GTS1230	Φ1.2x3	Φ1200	12-17	4-5.5
GTS1530	Φ1.5x3	Φ1500	12-17	5.5-11
GTS1550	Φ1.5x5	Φ1500	12-17	11-15
GTS1850	Φ1.8x5	Φ1800	10-15	11-18.5
GTS2060	Φ2.0x6	Φ2000	10-15	18.5-22
GTS2580	Φ2.5x8	Φ2500	10-15	22-38

Note: Technical specifications may change without notice due to ongoing technological advancements.



Figura 22: Modelo GTS1850, Catalogo solicitado GEP ECOTECH (34).

Para los cálculos de aproximación del trómel se toma como referencia el Modelo GTS1850, cuyas especificaciones técnicas se resumen a continuación:

- Diámetro: 1,8 m.
- Longitud: 5 m.
- Velocidad nominal: 11-18,5 rpm.
- Potencia: 11-18,5 kW.

A partir de estos valores, se determina la velocidad crítica de la siguiente manera:

$$N_c = \frac{42{,}3}{\sqrt{D}} = \frac{42{,}3}{\sqrt{1{,}8}} \cong 31{,}5\ rpm$$

En línea con el artículo de *Edge Innovate (33)*, la eficiencia del cribado aumenta a medida que se incrementa la velocidad rotacional del tambor, alcanzando su rendimiento óptimo cuando opera en el 50-60 % de su velocidad crítica. Superar este umbral puede generar problemas como pérdida de capacidad de cribado, reducción del tiempo de residencia o incluso fenómenos de centrifugado. No obstante, para realizar un análisis conservador y asegurar la estabilidad operativa del equipo, se adoptará un valor equivalente al 35 % de la velocidad crítica para los cálculos de dimensionamiento lo que equivale a una velocidad de aproximadamente 11 rpm, la cual se encuentra dentro de los valores de velocidad nominal del modelo de referencia.
A partir de este valor, se determina la velocidad tangencial del tambor:

$$v_t = \frac{\pi * D * N}{60} = \frac{\pi * 1{,}8 * 11}{60} = 1{,}04 \frac{m}{s}$$

Esta velocidad tangencial es adecuada para el tratamiento de residuos ligeros, como los envases de PET y aluminio, ya que evita efectos de centrifugado y favorece una separación granulométrica efectiva.

El volumen del trómel se puede determinar a partir de sus dimensiones:

$$V = \pi * \frac{D^2}{4} * L = \pi * \frac{1{,}8^2}{4} * 5 = 12{,}7\ m^3$$

Aunque estos equipos se caracterizan por tener un volumen elevado, suelen trabajar aproximadamente con un porcentaje de llenado cercano al 20%, lo que resulta en un volumen efectivo de 2,54 m^3 que correspondería con 127 kg de residuos considerando una densidad de los mismos de 50 kg/m^3. Dado que el caudal másico de residuos es de 1,25 kg/s esto supondría un tiempo de residencia del flujo de residuos dentro del trómel de 101,6 segundos o 1,7 minutos.

Todos los valores calculados se encuentran dentro de los rangos operativos lógicos para este tipo de equipos. La velocidad de trabajo, situada dentro del intervalo nominal del fabricante, garantiza un funcionamiento estable. El tiempo de residencia obtenido permitirá procesar el caudal másico requerido y garantiza que el cribado se realice adecuadamente. Asimismo, la velocidad tangencial calculada evita el fenómeno de centrifugado, asegurando que el material caiga libremente dentro del tambor y que la operación de cribado mantenga su eficiencia. Por tanto, se confirma que el modelo de referencia GTS1850 de GEP ECOTECH es adecuado para las necesidades de la planta. En caso de que la demanda aumente en el futuro, el equipo además permite ajustar la velocidad de rotación y modificar el grado de llenado, lo que permitiría absorber incrementos de caudal sin comprometer el rendimiento del proceso.

5.8.5.6. Eddy Current – Separador de inducción

La función de este equipo es seleccionar y separar los materiales metálicos no magnéticos, en este caso, las latas de aluminio. Es fundamental en el proceso propuesto, ya que permite dividir los dos flujos de materiales, para poder reciclarlos por separado. Este proceso se basa en el fenómeno de inducción de Foucault, en el cual se crea un campo magnético alternativo, dado que los polos varían su posición. De este modo, si un material no férrico está sometido a un campo magnético, se generan corrientes internas de Foucault. Consecuentemente se genera un campo magnético que produce la repulsión de los materiales no férricos, desviando su trayectoria tal y como se muestra en la Figura 23.

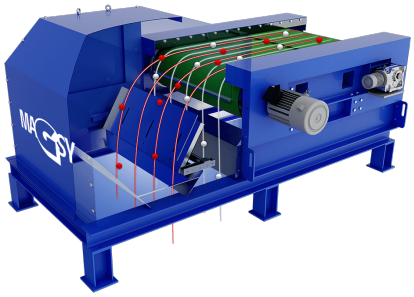


Figura 23: Esquema separación de flujos Eddy Current (35).

Para dimensionar el separador de inducción hay que tener en cuenta que los equipos disponibles en el mercado presentan características estandarizadas, operando dentro de rangos de trabajo muy similares entre fabricantes. Con el fin de identificar estos rangos de trabajos, se toma como referencia el glosario de equipos de plantas de reciclaje publicado por Ecoembes (35), del cual se extraen los siguientes parámetros operativos típicos:

- Velocidad de la cinta entre 2 y 2,5 m/s.
- Velocidad mínima del rotor de 3.000 rpm.
- Longitud mínima del separador entre rotores de 2.000 mm.

Teniendo en cuenta estos rangos, se procederá a dimensionar los parámetros restantes del separador de inducción, adaptándolos al caudal y flujo de material definidos para el sistema.

1. Sección necesaria de cinta: Se asume una velocidad de trabajo promedio de 2 m/s y se mantiene el flujo volumétrico estimado (0,025 m^3/s).

$$A = \frac{Q_v}{v} = \frac{0{,}025}{2} = 0{,}0125\ m^2$$

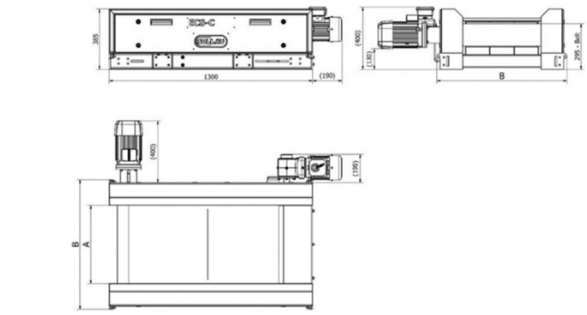
2. Ancho útil necesario: Teniendo en cuenta que, para los separadores de corrientes de Foucault, el espesor debe ser bajo para buena eficiencia (30-80 mm), se adopta un valor medio de 50 mm para el cálculo.

$$Ancho = \frac{0{,}0125}{0{,}05} = 0{,}25\ m$$

Este valor corresponde con el ancho mínimo teórico. No obstante, para garantizar un funcionamiento seguro, se aplica un factor de seguridad de 1,8. Por tanto, el ancho mínimo recomendado sería de 0,45 m.

Con toda esta información y, en función de los equipos disponibles en el mercado, se selecciona el modelo ECS-500 RAM (36), cuya ficha técnica se muestra en la Figura 24.

Datasheet ECS-C 500 RAM



Model	Belt width (mm)	Weight (kg)	A (mm)	B (mm)
ECS-C 500 RAM	500	400	500	830

Figura 24: Extracto de ficha técnica de modelo escogido (36).

Utilizando el espesor de banda previamente establecido, de debe comprobar que la capacidad del mismo permite procesar el flujo de materiales que se pretende tratar.

1. Área disponible:

$$A = 0{,}5 * 0{,}05 = 0{,}025\ m^2$$

2. Capacidad volumétrica máxima:

$$Q_{max} = A * v\ = 0{,}025 * 2\ = 0{,}05 \frac{m^3}{s} = 180 \frac{m^3}{h}$$

Cuando la planta procesa 90 m^3/h , el separador estaría trabajando al 50% de su capacidad, manteniendo una capa fina que permite asegurar una alta eficiencia, pudiendo además admitir picos de carga. Como se observar en el extracto de la ficha técnica mostrado en la Figura 26, el equipo seleccionado cumple con los requisitos de velocidad de la cinta y velocidad mínima del rotor:

Motor brand:	Nord
Motor input (magnetic rotor = Eddy current)	1,5 kW, 230/400 V AC, 50 Hz
Motor input (conveyor belt drive):	0,75 kW, 230/400 V AC, 50 Hz
Eddy current magnetic rotor speed:	3 000 rpm
Degree of motor protection (against dust and water):	IP55
Speed of the separator belt (m/s):	0-2 m/s
Type of the separator belt:	PVC belt P25-14A (green)

Figura 25: Extracto de ficha técnica de modelo escogido (36).

5.8.5.7. División de flujo

Una vez que el separador de corrientes de Foucault haya desviado los materiales no férricos, se obtendrán dos flujos másicos distintos. Para estimar el flujo másico correspondiente a cada uno de ellos en las etapas posteriores, es necesario remitirse a las proporciones del apartado 5.3.3, de donde se puede extraer que los residuos de PET representan aproximadamente el 86 % en peso del total, mientras que las latas de aluminio constituyen el 14 % restante. Asumiendo un flujo ajustado de 4,5 toneladas/hora, los caudales másicos correspondientes serían de 3,87 Tm/h para el PET y 0,63 Tm/h para el aluminio

Por lo tanto, los flujos de ambos circuitos se ven modificados. Entendiendo que el pulpo metálico puede recoger proporciones distorsionadas del material, se adopta un criterio conservador para el dimensionamiento de cada línea. En este sentido, el flujo para el circuito de PET se mantendrá en 4,5 t/h asumiendo el caso extremo de que la garra coja en su totalidad plástico, mientras que el flujo de aluminio se dimensionará para 2 t/h, garantizando así un margen de seguridad amplio frente a posibles desviaciones en las proporciones reales del residuo.

5.8.5.8. Prensa de aluminio

Como el producto final ofrecido es un compacto de aluminio, se requiere incorporar una prensa que permita comprimir los residuos de este tipo. Este tipo de equipos están muy estandarizados en el mercado, por lo que tan solo con el flujo de entrada, se selecciona un modelo que cumpla con esta especificación y se comprobará su adecuación al sistema propuesto. El modelo seleccionado es Enerpat AMB-L1480-160 (37), cuya ficha técnica se muestra en la Figura 26.

Modelo	AMB-L1480-160
Fuerza de prensa	160 toneladas
Cámara de Prensa	1400x800x700mm
Potencia del motor	22 kilovatios
Bomba	160 m/h
Tamaño de la paca	350x350mm
Capacidad (acero)	2,0-2,5 toneladas por hora



Figura 26: Ficha técnica Enerpat AMB-L1480-160 (37).

Para verificar que este equipo se ajusta a las necesidades operativas de la planta, en primer lugar hay que evaluar la densidad de las latas a la salida del separador de corrientes de Foucault, para lo cual se asume una densidad media de 100 kg/m^3. Además, se debe tener en cuenta que los compactos industriales de aluminio alcanzan densidades típicas del orden de 700 kg/m^3. Considerando un caudal másico de entrada de 2000 kg/h, se calcula el caudal volumétrico de latas de aluminio a prensar.

$$Q_v = \frac{2000}{100} = 20\frac{m^3}{h}$$

Por tanto, la prensa deberá procesar 20 m^3/h de latas separadas por el separador de corrientes de Foucault. Para determinar el volumen real de la bala, a pesar de no tener la altura especifica de esta prensa, se adopta un valor de 0,5 m, habitual en prensas industriales. Con este valor y utilizando la sección indicada en la ficha técnica del fabricante, se obtiene un volumen de bala de aluminio de 0,06125 m^3. Considerando una densidad media del aluminio compacto de 700 kg/m^3, el peso resultante es de aproximadamente 43 kg por bala. Dado que la planta debe procesar 2.000 kg/h de aluminio, la prensa deberá ser capaz de producir aproximadamente 46 balas por hora, lo que equivale a un tiempo de ciclo de

aproximadamente 1,3 minutos por bala. Este valor se encuentra dentro del rango industrial habitual para prensas de aluminio, que suele situarse entre 60 y 120 segundos por ciclo, por lo que el rendimiento obtenido se ajusta correctamente a los sistemas disponibles en el mercado.
Por último, se debe comprobar que el volumen de la cámara es suficiente. Teniendo en cuenta las dimensiones de la cámara (1400x800x700 mm), se puede establecer un volumen útil de 0,784 m^3. Por otra parte, en función del peso unitario de una bala (43 kg) y la densidad del aluminio a la entrada (100 kg/m^3), el volumen de material a compactar por ciclo sería de 0,43 m^3. Si se compara el volumen útil de la cámara con el volumen requerido por cada bala, se observa que la cámara puede albergar prácticamente el doble del volumen necesario. Esto permitirá realizar una compactación progresiva, evitar problemas asociados a un llenado insuficiente y garantizar capacidad adicional en caso de producirse picos de demanda. Por tanto, la prensa seleccionada cumple con los requisitos necesarios.

5.8.5.9. Separador óptico NIR

Este equipo se encarga de la separación automática por tipo de polímero, identificando y expulsando aquellos que no correspondan a PET. Cuando las botellas llegan con tapones sueltos, fragmentos de otros plásticos o etiquetas/films desprendidos, la máquina utiliza espectroscopía infrarroja (NIR) combinada con impulsos de aire comprimido para detectar y expulsar de la línea todos los materiales impropios. El sistema está compuesto por:

- Cinta de aceleración.
- Fuente de iluminación NIR.
- Sensor espectroscópico.
- Unidad de procesamiento.
- Banco de válvulas neumáticas de alta velocidad.

Esta máquina constituye el primer filtro de purificación del PET puro a la salida de la cadena. actuando sobre piezas sueltas y elementos de pequeño tamaño que no deben continuar en el proceso. Sin embargo, no elimina tapones adheridos ni etiquetas aún fijadas al cuerpo de la botella, por lo que no es el único sistema de separación encargado de obtener PET de alta pureza. A continuación, la Figura 27 muestra un esquema del funcionamiento.

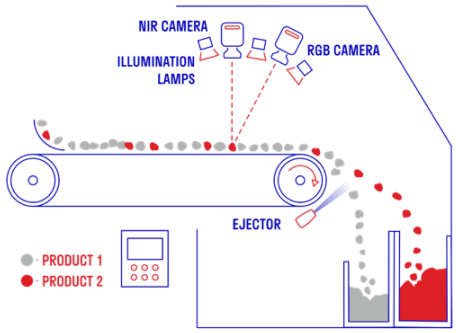


Figura 27: Esquema de funcionamiento del separador óptico NIR (38).

Estos equipos también presentan un alto grado de estandarización en el mercado; sin embargo, su dimensionamiento no depende únicamente del caudal másico, sino también de parámetros específicos como: la carga superficial sobre la cinta, la formación de una monocapa y la velocidad de aceleración. De acuerdo con el glosario de equipos de Ecoembes (39), la cinta transportadora de aceleración debe operar con velocidad seleccionable entre 2,2-3,7 m/s, lo cual permite dotal al material de la suficiente energía cinética para favorecer su lanzamiento y caída parabólica.

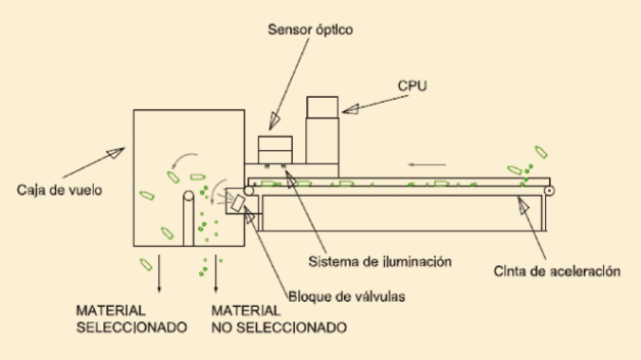


Figura 28: Partes del separador óptico (39).

Según la Figura 28, el material seleccionado sería la fracción de PET, y el no seleccionado correspondería la fracción de otros plásticos desprendidos en los procesos previos.
Tomando como referencia una velocidad de la cinta de 2,5 m/s, y considerando un caudal volumétrico de trabajo de 0,025 m^3/s, se dimensiona el separador óptico. Con estos datos se determina que la sección mínima requerida es de 0,01 m^2. Según el glosario de Ecoembes (39), el espesor de la monocapa debe encontrarse en un rango entre 40-60 mm. Tomando un valor medio de 50 mm, el ancho necesario sería de 0,2 m (200 mm). Este valor es teórico, y para garantizar un funcionamiento estable bajo condiciones de carga o variaciones en la distribución del material, se aplica un coeficiente de seguridad de 1,5 obteniéndose así un ancho efectivo de 300 mm. A partir de estos valores, se selecciona un modelo de separador óptico por infrarrojo cercano (NIR) de Peaks-Eco)(40), el cual se encuentra disponible en el mercado y se adapta a estas características. Las especificaciones técnicas se resumen en la Figura 29.

PEAKS-ECO



Especificaciones técnicas

Velocidad de la cinta	3.5 m/s
Ancho de la cinta	1.5 m
Tamaño de alimentación	8 - 300 mm (versión estándar), 3 - 60 mm (versión de alta resolución)
Distancia entre válvulas de aire	11.6 mm (versión estándar), 5 mm (versión de alta resolución)
Capacidad d producción	300 - 2500 kg/h (tamaño de alimentación 8 - 60 mm), 500-5000 kg/h (tamaño de alimentación 60 - 300 mm); la capacidad real varía según el aspecto y la densidad de la alimentación
Fuente de luz	8 lámparas halógenas
Precisión de clasificación	>95%
Fuente de alimentación	380 V / trifásico / 40 A
Aire comprimido	5 - 7 kg/cm², sin aceite ni agua
Entorno de funcionamiento	Temperatura 0 - 40ºC, humedad < 80%
Características opcionales	clasificación por color

Figura 29: Especificaciones técnicas del modelo escogido de Peaks-Eco (40).

La velocidad ofrecida por este modelo es superior a la calculada en el dimensionamiento preliminar; sin embargo, al tratarse de un equipo impulsado por un motor eléctrico, su velocidad puede ajustarse fácilmente para adaptarse a las necesidades operativas de la línea. Tal y como se observa en el segundo recuadro de la Figura 29, el modelo seleccionado trabaja en un rango de 500 a 5.000 kg/h, perfectamente compatible con el flujo requerido para el procesamiento de plástico. Asimismo, el tamaño de alimentación asociado a dicha capacidad se sitúa entre 60 y 300 mm, coincidiendo con el ancho efectivo obtenido en los cálculos y contemplando el correspondiente coeficiente de seguridad. El cumplimiento de todos estos criterios confirma que el modelo escogido es técnicamente adecuado.

5.8.5.10. Molino

El molino será el encargado de reducir las botellas de PET a escamas de tamaño homogéneo. Estas escamas resultantes estarán compuestas de PET y el material de los tapones (HDPE o PP), que serán posteriormente separados en el tanque de separación por densidades. Este tanque solo trabaja con materiales triturados y es por eso, que, si se busca obtener PET limpio, estas máquinas tienen papel clave. Dado que el material a tratar es hueco y de baja dureza, el equipo adecuado para esta etapa es un molino de alta velocidad tipo granulador.

Para la selección de este equipo, se ha optado por la empresa Neue Herbold, debido la variedad de modelos que tienen en su catálogo (41). Una variedad tan amplia, permite ajustar la capacidad a los coeficientes industriales definidos y seleccionar el modelo más acorde al flujo de trabajo.



Figura 30: Tipo de máquina ofrecida por Neue Herbold (41).

El factor principal que condicionará el dimensionamiento de este molino será el flujo que corresponde con 4,5 Tm/h. A partir de este valor, se seleccionan tres modelos potenciales de su catálogo tal y como se muestra en la Figura 31.

Performance examples

Type	Feed Opening	Rotor ø	Drive	Weight	Throughput approx.
SM 300/300	500 x 290 mm	300 mm	11 - 37 kW	1400 kg	150 - 250 kg/h
SM 300/500	500 x 490 mm	300 mm	11 - 37 kW	1800 kg	200 - 400 kg/h
SM 300/800	500 x 790 mm	300 mm	11 - 37 kW	2100 kg	250 - 500 kg/h
SM 450/600	600 x 580 mm	450 mm	37 - 90 kW	3000 kg	400 - 1200 kg/h
SM 450/800	600 x 770 mm	450 mm	45 - 90 kW	3800 kg	500 - 1300 kg/h
SM 450/1000	600 x 970 mm	450 mm	45 - 90 kW	4800 kg	600 - 1500 kg/h
SM 450/1600	600 x 1580 mm	450 mm	45 - 90 kW	6400 kg	900 - 2000 kg/h
SM 600/600	720 x 580 mm	600 mm	55 - 110 kW	3000 kg	600 - 1500 kg/h
SM 600/800	720 x 780 mm	600 mm	55 - 110 kW	4100 kg	780 - 2000 kg/h
SM 600/1000	720 x 970 mm	600 mm	55 - 110 kW	5000 kg	1000 - 2200 kg/h
SM 800/1000	940 x 980 mm	800 mm	75 - 160 kW	8000 kg	1500 - 4000 kg/h
SM 800/1200	940 x 1160 mm	800 mm	75 - 160 kW	9000 kg	2000 - 5000 kg/h
SM 800/1600	940 x 1560 mm	800 mm	90 - 200 kW	11000 kg	2500 - 6000 kg/h
SM 800/2000	940 x 1960 mm	800 mm	90 - 200 kW	15000 kg	3000 - 8000 kg/h

Figura 31: Extracto de catálogo de modelos disponibles (41).

Como criterio de selección, se optará por realizar la comprobación inicial utilizando el modelo de menor tamaño cuya capacidad máxima se aproxime al caudal de trabajo requerido. Dentro del catálogo del fabricante, el equipo que cumple mejor esta condición es el modelo SM 800/1200. La capacidad nominal de este modelo es de entre 2000-5000 kg/h, lo permitiría trabajar a un 90% de su máxima capacidad.

El consumo específico de los molinos industriales suele situarse en un rango de 30–40 kWh/t. Tomando como referencia un valor medio de 35 kWh/t, se procede a comprobar que la potencia instalada en el modelo seleccionado sea suficiente para cubrir el caudal requerido:

$$P = 4{,}5 * 35 = 157{,}5\ kW$$

El rango de trabajo del modelo seleccionado es de 75-160 kW, por lo que se ajusta a la potencia de trabajo. A pesar de que a primera vista pudiese parecer que la potencia está dimensionada de manera muy ajustada, hay que hay que tener en cuenta que el cálculo está hecho considerando que la alimentación estuviese compuesta del 100% de residuos plásticos, un escenario poco probable. En cuanto al tamaño, este modelo es el más compacto de los tres considerados, lo que constituye un criterio adicional a su favor. Por tanto, el modelo seleccionado es el SM 800/1200 de Neue Herbold.

El tamaño de las escamas obtenidas es función directa del tamaño de la criba instalada en el molino. Por tanto, considerando una criba de 12 mm, que produce escamas de aproximadamente 10–12 mm, y tomando una densidad aparente de las escamas de PET de 650 kg/m^3, se procede a calcular el caudal volumétrico de salida del molino a partir del flujo másico tratado (4500 kg/h).

$$Q_v = \frac{4500}{650} \cong 6{,}9 \frac{m^3}{h} \cong 0{,}0019 \frac{m^3}{s}$$

Tal y como se puede apreciar, comparando este valor de 6,9 m^3/h con el flujo volumétrico de entrada, el molino reduce aproximadamente 9 veces el volumen

5.8.5.11. Tanque de lavado

Como fue mencionado previamente, el tanque de lavado tiene como objetivo eliminar contaminantes adheridos a las escamas de PET. Este proceso se basa en una separación por diferencias de densidad entre los materiales presentes. En este sentido, en la Tabla 2 se muestran los valores de densidad habituales para dichos materiales.

Tabla 3: Tabla de densidades.

Material	Densidad (kg/m^3)
PET	1350–1400
PE / PP	900–950
Agua	1000

Dentro del tanque, el PET con una densidad mayor que el agua se hunde, mientras que los tapones de PE/PP flotan sobre la superficie debido a su menor densidad. Para asegurar la eficacia de esta separación, se emplea un lavado en caliente. Según la guía de lavado y secado de escamas de PET publicada por *EcoRecycling Today* (42), las condiciones recomendadas para un proceso eficiente son las siguientes:

- La temperatura de lavado: 85-95 ºC.
- Uso de aditivos para el lavado.

- Tiempo de residencia óptimo: 15-20 minutos.
- Relación sólido-líquido: aproximadamente un 20% de sólidos.

Con base en estos parámetros se procede a dimensionar el tanque. A partir el flujo volumétrico de las escamas 6,9 m^3/h, se determina el caudal volumétrico total que deberá atravesar el tanque considerando que el contenido en sólidos será del 20%:

$$Q_{total} = \frac{Q_s}{0{,}20} = \frac{6{,}9}{0{,}2} = 34{,}5\frac{m^3}{h}$$

Tomando como referencia un tiempo de residencia de 20 minutos, el tanque puede completar aproximadamente 3 ciclos de operación por hora. Por tanto, si se divide el caudal volumétrico total de la suspensión entre el número de ciclos posibles, se obtiene un volumen mínimo de tanque de 11,5 m^3. Aplicando un margen operativo del 20 %, se requeriría un volumen final de diseño de aproximadamente 15 m^3.

Teniendo en cuenta estos resultados, se selecciona un tanque de lavado en caliente con una capacidad útil aproximada de 15 m^3 y un tiempo de residencia de 20 minutos, valor que se ajusta a los rangos comerciales habitualmente empleados en líneas de tratamiento de entre 3 y 6 t/h. Es importante señalar que, en el mercado, no existe un modelo estándar con un volumen fijo para este tipo de equipos. Los tanques de lavado se diseñan generalmente como parte de una línea modular, adaptándose a los requerimientos específicos de cada proyecto. Por este motivo, en esta etapa del diseño no es posible seleccionar un modelo comercial concreto. La Figura 32 muestra un ejemplo de la línea completa del sistema de lavado:



Figura 32: Sistema completo de lavado en caliente (42).

5.8.5.12. Centrifugadora-Secadora

Siguiendo la guía de lavado y secado de escamas de PET (42), se buscará optimizar el proceso de secado empleando una tecnología simple y sin complicaciones técnicas. Para ello, se recurrirá a un sistema de secadores de aire caliente, capaz de alcanzar una humedad final de 0,2-0,3% en las escamas de PET limpio. Este sistema se caracteriza por un consumo energético moderado, un funcionamiento sencillo y una elevada rentabilidad operativa.

En las líneas industriales de reciclaje de PET, el tanque de lavado y la centrífuga secadora constituyen una unidad funcional integrada que garantizan la limpieza química de la escama y su posterior secado. Ambos equipos se acoplan entre sí, para cubrir los dimensionamientos hidráulicos y térmicos y cumplir con los balances de materia. Por esta razón, no se dimensionan de manera independiente.

El dimensionamiento bajo pedido se establece principalmente en función del caudal másico de la línea de PET (4,5 toneladas/hora). A partir de ese valor, se definen el resto de variables de diseño. El sistema debe tener un equilibrio entre caudal de descarga del tanque y capacidad de evacuación de la centrífuga. La sincronización de sistemas de bombeo y recirculación pueden hacer que un sobredimensionamiento en

el tanque, sin ajustar la centrifugadora, resulte en un desequilibrio hidráulico, y consecuentemente, en un mal funcionamiento de la cadena completa. Por esta razón, no se comercializan los equipos mediante modelos estándar, sino que se fabrican bajo pedido, dentro de una línea completa adaptada a un caudal específico de proyecto.

5.8.5.13. Extrusora-Peletizadora

Como último proceso de la cadena de reciclaje del plástico se encuentra la extrusora-peletizadora, la cual es la clave para obtener el producto final de PET reciclado en forma de pellets. Esta máquina integra 5 funciones técnicas esenciales:

- Plastificación del PET.
- Homogeneización del fundido.
- Filtración de contaminantes finos.
- Desgasificación.
- Corte y granulación de pellets uniformes.

Como se ha mantenido a lo largo del proyecto, el proceso se dimensiona sobre un caudal máximo de 4,5 t/h de plástico. Sin embargo, la extrusora debe contemplar pérdidas acumuladas en etapas previas, estimadas en torno a un 4% lo que reduce el flujo efectivo a aproximadamente 4200 kg/h. Con base en este flujo, se evalúan los equipos disponibles en el mercado y se comprobará que el modelo técnico escogido, encaje con las particularidades del proyecto. El modelo seleccionado para su análisis técnico es de EREMA, concretamente el modelo VACUREMA® PRIME 2628 T, el cual se muestra en la Figura 33 y cuyas especificaciones técnicas se resumen en la Figura 34. En particular, este modelo se elige por su alta capacidad de procesamiento, su integración de etapas de secado, descontaminación y extrusión en un único sistema, y su optimización energética frente a configuraciones convencionales. Estas características lo convierten en una referencia industrial adecuada para el análisis técnico de la etapa de extrusión y peletizado dentro del proceso planteado.



Figura 33: Modelo escogido VACUREMA® PRIME 2628 T (43).

Dentro de los modelos disponibles, se escoge el siguiente:

VACUREMA® PRIME

Technical data.

VACUREMA® PRIME	System throughput	Reference-IV-performance*	Total energy consumption**	System process duration	Flake reactor vacuum	Flake reactor performance	Extruder	Pellet form	Final pellet quality	Space needed	Height / KT height
Model	maximum [kg/h]	[dl/g @ kg/h]	[kWh/h]	Total [h]	[mbar] Advantages	Residual moisture	L/D drive-rating [kW]	Granumetry	AA level VOCs	[m²]	[m / m]
VACUREMA® PRIME 1310 T	-600	0.82 @ 500	175	3h	≤ 5 mbar redundant vacuum filter	Residual moisture < 50ppm several national and international approvals	~ 27 75 kW	Spherical or cylindrical: Inline crystallised or amorphous (restrictions possible depending on the system)	< 1 ppm with OPTIONAL Pellet Flusher brand owner status depending on setup	285	6.0 / 9.0
VACUREMA® PRIME 1512 T	-900	0.82 @ 700	245	3h			~ 27 110 kW			295	6.0 / 9.5
VACUREMA® PRIME 1714 T	-1000	0.82 @ 850	298	3h			~ 27 160 kW			320	6.0 / 10.0
VACUREMA® PRIME 1716 T	-1500	0.82 @ 1250	438	3h			~ 27 200 kW			330	6.0 / 10.5
VACUREMA® PRIME 2018 T	-2000	0.82 @ 1500	525	3h			~ 27 315 kW			360	6.0 / 11.0
VACUREMA® PRIME 2318 T	-2050	0.82 @ 2000	700	3h			~ 27 315 kW			400	6.0 / 11.0
VACUREMA® PRIME 2021 T	-2350	0.82 @ 1850	648	3h			~ 27 315 kW			385	6.0 / 11.5
VACUREMA® PRIME 2321 T	-2600	0.82 @ 2300	805	3h			~ 27 400 kW			410	6.0 / 12.5
VACUREMA® PRIME 2621 T	-3000	0.82 @ 2750	963	3h			~ 27 400 kW			475	6.0 / 12.0
VACUREMA® PRIME 2625 T	-3600	0.82 @ 3000	1050	3h			~ 27 500 kW			495	6.0 / 12
VACUREMA® PRIME 2628 T	-4700	0.82 @ 3500	1225	3h			~ 27 560 kW			530	6.0 / 11.5

* At an input flake IV of 0.76 dl/g
** including expected power consumption of necessary water chillers at the customer's plant
Subject to latest technical updates.

Figura 34: Extracto de la ficha técnica BOTTLE TO BOTTLE (43).

Una vez seleccionado el modelo de referencia, se evalúa su idoneidad dentro de la cadena de reciclaje propuesta. Tal y como se aprecia en la Figura 34, la capacidad máxima del equipo es de 4.700 kg/h, lo que permite operar con un valor de carga aproximado del 89 %, considerando el caudal másico que debe procesar. Este porcentaje de utilización se encuentra dentro de la zona óptima de trabajo, ya que el equipo no opera forzado, no presenta riesgo de saturación en condiciones nominales y tampoco se encuentra sobredimensionado. Teniendo en cuenta que la densidad de las escamas se estima en 650 kg/m^3 y la de los pellets en 850 kg/m^3, se estaría consiguiendo una reducción en volumen de aproximadamente el 23 %, lo cual resulta especialmente ventajoso en la fase de almacenamiento del producto terminado, ya que disminuye tanto los costes logísticos como las necesidades de aprovisionamiento y espacio. Por tanto, el modelo seleccionado resulta adecuado y compatible con las exigencias de la línea de reciclaje planteada.

5.8.5.14. Cinta transportadora continua (Unión de procesos)

Para no recurrir al diseño específico de cada cinta que conecte un proceso con otro, se unificará en un solo modelo que sea capaz de adaptarse a cada uno de los flujos de entrada y salida de cada máquina. A nivel industrial, esto simplifica los procesos de compra, mantenimiento y estandariza los componentes de la cadena.

Para la elección del tipo de cinta, se considerarán los siguientes parámetros:

- El ancho de la cinta debe estar dimensionado para transportar el flujo volumétrico más grande de la cadena.
- El motor de accionamiento debe incluir control de velocidad para ajustar la cinta a la demanda de cada proceso.
- El tipo de cinta debe permitir el transporte de todos los materiales presentes en la cadena, botellas, latas y escamas en todos sus estados.
- El tipo de cinta debe facilitar una configuración sencilla de *layout* y debe ser capaz de permitir giros para adaptarse a la distribución en planta.

El mayor flujo volumétrico coincide con el mayor flujo másico de entrada de PET (4,5 Tm/h), por tanto, se utilizará como referencia un caudal volumétrico de 0,0125 m^3/s tal y como se determinó en apartados anteriores. El dimensionamiento debe hacerse en las condiciones más desfavorables, es decir, aquellas en las que podría producirse una acumulación máxima de residuos sobre la cinta. Por este motivo, se toma como referencia una velocidad de transporte baja, fijada en 0,2 m/s. Una vez fijados estos valores se puede determinar el área necesaria para la cinta.

$$A = \frac{0{,}0125}{0{,}2} \cong 0{,}0625\ m^2$$

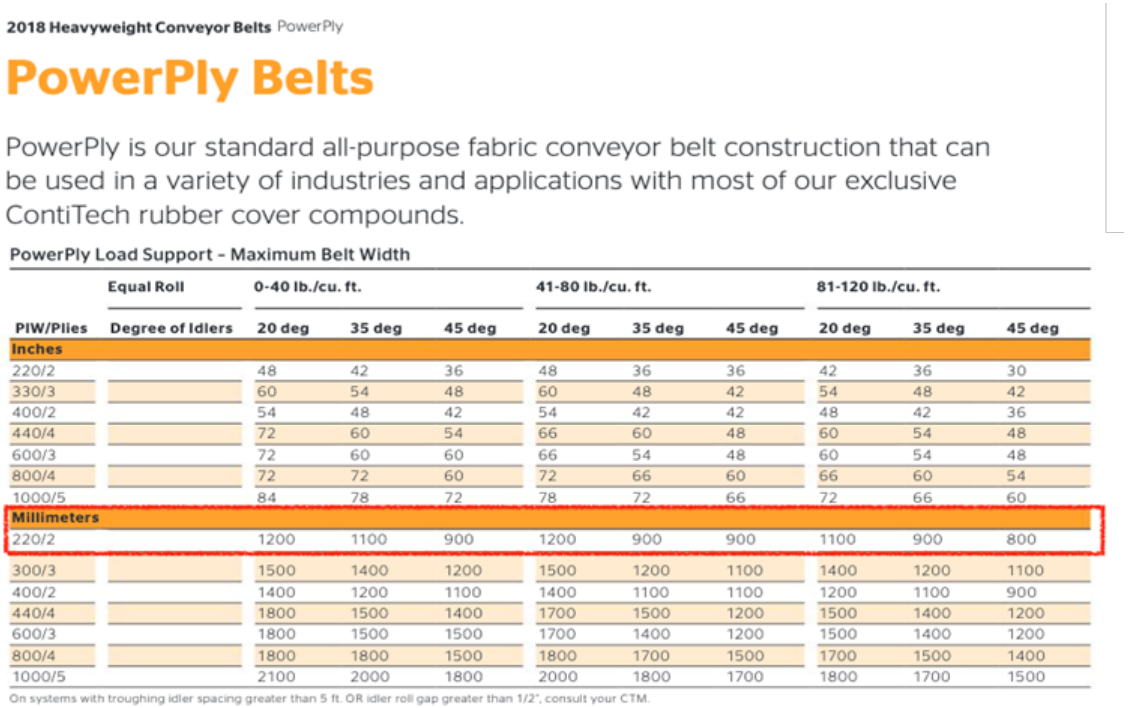
Una vez estimada el área necesaria, se evalúa el supuesto de una cinta transportadora con un ancho de 1000 mm y una inclinación media de 20º. Ajustada el área disponible por un coeficiente del 85% de área efectiva, se obtiene un área disponible de 0,075 m^2.
Contemplando la capacidad real de la cinta:

$$Q_{real} = A_{disponible} * v\ = 0{,}075 * 0{,}2 = 0{,}015\ m^3/s$$

$$Q_{real} = 0{,}075 * 0{,}2 = 0{,}015\ m^3/s$$

Una vez determinado el caudal real que podría circular por la cinta, se determina que, en comparación con el flujo de entrada, el factor de utilización de la misma estaría en un 83%. Este valor se encuentra dentro de un rango industrial adecuado, ya que proporciona suficiente margen de disponibilidad ante picos de demanda. Además, este tipo de cinta permite regular la velocidad de la cadena, adaptándola dinámicamente al ritmo requerido por cada equipo de la línea. Cabe destacar que, aunque sería posible evaluar una cinta específica para la salida de escamas, lo que podría traducirse en un ahorro de costes, esta opción no se abordará en el presente proyecto para mantener la estandarización de componentes y simplificar la operación y el mantenimiento.

A partir de estos datos, se realiza una búsqueda comparando las diferentes alternativas disponibles en el mercado. El modelo seleccionado PowerPly Belt 220/2, cuyas especificaciones se muestran en la Figura 35, es una cinta transportadora de tela de alta resistencia de la marca Continental. Esta cinta presenta una resistencia de 220 N/mm, lo que garantiza que la carga transportada no supondrá ninguna limitación en ninguna etapa del proceso. Cumple con la superficie útil requerida y puede acoplarse a motores regulables. Los motores de accionamiento serán suministrados como parte de la instalación de la cinta y dimensionados en función de la carga máxima que ésta sea capaz de mover. Una vez seleccionada la cinta que conectará cada uno de los equipos, se procederá al dimensionamiento de las instalaciones, con el fin de estimar los metros totales de cinta necesarios para completar la integración del sistema en el *layout* industrial.



2018 Heavyweight Conveyor Belts PowerPly

PowerPly Belts

PowerPly is our standard all-purpose fabric conveyor belt construction that can be used in a variety of industries and applications with most of our exclusive ContiTech rubber cover compounds.

PowerPly Load Support - Maximum Belt Width

	Equal Roll	0-40 lb./cu. ft.			41-80 lb./cu. ft.			81-120 lb./cu. ft.		
PIW/Plies	Degree of Idlers	20 deg	35 deg	45 deg	20 deg	35 deg	45 deg	20 deg	35 deg	45 deg
Inches										
220/2		48	42	36	48	36	36	42	36	30
330/3		60	54	48	60	48	42	54	48	42
400/2		54	48	42	54	42	42	48	42	36
440/4		72	60	54	66	60	48	60	54	48
600/3		72	60	60	66	54	48	60	54	48
800/4		72	72	60	72	66	60	66	60	54
1000/5		84	78	72	78	72	66	72	66	60
Millimeters										
220/2		1200	1100	900	1200	900	900	1100	900	800
300/3		1500	1400	1200	1500	1200	1100	1400	1200	1100
400/2		1400	1200	1100	1400	1100	1100	1200	1100	900
440/4		1800	1500	1400	1700	1500	1200	1500	1400	1200
600/3		1800	1500	1500	1700	1400	1200	1500	1400	1200
800/4		1800	1800	1500	1800	1700	1500	1700	1500	1400
1000/5		2100	2000	1800	2000	1800	1700	1800	1700	1500

On systems with troughing idler spacing greater than 5 ft. OR idler roll gap greater than 1/2", consult your CTM.

Figura 35: Catálogo de cintas Continental (44).

5.8.6. Resumen de maquinaria seleccionada y flujos de materia

A continuación, en la Tabla 4 se muestra un resumen de la maquinaria escogida y los flujos de materia del circuito:

Tabla 4: Tabla resumen de maquinaria y flujo.

Máquina	Material de entrada	Material de salida	Flujo de trabajo (t/h)	Marca	Modelo
Tolva de recepción	Plástico + Aluminio	Plástico + Aluminio	4,5	Mecalsa	Bajo pedido
Cinta transportadora de placas	Plástico + Aluminio	Plástico + Aluminio	4,5	Allert	NW:800
Trómel	Plástico + Aluminio	Plástico + Aluminio (sin finos)	4,5	GEP ECOTECH	GTS1850
Eddy Current	Plástico + Aluminio (sin finos)	Aluminio puro	4,5	Sollau	ECS-500 RAM
Prensa de aluminio	Aluminio puro	Balas de Aluminio 43 Kg	2	Enerpat	AMB-L1480-160
Separador óptico NIR	Plástico	Plástico semi-purificado	4,5	Peaks-Eco	Mod.único.
Molino	Plástico semi-purificado	Escamas de plástico 10-12 mm	4,5	Neue Herbold	SM 800/1200
Tanque de lavado	Escamas de plástico 10-12 mm	PET purificado húmedo	4,5	En conjunto, bajo pedido.	
Centrifugadora-Secadora	PET purificado húmedo	PET puro	4,5		
Extrusora Peletizadora	PET puro	Pellets de PET	4,2	EREMA	VACUREMA® PRIME 2628 T

5.8.7. Cálculos reales de obtención de producto

Este apartado es de especial relevancia a la hora de obtener la cantidad de producto que se obtendrá a la salida de la cadena de reciclaje. Para esto, es necesario tener en cuenta que entre el flujo de entrada de materia y el flujo de salida final se produce una reducción en peso, principalmente en la línea de PET debido a la separación de tapones en el tanque de flotación lo que representa una reducción aproximada del 7% en peso (300 kg/h).

Para obtener un flujo más representativo del funcionamiento real, se utilizan las proporciones de material calculadas en el apartado 5.5.5.5, donde se establece que el PET representa el 86 % en peso del total tratado, mientras que el aluminio constituye el 14 % restante. A partir del flujo ajustado de 4,5 toneladas/hora, los valores resultantes para cada material son 3,87 toneladas/hora para PET y 0,63 toneladas/hora para aluminio. Aplicando un 7% de pérdidas en el caso del PET a consecuencia del proceso de separación de los tapones, el caudal másico de salida de este material sería de 3,59 toneladas/h. De este modo, el flujo final de salida de la planta sería de 3,59 t/h de PET puro y 0,63 t/h de aluminio. El PET será obtenido en formato de pellets, que se venderán por kg y el aluminio se comercializará en formato de balas de 43 kg cada una. Estos serán los formatos de comercialización y las proporciones utilizadas para calcular los ingresos por la venta de producto reciclado, en función de los valores de mercado.

5.9. Diseño de la planta industrial

5.9.1. Localización de la nave

5.9.1.1. Plantas actuales

Para localizar la nave industrial en un punto logístico estratégico, se identifican primero los centros de selección de envases ligeros (EELL) a los que Ecoembes deriva actualmente los residuos recogidos en su red de gestión. A continuación, en la Figura 36 se muestra un mapa que identifica, por tipo de residuo, las plantas presentes en España (45).

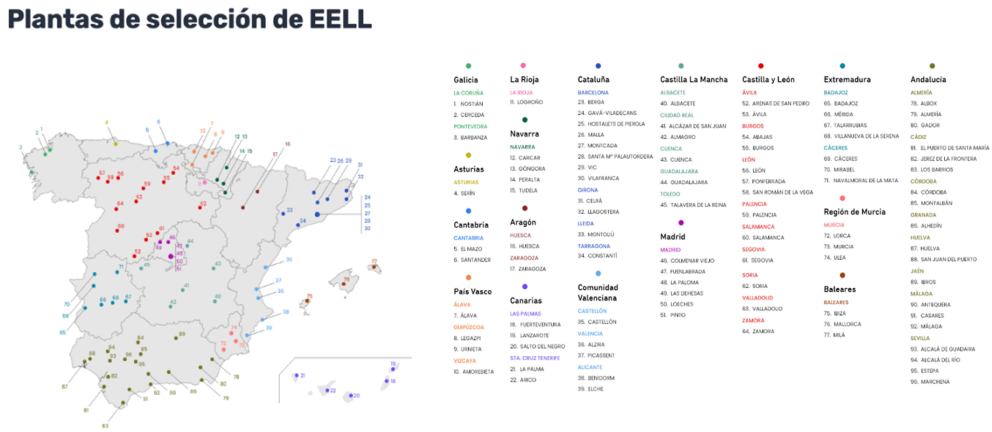


Figura 36: Localización de plantas de selección de EELL en España (45).

5.9.1.2. Análisis de situación

En el mapa se identifican 6 plantas en la Comunidad de Madrid tal y como se muestra en la Figura 37:

- 40. Colmenar Viejo
- 47. Fuenlabrada
- 48. La Paloma

- 49. Las Dehesas
- 50. Loeches
- 51. Pinto

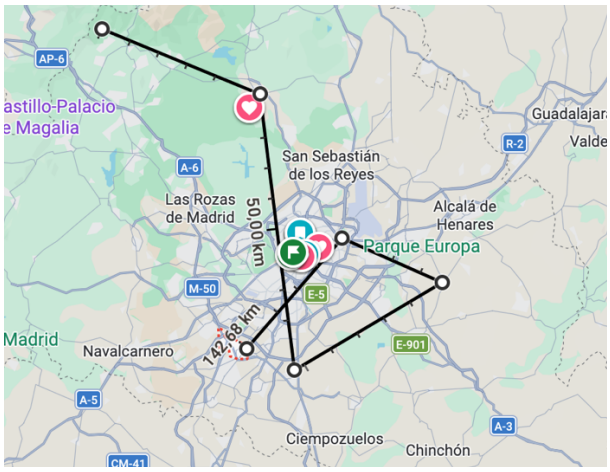


Figura 37: Plantas localizadas en Madrid a través de Google Maps.

Analizando la distribución geográfica de las plantas, se observa que la mayoría se encuentran localizadas en el eje sur y sureste (Pinto, Fuenlabrada, Loeches), así como en el área metropolitana inmediata. Solo la instalación de Colmenar Viejo cubre parcialmente la zona norte. Esta concentración responde a criterios lógicos de planificación territorial: la zona metropolitana presenta una demanda significativamente mayor debido a su elevada densidad de población y actividad económica, por lo que resulta coherente que las plantas de tratamiento se sitúen en ese entorno para optimizar la logística, reducir costes de transporte y dar servicio al mayor volumen de residuos generado.

5.9.1.3. Criterios para ubicar la planta

Desde el punto de vista técnico, la planta tiene que ofrecer una minimización en el coste de transporte. Para ello, se identifican los centros poblacionales más alejados de las plantas existentes en Madrid. El flujo de residuos generado en el municipio seleccionado, junto con la distancia media entre dicho municipio y la planta propuesta, permitirá estimar el coste logístico por tonelada de residuos. Según la información presentada anteriormente, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El corredor de Henares está cubierto por Loeches.
- El sur industrial de Madrid está cubierto por Fuenlabrada y Pinto.
- El noroeste y oeste están más alejados de las instalaciones.
- El corredor de la A-6 no tiene un centro logístico cercano.

De este modo, se identifica que el noroeste metropolitano de Madrid constituye la zona con mayor distancia logística respecto a los centros de tratamiento actuales. Dado que esta área cuenta además con la accesibilidad asociada a la autovía A-6, resulta necesario analizar con mayor detalle su densidad poblacional, el volumen potencial de residuos generados y el consumo asociado para evaluar su idoneidad como ubicación estratégica para la nueva planta. Como muestra la Figura 38, existe una concentración poblacional significativa en el área de Majadahonda, que abarca municipios como Las Rozas, Pozuelo, Galapagar, Boadilla del Monte, entre otros. Además de su elevada densidad demográfica, estas zonas presentan altos niveles de actividad comercial y niveles de renta superiores a la media, factores que influyen directamente en los patrones de consumo y, en consecuencia, en la generación de residuos. Considerando estos elementos, la zona seleccionada deberá disponer de accesos directos a la A-6 o a la M-50, garantizando así una conexión logística eficiente con el resto del área metropolitana.

Asimismo, será necesario que cuente con una superficie industrial amplia, que permita ubicar estratégicamente la planta y asegurar una operatividad adecuada.

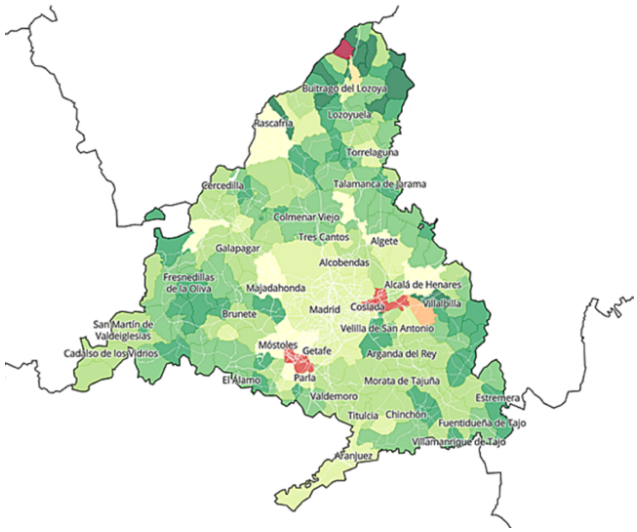


Figura 38: Densidad poblacional de la Comunidad de Madrid (46).

5.9.1.4. Localización justificada

La zona seleccionada corresponde con el Polígono Industrial P-29 de Collado Villalba, cuya localización se muestra en la Figura 39. La elección de este emplazamiento se fundamenta en los siguientes motivos:

- Acceso directo a la A-6.
- Presencia de industrias pesadas en el mismo polígono.
- Menor presencia residencial en las cercanías, lo que generará menor impacto a nivel de ruidos.
- Disponibilidad de naves en el polígono.
- Coste inferior al de otras zonas industriales próximas, como las de Las Rozas o Majadahonda.

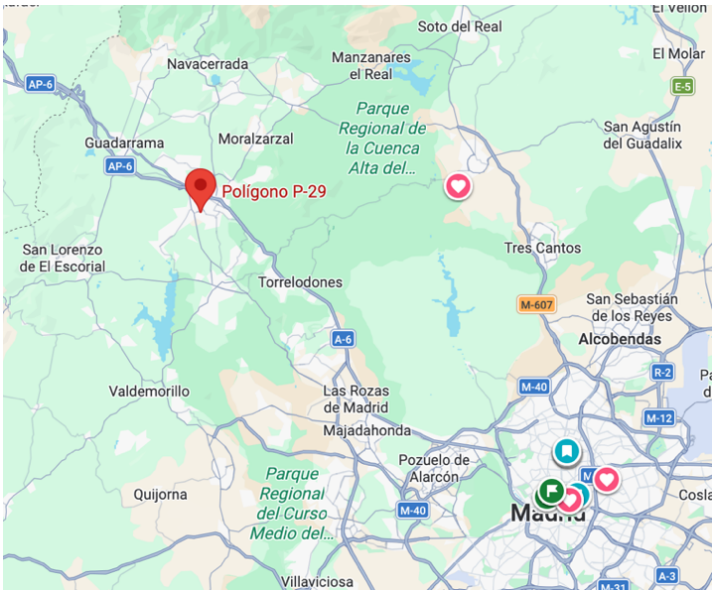


Figura 39: Localización seleccionada desde Google Maps.

Desde esta zona, la planta sería capaz de cubrir la demanda de los principales núcleos urbanos del noroeste metropolitano como Galapagar, Torrelodones, Las Rozas, Majadahonda, Pozuelo de Alarcón,

Villanueva de la Cañada, Villanueva del Pardillo o Guadarrama, entre otros. En conjunto, esta área concentra aproximadamente 500.000 habitantes, lo que implica que la planta daría servicio a un núcleo poblacional amplio y con una elevada generación de residuos

5.10. Nave

5.10.1. Tamaño según capacidad

Para poder definir técnicamente el tamaño que debe tener la nave, es necesario considerar las dimensiones de la cadena de reciclaje propuesta. Para ello, se analizan las dimensiones de otras plantas operativas con capacidades similares, las cuales se muestran en la Figura 40.

Nombre de Empresa	Área	Materiales aceptados	Productos Reciclables	Materiales Procesados (toneladas/año)	Capacidad (toneladas/año)
Sp-Berner Plastic Group, S.L.	Comunidad Valenciana	PEAD, PEBD, PP	Gránulos/Pelets	20.000	
Eaststroy, SL	Andalucía	PEAD, PEBD, PET, PP, PVC	Gránulos/Pelets, Hojuelas		12.000
Grupo Ekorec	País Vasco	PET	Gránulos/Pelets, Hojuelas		15.000
Sevelar S.A.	Comunidad de Madrid	ABS, PA, PE, PP, PS	Gránulos/Pelets		10.000

Figura 40: Plantas de capacidad similar en España (47).

Del análisis realizado mediante vista aérea, se observa que las plantas existentes con una capacidad similar a la capacidad establecida de 18.000 toneladas/año, requieren aproximadamente una manzana completa de superficie industrial. Dimensiones coherentes, ya que, en los cálculos aproximados, solo la playa de descarga requería 960 m^2. A continuación, en la Figura 40 se presentan las dimensiones de la planta SP-Berners, tomada como referencia debido a que su capacidad de procesamiento es de 20.000 toneladas/año, valor que se aproxima significativamente a la capacidad considerada en el presente proyecto.



Figura 41: Planta de SP-Berners en vista aérea Google Maps.

5.10.2. Requisitos técnicos

Con base en esta aproximación y a las características de plantas similares, se seleccionará una nave de aproximadamente 5.000 m^2. Esta deberá contar con un acceso adecuado para los camiones que depositarán los residuos en la playa de descarga, así como una altura mínima de 5 metros, ya que el Trómel operará a una altura de 3 metros. El resto de los equipos funcionarán dentro de sus alturas óptimas de

instalación, mientras que las cintas transportadoras se adaptarán a las diferencias de nivel necesarias para conectar cada sistema.

Estas dimensiones permitirán separar con claridad los dos circuitos de residuos, disponer de espacio suficiente para poder almacenar el stock de cubos de aluminio y pellets de PET, contemplar futuras ampliaciones la cadena y poder establecer un área de oficina para la atención al cliente.

A su vez, será necesario reservar una sección de la nave para el almacenamiento temporal y mantenimiento de las máquinas SDDR, antes de ser rentadas. De esta forma, la planta se organizará según las siguientes zonas funcionales:

- Zona de trabajo: en esta zona se desplegará el montaje de los dos circuitos de la cadena de reciclaje.
- Zona de descarga y aprovisionamiento de materia prima: esta zona estará dedicada para el depósito de los residuos recién llegados con fácil acceso desde la calle.
- Oficina técnica y comercial: en esta zona se ubicarán las instalaciones para atender a los clientes y empleados.
- Zona de existencias: productos terminados se almacenarán en esta zona para su posterior venta.
- Almacén y mantenimiento: esta zona estará destinada al almacenamiento temporal de las máquinas SDDR, equipos de mantenimiento y área de reparaciones.
- Pasillos y seguridad: espacios destinados al tránsito seguro del personal y al cumplimiento de las normativas de prevención de riesgos.

5.10.3. Layout propuesto

El Layout propuesto desarrolla conceptualmente la implantación de la línea de proceso, en el que se representarán aproximadamente las superficies ocupadas por cada equipo y su disposición relativa. Además, tiene como finalidad analizar la separación entre ambos flujos de materiales, zonas de trabajo, de almacenamiento y flujo de maquinaria y personal. Para ello, se elaboran dos planos conceptuales, uno de implantación, que mostrará exclusivamente la disposición de las máquinas y otro de flujos, en el que se representarán los recorridos de materiales, equipos y operarios. A continuación, a modo de ejemplo, la Figura 42 muestra el plano de implantación. Para una mejor visualización, dicho plano se incluye íntegramente en el Anexo 8, junto con el plano de flujos.

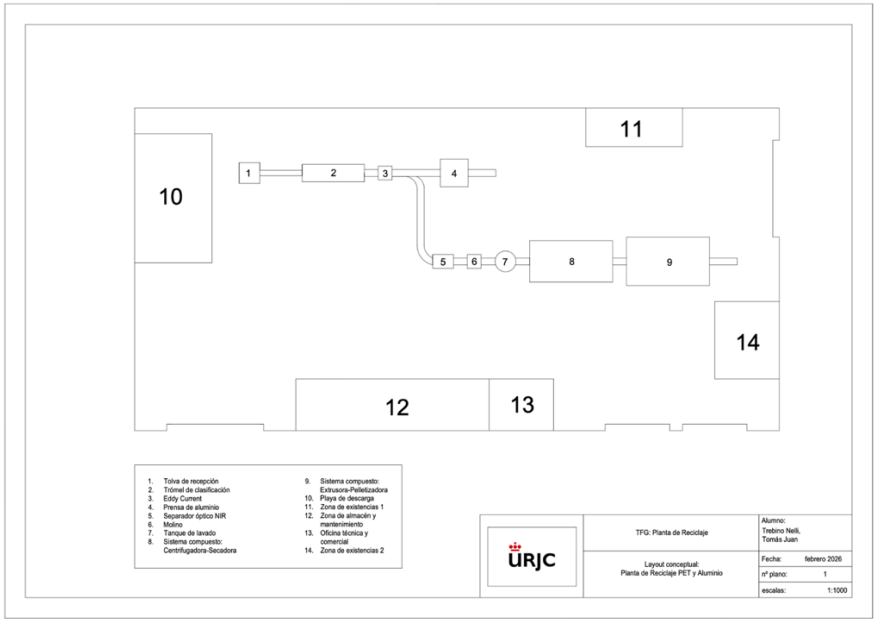


Figura 42: Plano de Layout propuesto.

Definido el Layout se estiman de manera aproximada unos 22 metros de cinta transportadora adicional para el sistema y la conexión entre máquinas. Se hace este supuesto en base a las proporciones de la nave, la distribución planteada y el tamaño de las máquinas.

5.11. Plan económico financiero

5.11.1. Inversión inicial

Para poder elaborar un plan económico y comprobar la viabilidad, se estudiarán las inversiones iniciales necesarias de plantas similares en el mercado. En base a estas, se establecerá una media que se aproxime a las especificaciones de este proyecto. Por otro lado, para las máquinas SDDR, se partirá de un presupuesto solicitado para una máquina de características similares al modelo seleccionado, y se realizará una aproximación para ajustar el coste a las especificaciones del modelo.

5.11.1.1. Inversión en maquinaria

La dificultad de establecer específicamente el coste de la maquinaria radica en la falta de precios unitarios en el mercado. Las líneas de reciclaje se diseñan y suministran bajo pedido, por lo que los fabricantes presupuestan el sistema conjunto y no equipos individuales. Es por esto por lo que no sería adecuado adoptar un único precio por cada equipo de forma aislada. Consecuentemente, se recopilarán precios de maquinaria similar, se establecerá un rango de precio según sus capacidades, y se estimará el precio dentro del rango en base a la capacidad de procesamiento de este proyecto.

Tabla 5: Coste aproximado de maquinaria.

Categoría	Tipo de Maquinaria	Rango (€)	Unidades	Precio (€)
Sistemas de alimentación	Tolva industrial	35.000-60.000	1	40.000
Transporte interno	Cintas transportadoras	30.000-40.000	22	670.000
Separación primaria	Trómel	150.000-250.000	1	150.000
	Eddy Current	100.000-120.000	1	100.000
Acondicionamiento primario	Compactadora aluminio	90.000-150.000	1	100.000
Separación secundaria	NIR	100.000-450.000	1	120.000
	Molino	180.000-300.000	1	200.000
Sistema de lavado	Línea de lavado completa	1.000.000-3.000.000	1	1.250.000
	Centrifugadora-Secadora	120.000-200.000	1	150.000
Acondicionamiento secundario	Estrusora-Pelletizadora	2.000.000-3.500.000	1	2.000.000
			Total	**4.780.000**

5.11.1.2. Costos asociados a la puesta en marcha

La puesta en marcha de la planta implica una serie de costes adicionales más allá de la adquisición de la maquinaria. Para tener una base de estimación, se seguirá la guía de *Energycle* (48), en la cual se identifican los principales costes asociados a la puesta en marcha, como licencias, instalaciones y acondicionamiento, entre otros. Tomando como referencia dicha guía y ajustando los valores medios a las características específicas de este proyecto, se determinan los costes complementarios que deben considerarse para la correcta implantación y operación inicial de la planta, que se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6: Costes asociados.

Categoría	Detalle	Monto (€)
Instalación de línea	Instalación completa de la línea primaria y secundaria. Conexión a red eléctrica, neumática y aguas.	200.000
Obras de acondicionamiento	Adecuación de la nave para las zonas previamente establecidas. Trabajo de suelos, equipos de seguridad y preparación de vías de circulación.	150.000
Mobiliario	Material necesario para oficina técnica y lugares de trabajo.	50.000
Máquinas de uso interno	1 Pulpo mecánico + 2 Forklifts + Camión mediano	350.000
Herramientas de trabajo	Sets de herramientas y repuestos necesarios para arreglos y mantenimiento de la maquinaria presente en el proyecto.	80.000
Permisos y licencias	Tramitaciones legales necesarias.	20.000
EPIs	Elementos de protección para todos los operarios en planta, y sistemas de protección de maquinaria necesarios.	3.000
Formación	Capacitación técnica para el personal y correcta operación de equipos.	5.000
Contingencias	Costos de imprevistos y contingencia técnica (10%).	75.800
	Total	**833.800**

5.11.1.3. Costes asociados a línea de negocio secundaria

El renting de las máquinas SDDR tiene asociados los costes de compra de las maquinarias que deberán mantenerse en inventario, incluyendo el envío y la gestión asociada al alquiler de dichas máquinas. Previamente al comienzo del proyecto, se habrá formalizado el contrato de renting de 15 máquinas destinadas al sector de los supermercados. Estas gestiones implican un coste comercial, administrativo y de marketing desde el tiempo cero del proyecto, sin embargo, al mismo tiempo generan ingresos desde el inicio de la operación. Se estima que este conjunto de gastos asciende a aproximadamente 30.000 €, por lo que el coste de las gestiones previas se fija en ese valor.

El presupuesto de la máquina s seleccionada no se encuentra disponible de forma pública, por lo que se estima el precio en base al presupuesto del modelo competidor de Trautwein, el cual fue solicitado bajo pedido y se encuentra adjunto en el Anexo 9. En él se incorpora la cotización de la máquina incluyendo transporte, instalación y mantenimiento remoto. Para obtener una estimación ajustada, se corrige el precio considerando que la capacidad del modelo presupuestado es ligeramente inferior a la máquina finalmente seleccionada. A su vez, la adquisición simultánea de 15 unidades permite una mayor capacidad de negociación y, por tanto, una reducción del precio unitario. Por tanto, se define un coste de

20.000€ por máquina, incluyendo los servicios asociados contemplados en el presupuesto detallado. De este modo, la inversión correspondiente a la adquisición de los 15 equipos de la línea secundaria asciende a 300.000€. Considerando en conjunto este coste junto con el resto de las partidas, el coste global de la inversión inicial asciende a 5.943.800€.

5.11.2. Costes de financiación

Tomando como referencia el valor del Euríbor (49), que actualmente se sitúa en torno al 2,2% y añadiendo un diferencial que según el nivel de riesgo del proyecto puede oscilar entre el 0,8% y el 2,5%, se establece una tasa fija del 3,5% anual para un préstamo bancario destinado a empresas por un importe de 6.000.000€.

5.11.3. Costes de operación

5.11.3.1. Costes fijos

Dentro de los costes correspondientes a este apartado, se definirán los siguientes costes fijos:

- Amortización de maquinaria (a efectos contables).
- Alquiler de la nave.
- Mantenimiento preventivo.
- Seguro.
- Software y su mantenimiento.
- Tasas municipales.
- Mantenimiento SDDR.
- Servicios de agua y gas.
- Empleados.
- Gestión de rechazos.

5.11.3.1.1. Amortización del préstamo

La amortización del préstamo realizará en un periodo de 5 años de forma lineal. Dado que la evaluación económica del proyecto también considera vida útil de 5 años, es necesario estimar el valor residual que tendrá la línea de reciclaje y la planta al finalizar dicho horizonte temporal.
La selección de equipos incluye, en gran medida, maquinaria de última generación, cuya depreciación real tras cinco años se estima en un valor máximo del 40%. Por otro lado, los equipos de tecnología más antigua o de menor eficiencia presentan un ritmo de depreciación más acelerado, pudiendo alcanzar reducciones de valor cercanas al 70%. Considerando ambos comportamientos y ponderando su efecto global en la instalación, se establece que el valor residual de la planta dentro de cinco años será del 50% respecto a su inversión inicial. Por tanto, la cuota de amortización sería:

$$Cuota\ de\ amortización = \frac{6.000.000 - 3.000.000}{5} = 600.000 \frac{€}{\text{año}} = 50.000 \frac{€}{\text{mes}}$$

5.11.3.1.2. Alquiler de la nave

Analizando las ofertas en el Polígono P-29 de Collado Villalba, recopiladas a través de Idealista (50), se puede establecer un precio medio de 8€ por m^2. Al alquilar una manzana completa, es posible reducir el precio del alquiler entre un 5% y un 10%. Suponiendo una reducción del 10% y teniendo en cuenta la superficie necesaria (5.000 m^2), el coste mensual estimado del alquiler de la nave sería aproximadamente el siguiente:

$$Coste\ alquiler = 8 * 5.000 * 0,9 = 36.000 \frac{€}{\text{mes}}$$

5.11.3.1.3. Mantenimiento preventivo

Para el mantenimiento preventivo se destinarán 48.000€ anuales, con el fin de mantener la planta en correcto funcionamiento y alargando la vida útil de los equipos, por tanto, el coste mensual de mantenimiento preventivo ascendería a 4.000 €/mes. Adicionalmente, se considerará una cuantía mensual para la realización de un potencial mantenimiento correctivo de 500 €/mes.

5.11.3.1.4. Seguro industrial

Basándose en el comparador de pólizas de seguros de Proaler (51) y tomando como referencia los valores asociados a la industria química (categoría descrita que más se asemeja a la industria del reciclaje), el coste de un seguro multirriesgo personalizado puede situarse entre los 5.000 y los 15.000€ anuales. Considerando un valor medio dentro de este rango, se obtiene un coste aproximado de 834 € mensuales para la contratación del seguro industrial. Este tipo de seguro personalizado permite asegurar la totalidad de la maquinaria en posesión y las instalaciones completas de la planta.

5.11.3.1.5. Software de gestión

Se utilizará el software de gestión más reconocido en el mercado, desarrollado por la empresa Sage. Dentro de los planes ofrecidos se seleccionará el "*Sage 50 Essential*" (52), ya que cumple con los requerimientos administrativos básicos que tendrá este proyecto cuya subscripción asciende a 45€/mes.

5.11.3.1.6. Tasas municipales

Dado que el IBI será asumido por el propietario de la nave industrial, los costes fiscales a cubrir por la empresa se limitarán a la tasa de residuos industriales y a las tasas correspondientes al suministro de agua y al servicio de alcantarillado. Por su parte, el IAE (Impuesto sobre Actividades Económicas) se descontará directamente en la cuenta de resultados en función de la facturación anual de la empresa, por lo que no se incluye como coste fijo directo en este apartado. Considerando estos conceptos, se estima un gasto anual total de 1.500 € asociado a dichas tasas municipales o, lo que es lo mismo, 125€ mensuales.

5.11.3.1.7. Mantenimiento SDDR

El coste por máquina establecido para mantenimiento preventivo es de 500€ anuales. Contemplando las 15 máquinas, implica un coste total de 7.500€ anuales que equivale a 635€/mes.

5.11.3.1.8. Servicio de agua y gas

Para este servicio, se establecerá una media de 12.000€ anuales lo que supone un desembolso mensual de 1.000€. El coste del agua industrial se ha estimado a partir de tarifas de uso no doméstico publicadas por el Canal de Isabel II y otras fuentes que permiten estimaciones (53). Mientras que la estimación del coste del gas se ha obtenido de los rangos de mercado para consumidores industriales publicados por la CNMC y comercializadoras energéticas (54).

5.11.3.1.9. Costes de personal

Para establecer el coste de personal, hay que definir cuantos trabajadores tendrá la planta. Para ello, se establecerá un equipo semejante al de plantas similares en tamaño y producción el cual se resume en la Tabla 7.

Tabla 7: Costes de personal.

Puesto	Cantidad	Coste bruto anual estimado (€)
Director / Responsable planta	1	53.000
Ingeniero de procesos / mantenimiento	1	40.000
Técnicos mantenimiento (2 turnos)	2	60.000
Operarios línea (2 turnos)	6	140.000
Administrativo / logística	1	28.000
Comercial SDDR	1	33.000
	Total	**354.000**

El coste anual de los empleados de la planta asciende a 354.000€ (29.500€/mes).

5.11.3.1.10. Gestión de rechazos

Para la gestión de los rechazos, separados por las máquinas específicas como la Trómel y el separador de corrientes de Foucault, se contratará un servicio externo de gestión de residuos (55) cuyo importe asciende a 800€ al mes.

5.11.3.2. Costes energéticos

Se establecerá un consumo energético medio en función de las características y potencias nominales de las máquinas seleccionadas para la planta. Asimismo, se asumirá que los equipos operarán durante el 100% del horario laboral a un régimen promedio de funcionamiento, descartando en esta estimación los picos de demanda energética que puedan producirse de manera puntual. Tal y como recoge la Tabla 8, el consumo diario de energía eléctrica asciende a 12.232€.

Tabla 8: Consumo energético de maquinaria.

Equipo	Potencia instalada (kW)	Horas/ día	Consumo diario (kWh/día)
Tolva + alimentador	3	16	48
Cintas transportadoras (línea completa)	15	16	240
Trómel rotativo	11	16	176
Separador magnético	2	16	32
Eddy Current	7	16	112
Separador óptico NIR	12	16	192
Molino triturador PET	90	16	1.440
Lavadora por fricción	30	16	480
Centrifugadora/secadora	45	16	720
Sistema secado térmico	60	16	960
Extrusora + Vacurema 2628 T	400	16	6.400
Compactadora aluminio	22	16	352
Compresor aire industrial	30	16	480
Sistemas auxiliares (iluminación, cuadros, oficinas)	25	24	600
		Total	**12.232**

Dentro de los sistemas auxiliares se engloba la iluminación general de la planta, cargadores de sistemas con baterías y otro tipo de dispositivos necesarios para el funcionamiento correcto de la planta. A partir de los consumos diarios y considerando el precio de la energía (0,109 €/kWh) establecido por Iberdrola (56), se puede estimar un coste energético diario de aproximadamente 1334€. Para evitar considerar las variaciones que pueden producirse en los distintos meses de operación, se adopta una simplificación estableciendo un total de 30 días por mes. Bajo este criterio, el coste energético mensual resultante asciende a 40.020€.

5.11.3.3. Costes logísticos

Retomando el acuerdo de colaboración establecido con Ecoembes, los costes logísticos asociados al traslado de los residuos hacia la planta son asumidos por dicha entidad. En consecuencia, los únicos costes logísticos atribuibles a este proyecto son los relacionados con la recogida de la línea secundaria. Considerando que hay 15 máquinas en funcionamiento y un plan de recogida semanal por máquina, se generarían un total de 60 desplazamientos por mes. Para optimizar estos desplazamientos, uno de los operarios realizará tres recogidas diarias, agrupando las rutas por zonas geográficas, lo que se traduce en un total de 20 salidas mensuales. El coste del camión no se considera adicional, puesto que ya está incluido dentro de los costes de inversión inicial.

Por último, se estima el gasto aproximado de combustible. Dado que los supermercados que participen en este servicio pueden estar ubicados en cualquier zona del área de Madrid, se establece una distancia media diaria de 100 km, equivalente aproximadamente a una ida y vuelta desde Collado Villalba y el centro de Madrid, a la que se suman 30 km adicionales por desplazamientos entre supermercados. Asumiendo un consumo medio de vehículo de 8 l/100km y un precio de 1,5€/l, el coste de combustible mensual asciende a 312€.

A pesar de que los costes energéticos y logísticos se consideran habitualmente costes variables, en este caso se ha calculado una media asociada a la demanda constante que tendrá la planta. Es por esto por lo que se puede establecer una aproximación y tratarlos como costes fijos a efectos de estimación económica. De este modo, el coste total de operación ascendería a 112.961€ al mes.

5.11.4. Valor del producto reciclado

Para estimar al precio de venta de los productos reciclados obtenidos en la cadena de reciclaje, es necesario remitirse al apartado 5.5.7. En el mismo se detalla el flujo de salida de material reciclado que se genera en el proceso siendo 3,59 toneladas/h en pellets de PET y 0,63 toneladas/h de balas de aluminio de 43 kg. Estos valores, ajustado por una eficiencia del 95% y calculado en función del tiempo operativo definido (16 horas a 250 días), permiten obtener una producción mensual aproximada de 1.137 toneladas de PET y 200 toneladas de aluminio.

Teniendo en cuenta estos valores y la cotización del mercado de estos productos reciclados, se estiman los ingresos mensuales de la línea de negocio primaria. Para establecer el precio de los pellets de PET, se utiliza el precio promedio establecido para el 2025 según *EcoRecycling Today* (57). Esta plataforma dispone de una calculadora con los precios actualizados de la cotización de plásticos reciclados. Esta fuente, sitúa el precio entre 0,38 y 0,52$/kg, por lo que se toma un valor medio de 0,44$/kg, lo que al tipo de cambio del 27 de febrero de 2026, equivaldría a 0,37€/kg. Para el precio del aluminio, se utilizará la tasación vigente en la misma fecha obtenida a precio actualizado (58), que establece un valor de 1,69€/kg.

5.11.5. Ingresos del sistema

Una vez definidos los precios de mercado de los productos reciclados, se puede completar la estimación de los ingresos previstos para este modelo de negocio, diferenciando las aportaciones económicas correspondientes a cada una de las líneas operativas del proyecto.

5.11.5.1. Línea de negocio primaria

Según las cotizaciones establecidas en el apartado anterior, los ingresos para la empresa, teniendo en cuenta que el 50% de ventas son destinadas a Ecoembes por el contrato de colaboración resultarían en un total de ingresos de 210.345 €/mes para PET y 169.000€ para aluminio. Los meses de marzo, abril, octubre y noviembre, se ajustarán a una demanda un 5% inferior, dado que en estos periodos se observa una reducción del consumo a nivel nacional. No obstante, estas variaciones estacionales no afectan de manera significativa a la demanda atendida por la planta, ya que el déficit estructural de capacidad instalada en el sector es considerablemente mayor que la disminución temporal del consumo, garantizando así la estabilidad del flujo de materiales a lo largo del año.

5.11.5.2. Línea de negocio secundaria

El precio de renting mensual se establecerá en 1.700 € por supermercado lo que supone un ingreso total de 25.500€ al mes. Este valor se define porque, desde la perspectiva de la empresa, permite recuperar la inversión total en las máquinas en un plazo inferior a dos años, lo que facilita, a medio plazo, la adquisición de nuevos equipos y promueve un crecimiento progresivo de esta línea de negocio. Tal como se detalla en el apartado 2.7.2.3, el objetivo en el medio plazo es ampliar el alcance geográfico mediante la incorporación de más unidades. Este plazo de recuperación ofrece a la empresa el margen necesario para consolidar la operativa de los equipos existentes y para generar nuevas relaciones comerciales que respalden la futura expansión.

Desde el punto de vista de los supermercados, este importe representa menos del 0,30% de su facturación anual, y supone un coste mensual inferior al que implicaría contratar a un empleado destinado a la gestión manual de parte de los residuos recogidos por la máquina. Además, cualquier inversión orientada a mejorar la imagen social corporativa en cadenas de supermercados suele implicar costes mensuales de marketing significativamente superiores al precio establecido por esta línea de negocio, lo que refuerza su competitividad y atractivo.

5.11.6. Análisis de viabilidad económica

Para el análisis de viabilidad económica se evaluarán los flujos de caja correspondientes al Año 1 hasta el Año 5, con el objetivo de determinar los beneficios netos de la empresa, y a partir de estos, analizar los plazos de recuperación de la inversión. Los indicadores económicos que se utilizarán en este estudio son los flujos de caja anuales, VAN (a 5 años) y la TIR.

5.11.6.1. Flujos de Caja (1º a 5º Año)

Para el estudio de los flujos de caja, los ingresos se desglosan según su procedencia y se aplica el impuesto sobre sociedades del 25%. El IVA no se considera en los cálculos, ya que este impuesto se repercute tanto en compras como en ventas, por lo que su impacto real se evalúa únicamente al cierre contable. Los ingresos y costes derivados de las ventas se ajustan en aquellos meses previamente definidos como de menor demanda, lo que introduce variaciones en la rentabilidad mensual. Por último, la cuenta de resultados tiene un último indicador denominado “Saldo Acumulado”, que permite visualizar de manera práctica la evolución de la recuperación de la inversión a lo largo del tiempo.

Todos los años, los costes y precios de venta se actualizan con un IPC medio del 3%. El único precio que no es ajustado es el del Renting de las SDDR, ya que la estabilización de la tarifa a 5 años se utilizará como estrategia de marketing. Todos los flujos de caja se encuentran detallados en el Anexo 10.1. A modo de resumen, los beneficios netos mensuales, obtenidos bajos los supuestos establecidos en los 5 años, se encuentran entre los 160.000€ y 195.000€ mensuales.

La rentabilidad del modelo de negocio en términos de beneficios netos mensuales puede consultarse en las tablas incluidas en el anexo. En el último flujo de caja de los cinco años evaluados se incorpora el valor residual de la planta y de la maquinaria, lo que contribuye al resultado final del proyecto. En conjunto, se trata de un modelo con una elevada rentabilidad y un plazo de recuperación de la inversión atractivo, aspectos que serán analizados en detalle en los apartados siguientes.

5.11.6.2. VAN (Prima de riesgo)

Para el cálculo del VAN y la evaluación de la rentabilidad del proyecto, la tasa de descuento se ajusta incorporando una prima de riesgo que contempla los tipos de riesgos asociados al modelo de negocio (operativos, comerciales, regulatorios y de mercado). La tasa de referencia utilizada es el tipo de interés del 3,5% aplicado en la financiación del proyecto. Sin embargo, dado que los intereses del préstamo constituyen un gasto deducible en el Impuesto sobre Sociedades, la tasa efectiva se reduce al 2,63%. A este valor se le suma una prima de riesgo del 3,37%, obteniéndose una tasa de descuento final del 6%.El VAN (Anexo 10.2) obtenido asciende a 9.128.120,29 € que demuestra que el proyecto genera valor y es financieramente viable. No solo presenta una excelente rentabilidad, sino que, aun contemplando una alta prima de riesgo, genera ingresos significativos y un valor de proyecto importante a 5 años.

5.11.6.3. Payback

Una vez calculado el saldo acumulado a lo largo de los 5 años de operación, es posible obtener una estimación preliminar del plazo de recuperación de la inversión. Sin embargo, para determinar dicho plazo con precisión, se recurre al Payback descontado (véase Anexo 10.2)., que incorpora el valor temporal del dinero y, por tanto, ofrece un resultado más riguroso. Se obtiene un periodo de recuperación de 2 años, 4 meses y 29 días. Este valor ya incluye la prima de riesgo previamente definida en el modelo financiero. Si se comparan estos resultados con el análisis del saldo acumulado sin descuento, la recuperación podría producirse hasta dos meses antes .

6. Conclusiones

Mediante este trabajo se ha permitido desarrollar de manera completa e integral el diseño de un modelo de negocio que combina un proyecto tradicional (la planta de reciclaje) con un modelo totalmente disruptivo en España (la implementación de SDDR).
La combinación de ambos modelos, hace de un proyecto muy relevante en lo económico, como también en lo técnico. Por otro lado, el proyecto presenta un alto potencial de escalabilidad, pudiendo replicarse en diferentes ubicaciones geográficas y adaptarse a volúmenes de tratamiento. Esta característica, junto con su contribución a la reducción de residuos y emisiones, lo posiciona como una solución alineada con los principios de la economía circular y con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente aquellos relacionados con la producción y consumos responsables y la acción por el clima.

Desde el punto de vista técnico, se ha demostrado la viabilidad del diseño propuesto, definiendo una línea eficiente, escalable y adaptada a los volúmenes estimados de entrada de material. A la vez, toda la maquinaria fue calculada con sus respectivos márgenes de operación y con flujos ligeramente sobredimensionados para poder operar sin problemas.
El estudio de consumo de plásticos ha permitido dimensionar adecuadamente tanto las SDDR como la capacidad de la planta, evitando cuellos de botella y asegurando su funcionamiento continuo en la jornada definida de 16 horas.
En cuanto a la implementación industrial, se concluye que, en un escenario real de ejecución, la estrategia óptima consiste en la contratación de un proveedor integral que se encargue del diseño y suministro de la maquinaria. A lo largo del trabajo, se puede ver que la complejidad del diseño radica en la selección de las marcas y modelos de las máquinas, ya que en general, se trabaja bajo pedido de una instalación completa, en base a criterios de producto final y capacidad. El hecho de diseñar en base a modelos comerciales publicados y con la mezcla de marcas, complejiza el diseño y puede llevar a errores de dimensionamiento y malos funcionamientos.

Desde el punto de vista meramente económico, los resultados obtenidos reflejan esta alta rentabilidad mencionada bajo las condiciones planteadas. En concreto, se ha estimado un periodo de recuperación de 2 años y 4 meses, con una posterior rentabilidad neta significativamente alta.
Analizando en valor actual neto a 5 años de aproximadamente 9 millones de Euros, se puede evidenciar la solidez financiera del modelo de negocio planteado. Estos resultados se ven reforzados por el contexto actual de impulso a la economía circular, que favorece el acceso a subvenciones y ayudas públicas orientadas a proyectos sostenibles.
Sumado a ello, como se contempla en el alcance, la posibilidad de ampliar el tamaño de la línea secundaria de negocio, puede llevar a un aumento, en corto plazo, en la rentabilidad del negocio.
No obstante, es importante recalcar que esta viabilidad económica resultante, está fuertemente condicionada a la existencia del acuerdo estratégico con Ecoembes. La partnerización con esta entidad resulta clave para garantizar un flujo constante de ingresos y material, siendo un factor determinante para la recuperación de la inversión. En ausencia de dicha colaboración, el modelo de negocio perdería gran parte de su viabilidad.

En conclusión, el trabajo desarrollado demuestra que la integración de sistemas SDDR con procesos industriales avanzados de reciclaje constituye una alternativa técnica y económicamente viable, con un impacto positivo a nivel ambiental, como empresarial. Sin embargo, su materialización real dependerá en gran medida del establecimiento de alianzas estratégicas y del marco regulatorio, factores que condicionan de forma directa el éxito del proyecto.

En última instancia, este proyecto no debe entenderse únicamente como el diseño de una planta o un modelo de negocio, sino como un proyecto de cambio de paradigma en la gestión de residuos española. De la misma forma que los materiales tratados en la planta completan un ciclo y recuperan su valor, este trabajo refleja como la ingeniería puede transformar un problema ambiental en una oportunidad económica y social.
Más allá de los resultados técnicos y financieros obtenidos, el verdadero valor del proyecto reside en su capacidad de integrarse en un futuro sostenible, demostrando que, con un diseño adecuado y las alianzas estratégicas correctas (supermercados y gestores de residuos) se puede cerrar el ciclo y avanzar a una industria más eficiente, responsable y sostenible.

En este contexto, el trabajo presentado no solo valida la viabilidad de la solución planteada, sino que deja en evidencia el potencial de implementación que tiene este proyecto en la industria. La combinación de los dos modelos de negocio configura una oportunidad de alto potencial en el mercado actual. Es precisamente esta sinergia la que permite que el proyecto vaya más allá del ámbito académico, posicionándose como una propuesta innovadora, escalable y con capacidad real de implementación, reflejando cómo la ingeniería, cuando se alinea con el entorno y sus actores, no solo resuelve problemas, sino que genera modelos de negocio con impacto y recorrido.

7. Bibliografía

1. Parlamento Europeo. Reciclaje y residuos de plástico en la UE: hechos y cifras [Internet]. 2025 [citado 6 de febrero de 2026]. Disponible en: https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20181212STO21610/reciclaje-y-residuos-de-plastico-en-la-ue-hechos-y-cifras
2. Ecoembes. Quiénes somos [Internet]. [citado 6 de febrero de 2026]. Nuestra razón de ser y propósito. Disponible en: https://www.ecoembes.com/es/conoce-ecoembes/que-es-ecoembes/nuestra-razon-de-ser-y-proposito
3. Plastics Recyclers Europe. Plastics Recycling Industry Figures 2024 [Internet]. Brussels, Belgium; 2024 [citado 6 de febrero de 2026]. Disponible en: https://www.plasticsrecyclers.eu/wp-content/uploads/2025/11/Statistics_2025_Final.pdf
4. Revista Técnica de Medio Ambiente. La definición de plástico reciclado en la UE y su impacto en la industria del PET [Internet]. 2026 [citado 6 de febrero de 2026]. Disponible en: https://www.retema.es/actualidad/la-definicion-de-plastico-reciclado-en-la-ue-y-su-impacto-en-la-industria-del-pet
5. Revista Técnica de Medio Ambiente. España alcanza el objetivo europeo de reciclaje de envases de aluminio fijado para 2025 un año antes [Internet]. 2025 [citado 6 de febrero de 2026]. Disponible en: https://www.retema.es/actualidad/espana-alcanza-el-objetivo-europeo-de-reciclaje-de-envases-de-aluminio-fijado-para-2025
6. Plastics Europe. The Circular Economy for Plastics – A European Analysis 2024 [Internet]. Brussels, Belgium; marzo de 2024 [citado 6 de febrero de 2026]. Disponible en: https://plasticseurope.org/knowledge-hub/the-circular-economy-for-plastics-a-european-analysis-2024/?utm
7. P.G. Cada español consume al año 22,7 kilos de plástico de un solo uso. El Periódico [Internet]. 21 de junio de 2024 [citado 6 de febrero de 2026]. Disponible en: https://www.elperiodico.com/es/economia/20240621/espanol-consume-ano-22-7-plastico-solo-uso-117690247
8. Thermolympic. Industria del plástico en Europa 2025: datos y tendencias [Internet]. 2025 [citado 6 de febrero de 2026]. Disponible en: https://www.thermolympic.es/industria-plastico-europa-2025/
9. Arias Aranda D, Minguela Rata B. Decisiones estratégicas de la dirección y producción de operaciones. Madrid, España: Ediciones Pirámide; 2024. 22-204 p.
10. Wood Mackenzie. Polymer demand scenarios: a little more conversation, a little less plastic [Internet]. 2023 [citado 6 de febrero de 2026]. Disponible en: https://www.woodmac.com/news/opinion/polymer-demand-scenarios-a-little-more-conversation-a-little-less-plastic/
11. KPI Depot. Plant Utilization Rate KPI [Internet]. 2025 [citado 10 de febrero de 2026]. Disponible en: https://kpidepot.com/kpi/plant-utilization-rate?utm_.com
12. Pacto Mundial Red España. Reglamento (UE) 2025/40 sobre los envases y residuos de envases [Internet]. Madrid, España; 2024 [citado 6 de febrero de 2026]. Disponible en: https://www.pactomundial.org/leyes-directivas-normativas-sostenibilidad/reglamento-ue-envases-residuos-envases/#:~:text=el%20siguiente%20porcentaje%20m%C3%ADnimo%20de%20contenido%20reciclado,para%20agrupar%20productos%20(botellas%2C%20latas%2C%20tarros%2C%20etc.)

13. Pacto Mundial - Red España. 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). 17 Objetivos de Desarrollo para transformar el mundo [Internet]. 2026 [citado 22 de marzo de 2026]. Disponible en: https://www.pactomundial.org/que-puedes-hacer-tu/ods/
14. Gobierno de Navarra. Navarra pone en marcha un sistema pionero de retorno de envases en el Estado para fomentar la recogida de botellas de plástico y latas este verano. Navarra.es [Internet]. 22 de julio de 2025 [citado 6 de febrero de 2026]. Disponible en: https://www.navarra.es/es/-/nota-prensa/navarra-pone-en-marcha-un-sistema-pionero-en-el-estado-para-fomentar-la-recogida-de-botellas-de-plastico-y-latas-este-verano
15. Tomra ASA. Latvia's deposit return scheme achieves 80% return rate at two-year anniversary [Internet]. 2024 [citado 6 de febrero de 2026]. Disponible en: https://www.tomra.com/reverse-vending/media-center/feature-articles/latvia-deposit-return-scheme
16. Tomra ASA. Lithuania exceeds container return rate expectations [Internet]. 2026 [citado 6 de febrero de 2026]. Disponible en: https://www.tomra.com/reverse-vending/media-center/feature-articles/lithuania-exceeds-container-return-rate-expectations#See%20Lithuania's%20results
17. Ministerio de Agricultura P y A. Informe Consumo Alimentario 2023 [Internet]. 2024 [citado 6 de febrero de 2026];75-7. Disponible en: https://www.mapa.gob.es/dam/mapa/contenido/alimentacion/temas/consumo-y-tendencias-en-alimentacion/panel-de-consumo-alimentario/ultimos-datos/consumo-2023/informe_2023_alta.pdf
18. Puro Marketing. El 80% de los españoles prefiere comprar en establecimientos que ofrecen programas de fidelización [Internet]. 2013 [citado 6 de febrero de 2026]. Disponible en: https://www.puromarketing.com/88/18582/espanoles-prefiere-comprar-establecimientos-ofrecen-programas-fidelizacion
19. Galindo S. Autónomos y Emprendedores, Economía Real [Internet]. 2026 [citado 7 de febrero de 2026]. El comercio de proximidad gana peso: los clientes compran más de dos veces por semana en estas tiendas. Disponible en: https://www.autonomosyemprendedor.es/articulo/autonomos/comercio-proximidad-gana-peso-clientes-compran-mas-dos-veces-semana-tiendas/20260121141323050857.html?utm
20. Madrid alcanza su máximo histórico de población con más de 3,5 millones de habitantes. Servimedia [Internet]. 14 de mayo de 2025 [citado 7 de febrero de 2026]. Disponible en: https://www.servimedia.es/noticias/madrid-alcanza-maximo-historico-poblacion-mas-3-5-millones-habitantes/1411789059#:~:text=El%20Ayuntamiento%20de%20Madrid%20inform%C3%B3,con%20respecto%20al%20a%C3%B1o%20anterior.
21. Galán J, Sevillano Pires L. El mapa de los supermercados en Madrid: ¿hay cadenas diferentes en barrios ricos y pobres? El País [Internet]. 18 de agosto de 2024 [citado 7 de febrero de 2026]. Disponible en: https://elpais.com/espana/madrid/2024-08-18/el-mapa-de-los-supermercados-en-madrid-hay-cadenas-diferentes-en-barrios-ricos-y-pobres.html
22. Poli Santa Fe. El peso de las botellas de plástico: tamaño, material y reciclaje [Internet]. [citado 29 de marzo de 2026]. Disponible en: https://polisantafe.com.ar/peso-de-una-botella-de-plastico/?utm_
23. Ecoembes. Criterios básicos de dimensionamiento de plantas de selección. 2026. p. 35-35. Plantas-de-seleccion-de-envases-ligeros.
24. Returmatic. Returmatic R20 [Internet]. 2026 [citado 8 de febrero de 2026]. Efficient and reliable reverse vending machines. From experts. Disponible en: https://returmatic.com/alu-pet-rvm-drs

25. Tomra ASA. TOMRA Systems Brochure [Internet]. 2025 [citado 8 de febrero de 2026]. Disponible en: https://www.tomra.com/-/media/project/tomra/tomra/solutions/bottle-and-can-recycling/documentation/product-brochures/english/product_brochure_digital_s2_aug_25.pdf
26. Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado. Real Decreto 1644/2008, por el que se establecen las normas para la comercialización y puesta en servicio de las máquinas. Documento BOE-A-2008-16387 [Internet]. España; 10 de octubre de 2008. p. 40995-1030. Disponible en: https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2008-16387
27. jinggong. Pedazos de Acero Cargador del ataque [Internet]. 2025 [citado 11 de febrero de 2026]. Disponible en: https://es.jinggongexcavator.com/excavator-hydraulic-of-grab-steel-scrap-grapple_p207.html
28. Lindex Recycling. Direct Industry Connect [Internet]. [citado 11 de febrero de 2026]. Tolva de alimentación. Disponible en: https://www.directindustry.es/prod/lyndex-recycling-systems-ltd/product-90911-2656966.html
29. Mecalsa. Sistemas de recepción y transporte de subproducto [Internet]. [citado 12 de febrero de 2026]. TOLVA DE RECEPCIÓN DE SUB-PRODUCTO, MECALSA tipo: MC TVFB. Disponible en: https://mecal-sa.com/es/sistemas-de-recepcion-y-transporte-de-subproducto/657-tolva-de-recepcion-de-sub-producto-tipo-mc-tvfb.html
30. Allert Catalog. Cintas transportadoras de placas articuladas [Internet]. [citado 12 de febrero de 2026]. p. 26-8. Disponible en: https://www.allert.com/fileadmin/user_upload/pdf/160215_allert_produkt_rz_cc-spa-es_web.pdf
31. Industrial Quick Search. Conveyor Systems: Types, Requirements and Applications [Internet]. [citado 11 de febrero de 2026]. Disponible en: https://www.iqsdirectory.com/articles/conveyors/conveyor-system.html
32. sanyuantangcn. Cinta transportadora tipo Z [Internet]. [citado 12 de febrero de 2026]. Disponible en: https://sanyuantangcn.com/es/product/z-type-conveyor-belt-manufacturer.html
33. Edge Innovate. Trommel Screens: The Ultimate Guide [Internet]. 2025 [citado 12 de febrero de 2026]. Disponible en: https://edgeinnovate.com/trommel-screens-the-ultimate-guide/#:~:text=Trommels%20are%20typically%20operated%20at,residence%20time%20for%20optimal%20results.
34. GEP Ecotech. Brochure. Trommel Screen for Sale.
35. Magsy. Separadores magnéticos de los metales no magnéticos (Eddy current separator) [Internet]. [citado 13 de febrero de 2026]. Disponible en: https://magsy.es/25100-separadores-magneticos-de-los-metales-no-magneticos
36. Sollau. Datasheet ECS-C 500 RAM [Internet]. [citado 13 de febrero de 2026]. Disponible en: https://w25104.em1.emersion.eu/card?product=ecs-c-500&lang=en
37. Enerpat. Fabricante de empacadoras de latas de aluminio [Internet]. [citado 13 de febrero de 2026]. Disponible en: https://es.enerpatrecycling.com/aluminum-can-baler.html
38. ERGA. Separador óptico ReSortika BF [Internet]. 2025 [citado 13 de febrero de 2026]. Disponible en: https://ergaglobal.com/es/catalog/separadores-opticos/separador-ptico-re-sortika-bf/
39. Ecoembes. Plantas de reciclaje [Internet]. [citado 13 de febrero de 2026]. p. 57-9. Disponible en: https://www.ecoembesthecircularcampus.com/wp-content/uploads/2025/11/plantas-de-seleccion-de-envases-ligeros.pdf
40. Peaks-Eco. Separador óptico por infrarrojo cercano (NIR) [Internet]. [citado 13 de febrero de 2026]. Disponible en: http://wastemachineltd.com.ar/2-2-4-optical-sorting.html
41. Neue Herbold. Direct Industry Connect [Internet]. [citado 14 de febrero de 2026]. p. 1-3. Plastic Granulators SM Series . Disponible en: https://pdf.directindustry.es/viewerCatalog-

en/neue-herbold-maschinen-u-anlagenbau-gmbh/plastic-granulators-sm-series/50063-97603.html#open449357

42. EcoRecycling Today. Guía de lavado y secado de escamas de PET: Mejores prácticas para un reciclaje de alta calidad [Internet]. [citado 14 de febrero de 2026]. Disponible en: https://www.recyclingtoday.org/es/blogs/news/pet-flakes-washing-drying-guide#:~:text=%23%20Par%C3%A1metros:%20Par%C3%A1metro%20%7C%20Sugerido%20%7C%20Objetivo,15%E2%80%9320%20minutos%20%7C%20Garantiza%20una%20limpieza%20profunda
43. Erema Plastic Recycling Systems. BOTTLE-TO-BOTTLE [Internet]. 2024 [citado 15 de febrero de 2026]. Disponible en: https://www.erema.com/assets/media_center/folder/vacunite_vacurema_b2b_2024_11_en.pdf
44. Continental. ContiTech Select Catalog [Internet]. 2018 [citado 19 de febrero de 2026]. p. 21-2. Disponible en: https://www.goodyearbelting.com/pdf/Contitech_2018_Heavy_Duty_Conveyor_Belt_Catalog/index.html#page=22
45. Ecoembes. Plantas de selección de EELL [Internet]. 2025 [citado 20 de febrero de 2026]. Plantas de selección. Disponible en: https://www.ecoembes.com/es/administraciones-publicas/plantas-de-seleccion
46. Luis Cano. Radiografía del Madrid de los siete millones de habitantes: ¿qué municipios ganan población y cuáles pierden? ABC [Internet]. 21 de febrero de 2025 [citado 20 de febrero de 2026]. Disponible en: https://www.abc.es/espana/madrid/radiografia-madrid-siete-millones-habitantes-municipios-ganan-20250218154325-nt.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.abc.es%2Fespana%2Fmadrid%2Fradiografia-madrid-siete-millones-habitantes-municipios-ganan-20250218154325-nt.html
47. ENF. Plantas de Reciclaje de Plástico en España [Internet]. 2025 [citado 20 de febrero de 2026]. Disponible en: https://es.enfplastic.com/directory/plant/Spain
48. Energycle. ¿Cuanto cuesta iniciar una empresa de reciclaje de plástico? [Internet]. 2025 [citado 22 de febrero de 2026]. Disponible en: https://www.energycle.com/es/cual-es-el-costo-asociado-con-iniciar-una-empresa-de-reciclaje-de-plastico/
49. EuriborDiario. 2026 [Internet]. [citado 28 de febrero de 2026]. Euríbor Diario en febrero 2026. Disponible en: https://www.euribordiario.es/
50. Idealista. 14 naves en alquiler en Collado Villalba, Madrid [Internet]. 2026 [citado 27 de febrero de 2026]. Disponible en: https://www.idealista.com/alquiler-locales/collado-villalba-madrid/con-naves/
51. Proaler. Seguros multirriesgo industrial. Comparador y mediador de seguros [Internet]. 2026 [citado 27 de febrero de 2026]. Disponible en: https://www.proaler.com/seguros-multirriesgo-industrial?
52. Sage. Sage 50 [Internet]. 2026 [citado 27 de febrero de 2026]. Disponible en: https://www.sage.com/es-es/productos/sage-50cloud-bversion/?utm_source=BING&utm_medium=paidsearch&utm_campaign=ES%7CBing%7CSmall%7CBrand_Sage50/Main(MaxConv-Multiple)NA_SMA50UD_&utm_content=Brand_Sage50/Main(Multiple)%7CContabilidad/Main&utm_term=sage+programa+contabilidad&&msclkid=382f4c9ef709137883be253f996edaa8&utm_source=bing&utm_medium=cpc&utm_campaign=ES%7CBing%7CSmall%7CBrand_Sage50%2FMain(MaxConv-Multiple)NA_SMA50UD_&utm_term=sage%20programa%20contabilidad&utm_content=Brand_Sage50%2FMain(Multiple)%7CContabilidad%2FMain&gclid=382f4c9ef709137883be253f996edaa8&gclsrc=3p.ds&gad_source=7&gad_campaignid=21446217070

53. Aigües de Barcelona. La factura del agua para suministros comerciales/ industriales [Internet]. [citado 29 de marzo de 2026]. Disponible en: https://www.aiguesdebarcelona.cat/documents/20126/844602/Triptico-tarifas-AB-comercial-032024.pdf/
54. Comisión Nacional de los Mercados y Competencia. Comparador de Ofertas de Energía [Internet]. [citado 29 de marzo de 2026]. Disponible en: https://comparador.cnmc.gob.es/comparador/formulario/7756902CB0F745C092EDAE043210CE1DC00249021A7F856DB02D3060799123162F148074C5B191B6DCC04945FEC6C976861745828F6D46604B56CA74FDD895F6E565D288997EEA4B72BFFAFFEE0195CC99E9EE0B804E76C69B49CC9A0B31F1AA28BC90707B0EC885E2F1CDA3277CB25C486FFE0E48F74386E87512C50314F10F4BCAE3858ADE572BB1701332F4777DA466D8B52A211602DB8D97B1C9F3C985447DFF691B381097C3F804C3CBDFDE86CC2D99A8A8540521618B46E240000000000000000000000000000000000000000000000000059AEDFC10D7279C5EED14016454000000088B8
55. CubosFuera. Cuanto cuesta sacar cubos de basura en Madrid [Internet]. [citado 2 de abril de 2026]. Disponible en: https://cubosfueramadrid.es/precio-sacar-cubos-de-basura-madrid/
56. Iberdrola. Ofertas Plan Online [Internet]. 2026 [citado 25 de febrero de 2026]. Disponible en: https://www.iberdrola.es/luz/ofertas-plan-online/digital?utm_source=bing&utm_medium=cpc&utm_content=1338108113116615&utm_campaign=iberdrola_alwayson_search_energia_generic_gen__0jxm6e&utm_term=tarifas%20electricas%20espa%C3%B1a&wtarget=kwd-83632860014179:loc-170&wcmp=604865262&&msclkid=27e9ef77a34117419a6f86e8a5f5cfce&utm_source=bing&utm_medium=cpc&utm_campaign=iberdrola_alwayson_search_energia_generic_gen__0jxm6e&utm_term=tarifas%20electricas%20espa%C3%B1a&utm_content=General%20Luz&gclid=27e9ef77a34117419a6f86e8a5f5cfce&gclsrc=3p.ds&gad_source=7&gad_campaignid=21893182552
57. EcoRecyclingToday. Calculadora de reciclaje de plástico: Calcule el valor de PET, HDPE y más [Internet]. 2026 [citado 27 de febrero de 2026]. Disponible en: https://www.recyclingtoday.org/es/blogs/news/plastic-recycling-calculator-estimate-value-of-pet-hdpe-more
58. El Desguace. Precio del Aluminio hoy [Internet]. 2026 [citado 27 de febrero de 2026]. Disponible en: https://eldesguace.net/aluminio/
59. Sielaff. Compact take-back systems [Internet]. 2026 [citado 21 de marzo de 2026]. Disponible en: https://sielaff.de/produkte/ruecknahmesysteme/standalone-loesungen
60. Trautwein SB Technik. BottleComp Two [Internet]. 2026 [citado 21 de marzo de 2026]. Disponible en: https://trautwein-sb.de/en/product/the-future-proof/

Dedicatoria

"Hay trayectos que solo se vuelven posibles gracias a quienes los recorren con nosotros"

Este trabajo está dedicado a quienes me han acompañado incondicionalmente a lo largo de estos cuatro años de carrera. El resultado detrás de estas páginas no es solo mío, sino también de todas aquellas personas que, de una forma u otra, aportaron su grano de arena para que este momento llegue.

La mayor parte del mérito es de mis padres. A la distancia y también en lo cotidiano, estuvieron presentes en cada etapa de este camino: las comidas después de un día largo, las esperas hasta altas horas de la noche y la paciencia infinita de escuchar resúmenes de ingeniería sin siquiera entender demasiado bien de qué estaba hablando. Detrás de cada uno de esos gestos hubo algo mucho más grande: el amor silencioso y constante con el que los padres sostienen a sus hijos incluso cuando el camino se vuelve exigente. Gracias a ellos hoy tengo el privilegio de estar presentando este trabajo y de poder aspirar a ser llamado "Ingeniero".

Porque ningún camino es demasiado largo cuando se recorre con buena compañía, una parte de este logro también pertenece a mis amigos de la carrera, con quienes compartí este trayecto incluso en las clases más densas: Adam, Migue, Chorch, Meryta y Ruth. Entre apuntes, exámenes y largas horas de facultad, hicieron que el peso del camino fuera mucho más liviano.

También quería dedicar unas líneas de este trabajo a Renata, que desde la distancia estuvo siempre ahí: escuchando, acompañando y sosteniendo, aun cuando el camino para los dos no siempre fue en línea recta.

Y por último, a mi amigo de la infancia Rulo. A pesar de la lejanía en estos últimos cinco años, desde que somos chicos siempre manifestó este momento llamándome "Ingeniero Pérez", incluso mucho antes de que realmente pudiera serlo.

El aporte de cada una de estas personas hizo de un combustible de mezcla rica para que este motor no deje de funcionar hasta llegar a destino.

Este trabajo también es de ustedes.



Tomás Juan Trebino Nelli

En Madrid, a 22 de mar. de 26.

Anexo

1. Justificación del proyecto 70

1.1. ODS alineados 70

2. Alcance del proyecto 71

2.1. Limitaciones del proyecto 71

3. Alcance geográfico y cobertura de mercado 72

3.1. Alcance geográfico inicial (corto plazo) 72

3.2. Cobertura de mercado inicial 72

3.3. Alcance geográfico a medio plazo (fase de expansión) 72

3.4. Alcance geográfico a largo plazo 72

4. Descripción de colaboración con Ecoembes 73

4.1. Naturaleza de la colaboración 73

4.2. Alcance operativo 73

4.3. Modelo económico 73

4.4. Responsabilidades de las partes 74

4.4. Control, seguimiento y KPIs 74

4.5. Riesgos y mecanismos de mitigación 74

4.6. Duración y naturaleza del acuerdo 74

5. Descripción empresas proveedoras PfandAutomaten 75

5.1. Tomra Systems 75

5.2. Sielaff GmbH & Co. KG 75

5.3. Returmatic Solutions Zrt. 75

5.4. Trautwein SB Technik GmbH 75

6. Selección del modelo 76

6.1. Tomra T70 DUAL (Tomra Systems) 76

6.2. Si Compact XL (Sielaff): 76

6.3. R20 (Returmatic): 77

6.4. Bottlecomp TWO (Trautwein): 77

***7.* Reducción de emisiones del proyecto 78**

8. Layout Propuesto 79

9. Inversión inicial 82

9.1. Presupuesto Trautwein 82

10. Análisis de viabilidad económica 84

10.1. Flujos de Caja (1º a 5º Año) 84

10.2. Cálculo del VAN 84

1. Justificación del proyecto

1.1. ODS alineados



Figura 43: ODS del proyecto (13).

Los siguientes ODS se alinean con el proyecto de la siguiente manera:

- **12. Producción y Consumo Responsables**: Este proyecto encaja directamente ya que fomenta el reciclaje de residuos, reduce el uso de materias primas vírgenes, colabora con la gestión eficiente de residuos y promueve la economía circular.

- **13. Acción por el clima:** El reciclaje de estos residuos y la indirecta relación con la reducción de producción de materias primas vírgenes, reduce las emisiones de CO2, que serán calculadas en apartados próximos.

- **9. Industria, Innovación e Infraestructura**: el desarrollo de una infraestructura industrial con implementación de reciclaje innovador y maquinaria no tradicional contribuye directamente a este objetivo.

- **11. Ciudades y comunidades sostenibles:** este proyecto mejorará la gestión de residuos en cada municipio que implemente las SDDR, integrando a la comunidad con la reducción de contaminación local a través de estas máquinas presentes en supermercados.

- **5. Trabajo decente y crecimiento económico**: cualquier inversión como esta aporta valor a la economía, creando empleo y aumentando el PBI del país mediante la contribución económica del mismo.

Directamente, este proyecto se alinea con los ODS previamente mencionados, aunque indirectamente puede tener una contribución relativa a muchos otros. Es importante destacar que la alineación directa con estos 5 ODS hace de este proyecto sumamente relevante en carácter ambiental.

2. Alcance del proyecto

2.1. Limitaciones del proyecto

El siguiente proyecto presenta una serie de limitaciones derivadas de su enfoque académico, de carácter piloto de la instalación y los supuestos adoptados:

- El proyecto se limita al diseño técnico y económico preliminar, sin incluir la ejecución real, puesta en marcha, ni validación operativa de la planta.
- No se desarrollará el diseño estructural de la nave industrial, no se contemplan obras civiles de envergadura, al asumirse una nave alquilada ya existente.
- El diseño de la cadena de reciclaje se centra exclusivamente en envases de PET, quedando fuera otros plásticos o materiales distintos al PET y aluminio.
- El tratamiento de las latas de aluminio se limita a la compactación y comercialización, sin abordar procesos posteriores de fundición o transformación metalúrgica.
- Las máquinas que componen la cadena de reciclaje no serán diseñadas a nivel constructivo, sino que se realizará la selección y dimensionamiento de modelos comerciales existentes, analizando su adecuación técnica para conformar una cadena de reciclaje integral y coherente.
- Las máquinas automáticas de retorno se analizan como producto industrial dentro de un modelo de renting, sin desarrollar su diseño interno ni procesos de fabricación.
- El mantenimiento preventivo como correctivo, incurrirá en un coste asumido al contratar el servicio externo.
- La logística de recolección de residuos se considera de forma estimativa y externalizada, sin diseñar rutas óptimas, flota propia, ni sistemas avanzados de gestión logística.
- El análisis de recursos humanos se limita a la definición de puestos y costes, sin profundizar en políticas de selección, formación y gestión de personal.
- No se aborda la gestión comercial legal y empresarial de la compañía, tales como forma jurídica, estructura societaria, aspectos fiscales o regulatorios específicos.
- No se desarrolla la gestión comercial directa de clientes finales del material reciclado, asumiendo la existencia del mercado y precios de referencia.
- El análisis económico financiero se basa en supuestos de mercado y estimaciones, por lo que los resultados obtenidos buscarán diferir los menos posible de un escenario real de implantación.

3. Alcance geográfico y cobertura de mercado

3.1. Alcance geográfico inicial (corto plazo)

En la fase inicial, el proyecto se limitará a su alcance geográfico en una región estratégica donde Ecoembes carezca de presencia, estableciendo una zona acotada y homogénea desde el punto logístico y operativo.

En cuanto a la línea secundaria, la puesta en marcha se realizará mediante la adquisición de hasta 15 máquinas SDDR para su ubicación en supermercados de gran y mediana superficie que quieran contar con el servicio, seleccionados en función de densidad de población, volumen potencial de retorno y accesibilidad logística.

3.2. Cobertura de mercado inicial

La cobertura de mercado en la fase inicial será limitada, progresiva y controlada, ajustándose a la capacidad instalada de la cadena de reciclaje y al volumen de residuos de PET y aluminio asignado por Ecoembes en el marco del acuerdo de partenariado. Esta estrategia permite priorizar la eficiencia técnica y operativa del sistema durante la fase de puesta en marcha, evitando sobrecargas y garantizando la estabilidad del proceso.

La empresa actuará como operador industrial especializado, asumiendo la responsabilidad del procesamiento y valorización de los residuos derivados, mientras que la entrada de material se dimensionará en función de la capacidad inicial de tratamiento establecida en el diseño de planta.

De forma complementaria, y como línea de negocio secundaria, la cobertura incluirá un número limitado de instalaciones de máquinas SDDR bajo modalidad de renting, condicionado a la disponibilidad de equipos y a la capacidad de absorción del sistema.

En esta fase inicial, las actividades desarrolladas por la empresa se estructuran de la siguiente manera:

- Operación y gestión del sistema SDDR: la empresa coordinará la instalación de las máquinas en los puntos seleccionados y gestionará su operación. Las tareas de mantenimiento preventivo y correctivo se realizarán mediante subcontratación especializada, con el objetivo de garantizar la disponibilidad operativa de los equipos.
- Gestión logística de los residuos: la recogida y el transporte de los residuos de PET y aluminio, tanto procedentes del acuerdo con Ecoembes como de las máquinas SDDR, se realizarán a través de servicios logísticos tercerizados.

Este enfoque permite una implantación escalonada del proyecto, minimizando riesgos operativos y facilitando la posterior ampliación de la capacidad de tratamiento y de la cobertura de mercado.

3.3. Alcance geográfico a medio plazo (fase de expansión)

A medio plazo, una vez convalidado el correcto funcionamiento técnico y económico del sistema, el proyecto contemplará una expansión progresiva, manteniendo el mismo modelo de operaciones. Esta expansión incluirá adquisición de nuevas máquinas SDDR, extensión a municipios donde no haya cobertura y un aumento en la capacidad operativa de la planta.

Todos estos cambios se producirán una vez que se asegure una sinergia de procesos y rentabilidad económica.

3.4. Alcance geográfico a largo plazo

A largo plazo, el modelo desarrollado es replicable en otras ciudades o regiones, manteniendo la misma lógica de integración. Para esta fase, se contemplará recurrir a una ronda de inversión, ya que el riesgo que implicará es mayor y se opta por dividir la responsabilidad.

No obstante, estas últimas fases quedan fuera del alcance descripto en el proyecto.

4. Descripción de colaboración con Ecoembes

4.1. Naturaleza de la colaboración

La relación establecida con Ecoembes se configura como una alianza estratégica orientada a maximizar la eficiencia en la gestión y valorización de residuos de envases, especialmente PET y aluminio. Esta colaboración se fundamenta en un modelo de cooperación operativa y económica en el que ambas partes contribuyen de forma complementaria dentro de la cadena de valor del reciclaje.

Por un lado, Ecoembes actúa como proveedor principal de materia prima secundaria, garantizando el suministro continuo de residuos previamente recogidos a través de sus sistemas de gestión. Por otro lado, la planta diseñada en el presente proyecto se encarga del tratamiento, clasificación, valorización y preparación de dichos residuos para su posterior comercialización.

4.2. Alcance operativo

El alcance de la colaboración incluye:

- **Suministro de residuos**:
  Ecoembes se compromete a entregar residuos de envases (principalmente PET y latas de aluminio) en condiciones adecuadas para su tratamiento, asegurando volúmenes constantes y calidad mínima predefinida.

- **Logística de transporte**:
  El transporte de los residuos hasta la planta corre a cargo de Ecoembes, reduciendo la necesidad de inversión en logística por parte de la planta y garantizando una cadena de suministro estable.

- **Recepción y control**:
  La planta realiza controles de calidad en la recepción (contenido impropio, humedad, mezcla de materiales), pudiendo rechazar o penalizar cargas fuera de especificación.

- **Procesamiento industrial**:
  La empresa operadora de la planta asume íntegramente las actividades de:
  1. Clasificación (NIR, corrientes de Foucault, etc.)
  2. Triturado y lavado
  3. Secado y extrusión (en el caso del PET)
  4. Compactación (aluminio)

- **Comercialización del producto reciclado**:
  Los materiales valorizados (escamas de PET, granza reciclada, aluminio compactado) son vendidos en el mercado secundario.

4.3. Modelo económico

El acuerdo establece un modelo de reparto de beneficios basado en la venta de los materiales reciclados:

- **Distribución de ingresos**:
  Los ingresos netos obtenidos por la venta de los productos reciclados se reparten en un **50% para Ecoembes y 50% para la empresa operadora de la planta.**

- **Estructura de costes**:

1. **Ecoembes:**
   Costes de recogida selectiva.
   Costes logísticos hasta planta.
2. **Planta:**
   Costes de inversión (CAPEX).
   Costes operativos (OPEX): energía, personal, mantenimiento, etc.

- **Determinación del beneficio neto**:
  El beneficio a repartir se calcula una vez descontados los costes operativos directos asociados al procesamiento y comercialización.

4.4. Responsabilidades de las partes

- **Ecoembes:**

1. Garantizar el suministro continuo de residuos.
2. Cumplir con estándares mínimos de calidad del material entregado.
3. Gestionar la logística de transporte hasta planta.
4. Colaborar en la trazabilidad de los residuos.

- **Empresa operadora:**

1. Diseñar, construir y operar la planta.
2. Asegurar la eficiencia del proceso industrial.
3. Cumplir con la normativa ambiental y de seguridad.
4. Maximizar la valorización de los residuos.
5. Gestionar la venta de los materiales reciclados.

4.4. Control, seguimiento y KPIs

Se establecen indicadores clave para evaluar el desempeño de la colaboración:

- Tasa de recuperación de material (%)
- Pureza del PET reciclado (%)
- Rendimiento del proceso (kg output / kg input)
- Coste por tonelada procesada (€ / t)
- Ingresos por tonelada valorizada (€ / t)

Ambas partes tendrán acceso a la información operativa relevante para garantizar transparencia en el reparto de beneficios.

4.5. Riesgos y mecanismos de mitigación

- Variabilidad en la calidad del residuo: controles de entrada y cláusulas de penalización.
- Fluctuación de precios del material reciclado: diversificación de compradores y contratos a medio plazo.
- Interrupciones en el suministro: acuerdos de volumen mínimo garantizado.
- Riesgos operativos: mantenimiento preventivo y redundancia en equipos críticos.

4.6. Duración y naturaleza del acuerdo

El acuerdo se plantea con una visión a largo plazo**,** alineada con la vida útil de la planta (10–15 años), permitiendo amortizar la inversión y consolidar la colaboración como parte estructural del sistema de reciclaje.

5. Descripción empresas proveedoras PfandAutomaten

5.1. Tomra Systems

Tomra Systems ASA es una empresa de Noruega, líder mundial en soluciones de recogida y reciclaje a través de máquinas automáticas de devolución de envases. Con más de 80.000 unidades instaladas en 60 países, la compañía es especialmente fuerte en Alemania, donde opera decenas de miles de máquinas integradas en el sistema de depósito y retorno de envases.

Su enfoque combina innovación tecnológica con sostenibilidad, apostando por sistemas de reconocimiento óptico, escaneo avanzado y compactación de alta eficiencia.

5.2. Sielaff GmbH & Co. KG

Sielaff, con sede en Herrieden (Alemania), es una empresa con más de 130 años de trayectoria en ingeniería mecánica y automatización. Actualmente su enfoque está en el desarrollo de sistemas de devolución de envases de alta fiabilidad y versatilidad. Sus soluciones de Pfandautomaten destacan por diseños modulares y adaptables: desde modelos para espacios reducidos hasta sistemas de gran capacidad para supermercado de alto volumen. El enfoque de Sielaff combina robustez y calidad alemana con personalización, ofreciendo máquinas que integran tecnologías de clasificación, compactación y gestión de datos, adaptadas a las necesidades logísticas de cada cliente.

La compañía se posiciona como un socio sólido que prioriza la calidad, durabilidad de sus equipos y la innovación tecnológica, respaldado por décadas de experiencia en el mercado europeo.

5.3. Returmatic Solutions Zrt.

Returmatic es una empresa húngara especializada en el diseño y suministro de Reverse Vending Machines y soluciones tecnológicas para sistemas de retorno de envases. Con 19 años de experiencia, sus productos incluyen una variedad de máquinas modulares con amplia capacidad de almacenamiento y unidades de compactación integradas.

La compañía actúa también como proveedor de tecnología tanto para minoristas como para operadores de sistemas SDDR, con una filosofía centrada en la innovación, eficiencia operativa y sostenibilidad ambiental.

5.4. Trautwein SB Technik GmbH

Trautwein es una empresa alemana con sede en Ostfildern especializada en soluciones de autoservicio y automatización. La compañía ofrece una amplia variedad de soluciones en automatismos, donde entre ellas destacan las Pfandautomaten. Desarrollan sistemas orientados tanto a envases de un solo uso como a botellas reutilizables, apostando por la fiabilidad y la facilidad de integración en supermercados y comercios. Su enfoque se basa en la ingeniería práctica, soluciones duraderas y una relación estrecha con sus clientes.

6. Selección del modelo

6.1. Tomra T70 DUAL (Tomra Systems)

- Envases: 2 tipos de envases aceptados: PET y aluminio.
- Compactador: de plástico y aluminio.
- Capacidad: 2 depósitos, cada uno de hasta 1500 botellas de PET compactadas y 6000 latas de aluminio. 1 Europallet por depósito.
- Consumo de energía-red eléctrica: Inactivo 61-Máx. 3,7 kW.
- Área ocupada aproximada: 1,35 m^2.
- Tecnología aplicada: reconocimiento del envase, peso, lector 360º de código de barras.
- Velocidad: hasta 45 envases/minuto.
- Interfaz: pantalla táctil 10,4'' con impresora térmica.



Figura 44: Tomra T70 Dual (25).

6.2. Si Compact XL (Sielaff):

- Envases: 2 tipos de envases aceptados: PET y aluminio.
- Compactador: de plástico y aluminio.
- Capacidad: 2 Europallets, 1 por depósito.
- Consumo de energía-red eléctrica: Inactivo 70 W-Máx. 4, kW.
- Área ocupada aproximada: 2,78 m^2.
- Tecnología aplicada: reconocimiento de contenedores Omega 360° sin rotación y basado en cámara en tiempo real. Básculas de precisión: reconocimiento de peso, código de barras y forma, marcado de seguridad y reconocimiento.
- Velocidad: no hay información disponible
- Interfaz: Display 10.1' HD de alta resolución con impresora.



Figura 45: Si Compact XL(59).

6.3. R20 (Returmatic):

- Envases: 2 tipos de envases aceptados: PET y aluminio.
- Compactador: de plástico y aluminio.
- Capacidad: hasta 8000 latas de aluminio o 2250 botellas de PET, customizable, con separación de material.
- Consumo de energía-red eléctrica: Inactivo 55 W-Máx 750 W
- Área ocupada aproximada: 1,6 m^2.
- Tecnología aplicada: Reconocimiento por peso, material o código de barras. Sistema de reportes incluido y administración remota.
- Velocidad: 45 envases/minuto.
- Interfaz: Display más lectura de QR.



Figura 46: R20 Returmatic (24).

6.4. Bottlecomp TWO (Trautwein):

- Envases: 2 tipos de envases aceptados: PET y aluminio.
- Compactador incluido.
- Capacidad: Botellas PET 0,5 L: 750 unidades y Latas 330 ml: 900 unidades.
- Consumo energético: sin información detallada.
- Área ocupada aproximada: 2,52 m^2.
- Tecnología aplicada: Reconocimiento por geometría de contorno, pantalla de 12'' para publicidad y diálogo con el usuario.
- Impresora térmica eficiente (hasta 250 mm/s).



Figura 47: BottleComp Two (60).

7. Reducción de emisiones del proyecto

Con el objetivo de evaluar el impacto ambiental a nivel de emisiones del proyecto, se realiza una aproximación del ahorro de emisiones de dióxido de carbono (CO_2) derivado de la actividad de reciclaje, considerando tanto las emisiones evitadas por la recuperación de material como las emisiones generadas por el funcionamiento de la planta.
El reciclaje de materiales como el PET y el aluminio permite evitar emisiones significativas en comparación con la producción de materiales vírgenes, ya que la transformación requiere un menor consumo energético.

Factores de emisión medios utilizados:

- 2,5 tCO_2 por tonelada de PET reciclado.
- 9 tCO_2 por tonelada de aluminio reciclado.

En base a la capacidad de tratamiento anual definida en el proyecto, se obtienen las siguientes emisiones evitadas:

PET:

$$11.800 \frac{toneladas}{año} * 2{,}5 \frac{toneladas\ CO2}{tonelada}$$

$$PET = 29.500 \frac{toneladas\ CO2}{año}$$

Aluminio:

$$1.800 \frac{toneladas}{año} * 9 \frac{toneladas\ CO2}{tonelada}$$

$$Aluminio = 16.200 \frac{toneladas\ CO2}{año}$$

Por lo tanto, se obtiene un ahorro total de 45.700 toneladas de CO_2 por año.

Por otro lado, es necesario considerar las emisiones asociadas al consumo energético de la planta. Calculado el consumo de 12.000 kWh por día y 250 días laborales:

$$Consumo\ anual = 3.000.000 \frac{kWh}{año}$$

Aplicando un factor de emisión de la red eléctrica en España de 0,23kg CO_2/kWh:
Emisiones generadas:

$$3.000.000 * 0{,}23 = 690.000 \frac{kg\ CO2}{año} = 690 \frac{toneladas\ CO2}{año}$$

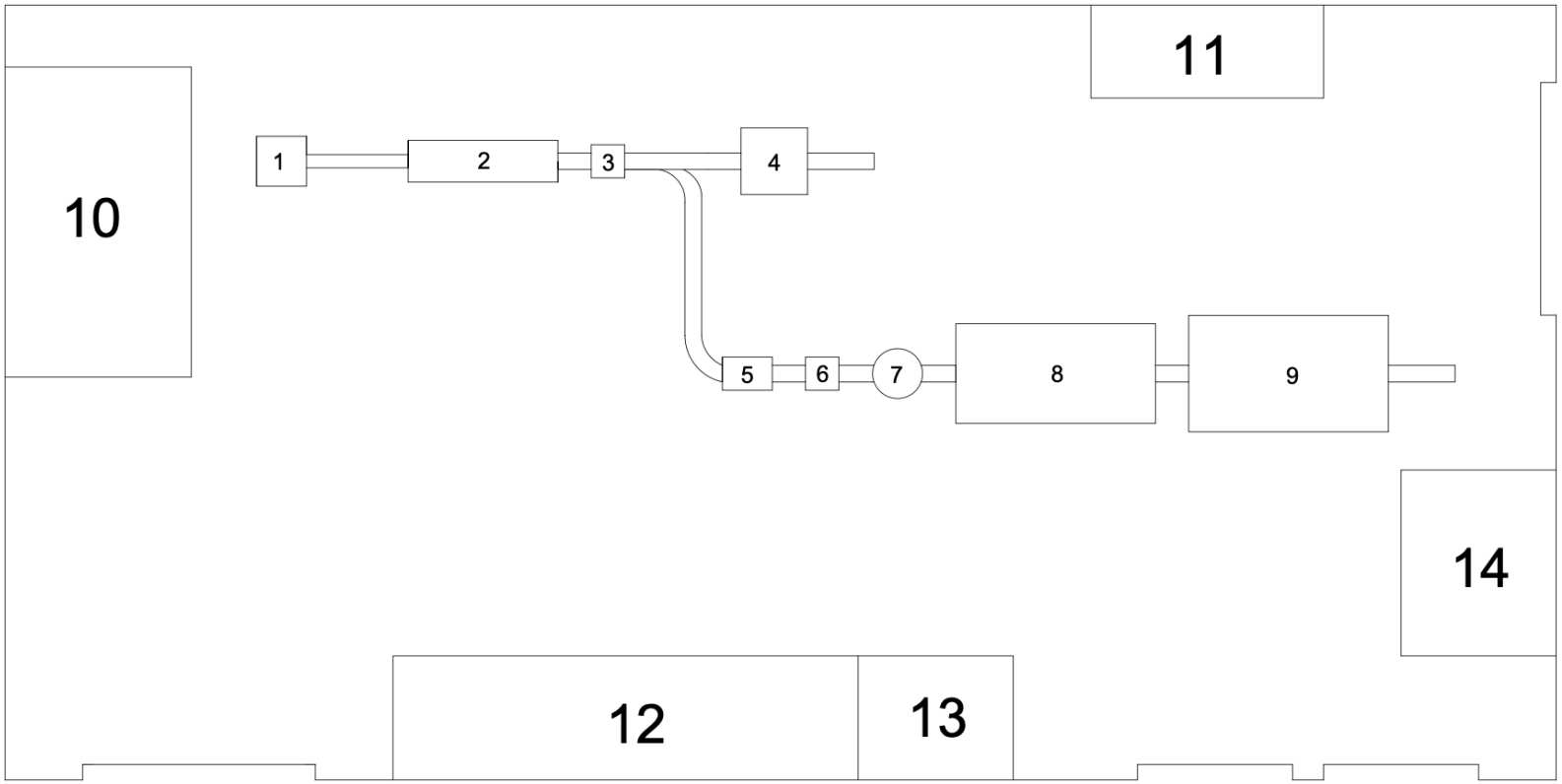
Finalmente, las emisiones evitadas resultan en:

$$45.700 - 600 = 45.100\ \frac{toneladas\ CO2}{año}$$

Los resultados obtenidos demuestran el impacto positivo del proyecto desde el punto de vista ambiental, con un ahorro de 45.000 toneladas de CO_2 anuales. Esto refuerza la viabilidad del proyecto no solo en lo económico, sino como herramienta de ayuda al cambio climático, alineándose con los ODS correspondientes.

8. Layout Propuesto

El Layout propuesto desarrolla conceptualmente la implantación de la línea de proceso, en el que se representarán aproximadamente las superficies ocupadas por cada equipo y su disposición relativa.
También tiene como objetivo entender la separación de ambos flujos de materiales, zonas de trabajo, de almacenamiento y flujo de maquinaria y personal. Se realizarán dos planos conceptuales, uno meramente con la disposición de las máquinas, y el otro tendrá el flujo. De esta manera, se podrá visualizar la materialización de la planta de manera esquemática.



1. Tolva de recepción
2. Trómel de clasificación
3. Eddy Current
4. Prensa de aluminio
5. Separador óptico NIR
6. Molino
7. Tanque de lavado
8. Sistema compuesto: Centrifugadora-Secadora
9. Sistema compuesto: Extrusora-Pelletizadora
10. Playa de descarga
11. Zona de existencias 1
12. Zona de almacén y mantenimiento
13. Oficina técnica y comercial
14. Zona de existencias 2

URJC

TFG: Planta de Reciclaje

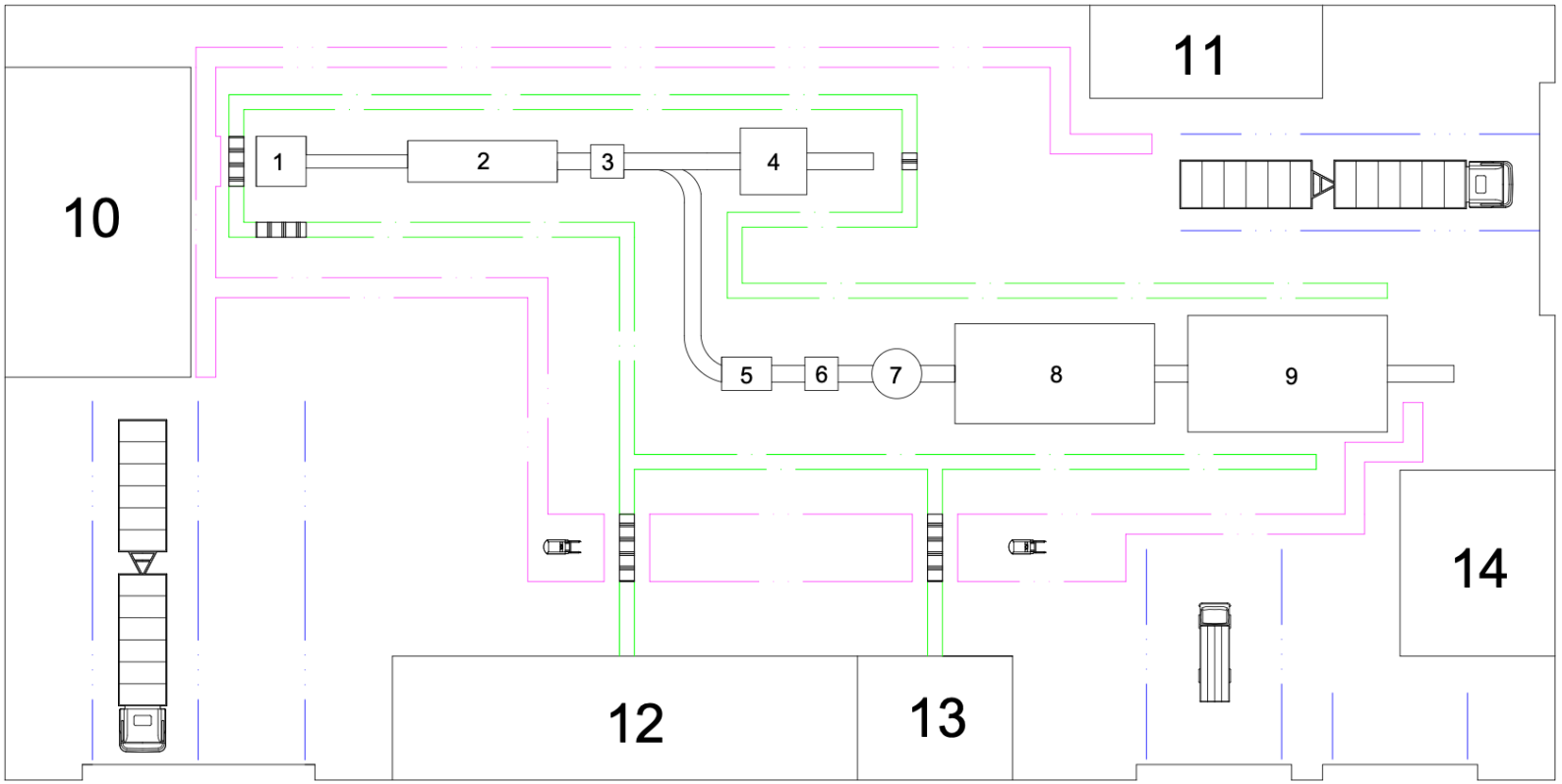
Layout conceptual:
Planta de Reciclaje PET y Aluminio

Alumno:
Trebino Nelli,
Tomás Juan

Fecha: febrero 2026

nº plano: 1

escalas: 1:1000



Ruta de circulación de operarios

Ruta de circulación de maquinaria pesada

Ruta de circulación de transportes externos: Camiones y vans

URJC

TFG: Planta de Reciclaje

Layout conceptual:
Rutas de circulación en planta

Alumno:
Trebino Nelli,
Tomás Juan

Fecha: febrero 2026

nº plano: 2

escalas: 1:1000

9. Inversión inicial

9.1. Presupuesto Trautwein

Price offer – bottleComp TWO *compact*

Offer ES with one installation in Madrid

Product profile

Our Fully Automatic Return Station **bottleComp TWO *compact*** offers a powerful and compact solution for the simple and efficient return of medium quantities of disposable and reusable beverage containers.
Due to the latest technology, solid workmanship an intuitive operation the system meets the highest requirements in daily use -
– reliable, user-friendly and economical.

✅ **Dimensions:** B 1.360 mm × H 1.860 mm × T 1.020 mm

Performance characteristics

- ✅ Acceptance unit with quick-change system
- ✅ 360° - barcode detection
- ✅ Detection of contour geometry
- ✅ 12" screen display for advertising and customer dialogue
- ✅ Efficient thermal printer with 250mm/s output
- ✅ Crusher with 400V three-phase connection
- ✅ one Softtroll-Container (with height adjustment (no glass breakage) volume approx: 550 l
- ✅ one collection container for non refillables volume approx: 530 l
- ✅ LAN-Connectivity

Inclusiv services

✅ 1 year warranty

bottleComp TWO *compact* ex works, inclusive packing

Price per unit € 22.500,00

Installation of one Machine in Madrid:
- **One man, one man-day**
- **Travel and accommodation costs**
- **Freight** **€ 1.980,00**

prices:	net-prices in Euro, legal value-added tax
delivery:	ex works, incl. packing
Payment:	in advance
delivery time:	approx. 6-8 weeks after receipt of your order

errors excepted, subject to modifications
08.09.2025

Price_offer_Trautwein SB Technik_08.09.2025

Price offer – bottleComp TWO *compact*

Offer ES



Optional offers

✅ **DuraClean** Acceptance unit for maximum availability! Hardly any cleaning necessary, extremely stable (instead of a receiving system with a quick-change unit)	€ 850,00
✅ Bottle distributer	€ 780,00
✅ Additional Acceptance unit with quick-change system	€ 480,00
✅ Additional Softtroll-Container with height adjustment (no glass breakage)	€ 1.040,00
✅ Additional collection container for non refillables	€ 470,00
✅ remote maintenance / telemetry	€ 580,00
✅ individual software specification or modification on request	

10. Análisis de viabilidad económica

10.1. Flujos de Caja (1º a 5º Año)

Para el estudio de los flujos de caja se separan los ingresos según su procedencia y se aplica el impuesto a las sociedades de un 25%.

El IVA no aplica ya que el mismo repercute en compras y ventas por lo que se evalúa a cierre contable si aplica una devolución de importe sobre este impuesto.

Los ingresos y costes por ventas se ven ajustados en los meses previamente definidos como de menor demanda, afectando la rentabilidad de los mismo.

Por último, la cuenta de resultados tiene un último indicador denominado “Saldo Acumulado”, que permite visualizar la recuperación mensual de manera más práctica.

Todos los años, los costos y precios de venta son ajustados por un IPC medio de 3%. El único precio que no es ajustado es el del Renting de las SDDR, ya que el congelamiento de tarifa a 5 años se utilizará como estrategia de marketing.

10.2. Cálculo del VAN

Siguiendo la fórmula del VAN, se cuantifica la rentabilidad:

$$VAN = -I_0 + \sum_{A=1}^{5} \frac{FC_A}{(1+r)^A}$$

$$VAN = -6.000.000 + \frac{3.161.674{,}05}{1{,}06} + \frac{2.102.470{,}66}{1{,}06^2} + \frac{3.304.160{,}20}{1{,}06^3} + \frac{3.378.625{,}01}{1{,}06^4} + \frac{6.455.323{,}76}{1{,}06^5}$$

$$VAN = 9.128.120{,}29€$$

		Año 1												
		Momento 0	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Ingreso por ventas														
	PET		210.345,00	210.345,00	199.827,75	199.827,75	210.345,00	210.345,00	210.345,00	210.345,00	210.345,00	199.827,75	199.827,75	210.345,00
	Aluminio		169.000,00	169.000,00	160.550,00	160.550,00	169.000,00	169.000,00	169.000,00	169.000,00	169.000,00	160.550,00	160.550,00	169.000,00
	Renting		25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00
Costes por ventas														
	Electricidad		40.020,00	40.020,00	38.019,00	38.019,00	40.020,00	40.020,00	40.020,00	40.020,00	40.020,00	38.019,00	38.019,00	40.020,00
	Gestión de rechazos		800,00	800,00	760,00	760,00	800,00	800,00	800,00	800,00	800,00	760,00	760,00	800,00
	Servicio: Agua y Gas		1.000,00	1.000,00	950,00	950,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	1.000,00	950,00	950,00	1.000,00
	Logística SDDR		312,00	312,00	296,40	296,40	312,00	312,00	312,00	312,00	312,00	296,40	296,40	312,00
Margen Bruto			**362.713,00**	**362.713,00**	**345.852,35**	**345.852,35**	**362.713,00**	**362.713,00**	**362.713,00**	**362.713,00**	**362.713,00**	**345.852,35**	**345.852,35**	**362.713,00**
Costes fijos														
	Inversión inicial	6.000.000,00												
	Empleados		29.500,00	29.500,00	29.500,00	29.500,00	29.500,00	29.500,00	29.500,00	29.500,00	29.500,00	29.500,00	29.500,00	29.500,00
	Alquiler		36.000,00	36.000,00	36.000,00	36.000,00	36.000,00	36.000,00	36.000,00	36.000,00	36.000,00	36.000,00	36.000,00	36.000,00
	Tasas		125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00	125,00
	Mantenimiento SDDR		625,00	625,00	625,00	625,00	625,00	625,00	625,00	625,00	625,00	625,00	625,00	625,00
	Mantenimiento línea		4.500,00	4.500,00	4.500,00	4.500,00	4.500,00	4.500,00	4.500,00	4.500,00	4.500,00	4.500,00	4.500,00	4.500,00
	Seguro industrial		834,00	834,00	834,00	834,00	834,00	834,00	834,00	834,00	834,00	834,00	834,00	834,00
	Software		45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00	45,00
EBITDA			**291.084,00**	**291.084,00**	**274.223,35**	**274.223,35**	**291.084,00**	**291.084,00**	**291.084,00**	**291.084,00**	**291.084,00**	**274.223,35**	**274.223,35**	**291.084,00**
Amortización			100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00
EBIT			**191.084,00**	**191.084,00**	**174.223,35**	**174.223,35**	**191.084,00**	**191.084,00**	**191.084,00**	**191.084,00**	**191.084,00**	**174.223,35**	**174.223,35**	**191.084,00**
Gastos financieros			17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00
BAI			**173.584,00**	**173.584,00**	**156.723,35**	**156.723,35**	**173.584,00**	**173.584,00**	**173.584,00**	**173.584,00**	**173.584,00**	**156.723,35**	**156.723,35**	**173.584,00**
Impuesto a las sociedades			43.396,00	43.396,00	39.180,84	39.180,84	43.396,00	43.396,00	43.396,00	43.396,00	43.396,00	39.180,84	39.180,84	43.396,00
Beneficio neto			**130.188,00**	**130.188,00**	**117.542,51**	**117.542,51**	**130.188,00**	**130.188,00**	**130.188,00**	**130.188,00**	**130.188,00**	**117.542,51**	**117.542,51**	**130.188,00**
Amortización			100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00
Flujo de Caja		(6.000.000,00)	**230.188,00**	**230.188,00**	**217.542,51**	**217.542,51**	**230.188,00**	**230.188,00**	**230.188,00**	**230.188,00**	**230.188,00**	**217.542,51**	**217.542,51**	**230.188,00**
Saldo Acumulado		(6.000.000,00)	(5.769.812,00)	(5.539.624,00)	(5.322.081,49)	(5.104.538,98)	(4.874.350,98)	(4.644.162,98)	(4.413.974,98)	(4.183.786,98)	(3.953.598,98)	(3.736.056,46)	(3.518.513,95)	(3.288.325,95)

Año 2													
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Ingreso por ventas													
	PET	216.655,35	216.655,35	205.822,58	205.822,58	216.655,35	216.655,35	216.655,35	216.655,35	216.655,35	205.822,58	205.822,58	216.655,35
	Aluminio	174.070,00	174.070,00	165.366,50	165.366,50	174.070,00	174.070,00	174.070,00	174.070,00	174.070,00	165.366,50	165.366,50	174.070,00
	Renting	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00
Costes por ventas													
	Electricidad	41.220,60	41.220,60	39.159,57	39.159,57	41.220,60	41.220,60	41.220,60	41.220,60	41.220,60	39.159,57	39.159,57	41.220,60
	Gestión de rechazos	824,00	824,00	782,80	782,80	824,00	824,00	824,00	824,00	824,00	782,80	782,80	824,00
	Servicio: Agua y Gas	10.001,03	10.001,03	9.500,98	9.500,98	10.001,03	10.001,03	10.001,03	10.001,03	10.001,03	9.500,98	9.500,98	10.001,03
	Logística SDDR	321,36	321,36	305,29	305,29	321,36	321,36	321,36	321,36	321,36	305,29	305,29	321,36
Margen Bruto		**363.858,36**	**363.858,36**	**346.940,44**	**346.940,44**	**363.858,36**	**363.858,36**	**363.858,36**	**363.858,36**	**363.858,36**	**346.940,44**	**346.940,44**	**363.858,36**
Costes fijos													
	Empleados	30.385,00	30.385,00	30.385,00	30.385,00	30.385,00	30.385,00	30.385,00	30.385,00	30.385,00	30.385,00	30.385,00	30.385,00
	Alquiler	37.080,00	37.080,00	37.080,00	37.080,00	37.080,00	37.080,00	37.080,00	37.080,00	37.080,00	37.080,00	37.080,00	37.080,00
	Tasas	128,75	128,75	128,75	128,75	128,75	128,75	128,75	128,75	128,75	128,75	128,75	128,75
	Mantenimiento SDDR	643,75	643,75	643,75	643,75	643,75	643,75	643,75	643,75	643,75	643,75	643,75	643,75
	Mantenimiento línea	4.635,00	4.635,00	4.635,00	4.635,00	4.635,00	4.635,00	4.635,00	4.635,00	4.635,00	4.635,00	4.635,00	4.635,00
	Seguro industrial	859,02	859,02	859,02	859,02	859,02	859,02	859,02	859,02	859,02	859,02	859,02	859,02
	Software	46,35	46,35	46,35	46,35	46,35	46,35	46,35	46,35	46,35	46,35	46,35	46,35
EBITDA		**290.080,49**	**290.080,49**	**273.162,57**	**273.162,57**	**290.080,49**	**290.080,49**	**290.080,49**	**290.080,49**	**290.080,49**	**273.162,57**	**273.162,57**	**290.080,49**
Amortización		100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00
EBIT		**190.080,49**	**190.080,49**	**173.162,57**	**173.162,57**	**190.080,49**	**190.080,49**	**190.080,49**	**190.080,49**	**190.080,49**	**173.162,57**	**173.162,57**	**190.080,49**
Gastos financieros		17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00
BAI		**172.580,49**	**172.580,49**	**155.662,57**	**155.662,57**	**172.580,49**	**172.580,49**	**172.580,49**	**172.580,49**	**172.580,49**	**155.662,57**	**155.662,57**	**172.580,49**
Impuesto a las sociedades		43.145,12	43.145,12	38.915,64	38.915,64	43.145,12	43.145,12	43.145,12	43.145,12	43.145,12	38.915,64	38.915,64	43.145,12
Beneficio neto		**129.435,37**	**129.435,37**	**116.746,93**	**116.746,93**	**129.435,37**	**129.435,37**	**129.435,37**	**129.435,37**	**129.435,37**	**116.746,93**	**116.746,93**	**129.435,37**
Amortización		50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00
Flujo de Caja		**179.435,37**	**179.435,37**	**166.746,93**	**166.746,93**	**179.435,37**	**179.435,37**	**179.435,37**	**179.435,37**	**179.435,37**	**166.746,93**	**166.746,93**	**179.435,37**
Saldo Acumulado		(2.658.890,58)	(2.479.455,22)	(2.312.708,29)	(2.145.961,36)	(1.966.525,99)	(1.787.090,62)	(1.607.655,25)	(1.428.219,89)	(1.248.784,52)	(1.082.037,59)	(915.290,66)	(735.855,29)

Año 3													
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Ingreso por ventas													
	PET	223.155,01	223.155,01	211.997,26	211.997,26	223.155,01	223.155,01	223.155,01	223.155,01	223.155,01	211.997,26	211.997,26	223.155,01
	Aluminio	179.292,10	179.292,10	170.327,50	170.327,50	179.292,10	179.292,10	179.292,10	179.292,10	179.292,10	170.327,50	170.327,50	179.292,10
	Renting	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00
Costes por ventas													
	Electricidad	42.457,22	42.457,22	40.334,36	40.334,36	42.457,22	42.457,22	42.457,22	42.457,22	42.457,22	40.334,36	40.334,36	42.457,22
	Gestión de rechazos	848,72	848,72	806,28	806,28	848,72	848,72	848,72	848,72	848,72	806,28	806,28	848,72
	Servicio: Agua y Gas	1.060,90	1.060,90	1.007,86	1.007,86	1.060,90	1.060,90	1.060,90	1.060,90	1.060,90	1.007,86	1.007,86	1.060,90
	Logística SDDR	331,00	331,00	314,45	314,45	331,00	331,00	331,00	331,00	331,00	314,45	314,45	331,00
Margen Bruto		**383.249,27**	**383.249,27**	**365.361,81**	**365.361,81**	**383.249,27**	**383.249,27**	**383.249,27**	**383.249,27**	**383.249,27**	**365.361,81**	**365.361,81**	**383.249,27**
Costes fijos													
	Empleados	31.296,55	31.296,55	31.296,55	31.296,55	31.296,55	31.296,55	31.296,55	31.296,55	31.296,55	31.296,55	31.296,55	31.296,55
	Alquiler	38.192,40	38.192,40	38.192,40	38.192,40	38.192,40	38.192,40	38.192,40	38.192,40	38.192,40	38.192,40	38.192,40	38.192,40
	Tasas	132,61	132,61	132,61	132,61	132,61	132,61	132,61	132,61	132,61	132,61	132,61	132,61
	Mantenimiento SDDR	663,06	663,06	663,06	663,06	663,06	663,06	663,06	663,06	663,06	663,06	663,06	663,06
	Mantenimiento línea	4.774,05	4.774,05	4.774,05	4.774,05	4.774,05	4.774,05	4.774,05	4.774,05	4.774,05	4.774,05	4.774,05	4.774,05
	Seguro industrial	884,79	884,79	884,79	884,79	884,79	884,79	884,79	884,79	884,79	884,79	884,79	884,79
	Software	47,74	47,74	47,74	47,74	47,74	47,74	47,74	47,74	47,74	47,74	47,74	47,74
EBITDA		**307.258,07**	**307.258,07**	**289.370,60**	**289.370,60**	**307.258,07**	**307.258,07**	**307.258,07**	**307.258,07**	**307.258,07**	**289.370,60**	**289.370,60**	**307.258,07**
Amortización		50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00
EBIT		**257.258,07**	**257.258,07**	**239.370,60**	**239.370,60**	**257.258,07**	**257.258,07**	**257.258,07**	**257.258,07**	**257.258,07**	**239.370,60**	**239.370,60**	**257.258,07**
Gastos financieros		17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00
BAI		**239.758,07**	**239.758,07**	**221.870,60**	**221.870,60**	**239.758,07**	**239.758,07**	**239.758,07**	**239.758,07**	**239.758,07**	**221.870,60**	**221.870,60**	**239.758,07**
Impuesto a las sociedades		59.939,52	59.939,52	55.467,65	55.467,65	59.939,52	59.939,52	59.939,52	59.939,52	59.939,52	55.467,65	55.467,65	59.939,52
Beneficio neto		**179.818,55**	**179.818,55**	**166.402,95**	**166.402,95**	**179.818,55**	**179.818,55**	**179.818,55**	**179.818,55**	**179.818,55**	**166.402,95**	**166.402,95**	**179.818,55**
Amortización		100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00
Flujo de Caja		**279.818,55**	**279.818,55**	**266.402,95**	**266.402,95**	**279.818,55**	**279.818,55**	**279.818,55**	**279.818,55**	**279.818,55**	**266.402,95**	**266.402,95**	**279.818,55**
Saldo Acumulado		(456.036,74)	(176.218,20)	90.184,76	356.587,71	636.406,26	916.224,81	1.196.043,36	1.475.861,90	1.755.680,45	2.022.083,40	2.288.486,36	2.568.304,91

Año 4													
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Ingreso por ventas													
	PET	229.849,66	229.849,66	218.357,18	218.357,18	229.849,66	229.849,66	229.849,66	229.849,66	229.849,66	218.357,18	218.357,18	229.849,66
	Aluminio	184.670,86	184.670,86	175.437,32	175.437,32	184.670,86	184.670,86	184.670,86	184.670,86	184.670,86	175.437,32	175.437,32	184.670,86
	Renting	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00
Costes por ventas													
	Electricidad	43.730,93	43.730,93	41.544,39	41.544,39	43.730,93	43.730,93	43.730,93	43.730,93	43.730,93	41.544,39	41.544,39	43.730,93
	Gestión de rechazos	874,18	874,18	830,47	830,47	874,18	874,18	874,18	874,18	874,18	830,47	830,47	874,18
	Servicio: Agua y Gas	1.092,73	1.092,73	1.038,09	1.038,09	1.092,73	1.092,73	1.092,73	1.092,73	1.092,73	1.038,09	1.038,09	1.092,73
	Logística SDDR	340,93	340,93	323,88	323,88	340,93	340,93	340,93	340,93	340,93	323,88	323,88	340,93
Margen Bruto		**393.981,75**	**393.981,75**	**375.557,66**	**375.557,66**	**393.981,75**	**393.981,75**	**393.981,75**	**393.981,75**	**393.981,75**	**375.557,66**	**375.557,66**	**393.981,75**
Costes fijos													
	Empleados	32.235,45	32.235,45	32.235,45	32.235,45	32.235,45	32.235,45	32.235,45	32.235,45	32.235,45	32.235,45	32.235,45	32.235,45
	Alquiler	39.338,17	39.338,17	39.338,17	39.338,17	39.338,17	39.338,17	39.338,17	39.338,17	39.338,17	39.338,17	39.338,17	39.338,17
	Tasas	136,59	136,59	136,59	136,59	136,59	136,59	136,59	136,59	136,59	136,59	136,59	136,59
	Mantenimiento SDDR	682,95	682,95	682,95	682,95	682,95	682,95	682,95	682,95	682,95	682,95	682,95	682,95
	Mantenimiento línea	4.917,27	4.917,27	4.917,27	4.917,27	4.917,27	4.917,27	4.917,27	4.917,27	4.917,27	4.917,27	4.917,27	4.917,27
	Seguro industrial	911,33	911,33	911,33	911,33	911,33	911,33	911,33	911,33	911,33	911,33	911,33	911,33
	Software	49,17	49,17	49,17	49,17	49,17	49,17	49,17	49,17	49,17	49,17	49,17	49,17
EBITDA		**315.710,81**	**315.710,81**	**297.286,72**	**297.286,72**	**315.710,81**	**315.710,81**	**315.710,81**	**315.710,81**	**315.710,81**	**297.286,72**	**297.286,72**	**315.710,81**
Amortización		50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00
EBIT		**265.710,81**	**265.710,81**	**247.286,72**	**247.286,72**	**265.710,81**	**265.710,81**	**265.710,81**	**265.710,81**	**265.710,81**	**247.286,72**	**247.286,72**	**265.710,81**
Gastos financieros		17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00
BAI		**248.210,81**	**248.210,81**	**229.786,72**	**229.786,72**	**248.210,81**	**248.210,81**	**248.210,81**	**248.210,81**	**248.210,81**	**229.786,72**	**229.786,72**	**248.210,81**
Impuesto a las sociedades		62.052,70	62.052,70	57.446,68	57.446,68	62.052,70	62.052,70	62.052,70	62.052,70	62.052,70	57.446,68	57.446,68	62.052,70
Beneficio neto		**186.158,11**	**186.158,11**	**172.340,04**	**172.340,04**	**186.158,11**	**186.158,11**	**186.158,11**	**186.158,11**	**186.158,11**	**172.340,04**	**172.340,04**	**186.158,11**
Amortización		100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00
Flujo de Caja		**286.158,11**	**286.158,11**	**272.340,04**	**272.340,04**	**286.158,11**	**286.158,11**	**286.158,11**	**286.158,11**	**286.158,11**	**272.340,04**	**272.340,04**	**286.158,11**
Saldo Acumulado		2.854.463,01	3.140.621,12	3.412.961,16	3.685.301,20	3.971.459,30	4.257.617,41	4.543.775,51	4.829.933,62	5.116.091,73	5.388.431,77	5.660.771,81	5.946.929,91

Año 5													
		Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Ingreso por ventas													
	PET	236.745,15	236.745,15	224.907,89	224.907,89	236.745,15	236.745,15	236.745,15	236.745,15	236.745,15	224.907,89	224.907,89	236.745,15
	Aluminio	190.210,99	190.210,99	180.700,44	180.700,44	190.210,99	190.210,99	190.210,99	190.210,99	190.210,99	180.700,44	180.700,44	190.210,99
	Renting	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00	25.500,00
Costes por ventas													
	Electricidad	45.042,86	45.042,86	42.790,72	42.790,72	45.042,86	45.042,86	45.042,86	45.042,86	45.042,86	42.790,72	42.790,72	45.042,86
	Gestión de rechazos	900,41	900,41	855,39	855,39	900,41	900,41	900,41	900,41	900,41	855,39	855,39	900,41
	Servicio: Agua y Gas	1.125,51	1.125,51	1.069,23	1.069,23	1.125,51	1.125,51	1.125,51	1.125,51	1.125,51	1.069,23	1.069,23	1.125,51
	Logística SDDR	351,16	351,16	333,60	333,60	351,16	351,16	351,16	351,16	351,16	333,60	333,60	351,16
Margen Bruto		**405.036,20**	**405.036,20**	**386.059,39**	**386.059,39**	**405.036,20**	**405.036,20**	**405.036,20**	**405.036,20**	**405.036,20**	**386.059,39**	**386.059,39**	**405.036,20**
Costes fijos													
	Empleados	33.202,51	33.202,51	33.202,51	33.202,51	33.202,51	33.202,51	33.202,51	33.202,51	33.202,51	33.202,51	33.202,51	33.202,51
	Alquiler	40.518,32	40.518,32	40.518,32	40.518,32	40.518,32	40.518,32	40.518,32	40.518,32	40.518,32	40.518,32	40.518,32	40.518,32
	Tasas	140,69	140,69	140,69	140,69	140,69	140,69	140,69	140,69	140,69	140,69	140,69	140,69
	Mantenimiento SDDR	703,44	703,44	703,44	703,44	703,44	703,44	703,44	703,44	703,44	703,44	703,44	703,44
	Mantenimiento línea	5.064,79	5.064,79	5.064,79	5.064,79	5.064,79	5.064,79	5.064,79	5.064,79	5.064,79	5.064,79	5.064,79	5.064,79
	Seguro industrial	938,67	938,67	938,67	938,67	938,67	938,67	938,67	938,67	938,67	938,67	938,67	938,67
	Software	50,65	50,65	50,65	50,65	50,65	50,65	50,65	50,65	50,65	50,65	50,65	50,65
EBITDA		**324.417,13**	**324.417,13**	**305.440,32**	**305.440,32**	**324.417,13**	**324.417,13**	**324.417,13**	**324.417,13**	**324.417,13**	**305.440,32**	**305.440,32**	**324.417,13**
Amortización		50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00	50.000,00
EBIT		**274.417,13**	**274.417,13**	**255.440,32**	**255.440,32**	**274.417,13**	**274.417,13**	**274.417,13**	**274.417,13**	**274.417,13**	**255.440,32**	**255.440,32**	**274.417,13**
Gastos financieros		17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00	17.500,00
BAI		**256.917,13**	**256.917,13**	**237.940,32**	**237.940,32**	**256.917,13**	**256.917,13**	**256.917,13**	**256.917,13**	**256.917,13**	**237.940,32**	**237.940,32**	**256.917,13**
Impuesto a las sociedades		64.229,28	64.229,28	59.485,08	59.485,08	64.229,28	64.229,28	64.229,28	64.229,28	64.229,28	59.485,08	59.485,08	64.229,28
Beneficio neto		**192.687,85**	**192.687,85**	**178.455,24**	**178.455,24**	**192.687,85**	**192.687,85**	**192.687,85**	**192.687,85**	**192.687,85**	**178.455,24**	**178.455,24**	**192.687,85**
Amortización		100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00	100.000,00
Flujo de Caja		**292.687,85**	**292.687,85**	**278.455,24**	**278.455,24**	**292.687,85**	**292.687,85**	**292.687,85**	**292.687,85**	**292.687,85**	**278.455,24**	**278.455,24**	**3.292.687,85**
Saldo Acumulado		6.239.617,76	6.532.305,61	6.810.760,85	7.089.216,09	7.381.903,94	7.674.591,79	7.967.279,64	8.259.967,49	8.552.655,34	8.831.110,58	9.109.565,82	12.402.253,67