



# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

## **DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE UNA PLANTA DE RECICLAJE.**

Autor: Daniela Pérez López.

Director: Jaime González Rodríguez.

Madrid, junio 2023.

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
“DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE UNA PLANTA DE  
RECICLAJE”

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2022/23 es de mi autoría, original e inédito y  
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido  
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Daniela Pérez López.

Fecha: 14 de junio de 2023.

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Jaime González Rodríguez.

Fecha: 14 de junio de 2023.





# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

## **DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE UNA PLANTA DE RECICLAJE.**

Autor: Daniela Pérez López.

Director: Jaime González Rodríguez.

Madrid, junio 2023.



## Agradecimientos

*A papá, mamá y Martina por ser mi gran inspiración y ejemplo a seguir en la vida.*

*A mis amigas del Recuerdo, de ICAI y del Liceo por ser las mejores amigas.*

*A ICAI por todo lo que me ha dado.*



---

# **DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE UNA PLANTA DE RECICLAJE**

**Autor: Pérez López, Daniela.**

Director: González Rodríguez, Jaime.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

En este proyecto se ha llevado a cabo la investigación y el desarrollo de un modelo en Simulink que sirva para hacer simulaciones de diferentes configuraciones de planta de clasificación de residuos. El resultado final logrado es el de un repositorio de Simulink con diferentes bloques en el que cada uno simula una de las posibles etapas de una planta de reciclaje.

**Palabras clave:** Matlab, Simulink, trómel, separador, balístico, distribución lognormal, clasificación de residuos.

### **1. Introducción**

En el departamento de ofertas de ACCIONA INDUSTRIAL, S.A. se lleva a cabo el estudio previo de construcción de plantas de clasificación de residuos con una herramienta poco amigable para el usuario. El reto planteado es el de encontrar un modelo que sustituyendo al actual sea más cómodo de utilizar, adicionalmente se analizará cada uno de los bloques del modelo en Excel, se estudiará la bibliografía disponible, y se implementarán modificaciones para adecuar el comportamiento de los equipos a la realidad.

### **2. Definición del proyecto**

Siendo así, el proyecto consta en llevar a cabo un estudio de las diferentes posibilidades que habría utilizando Matlab, que es la herramienta elegida por ser la más apta para las necesidades de programación y cálculo del proyecto, de conseguir una simulación con resultados válidos de una planta de reciclaje.

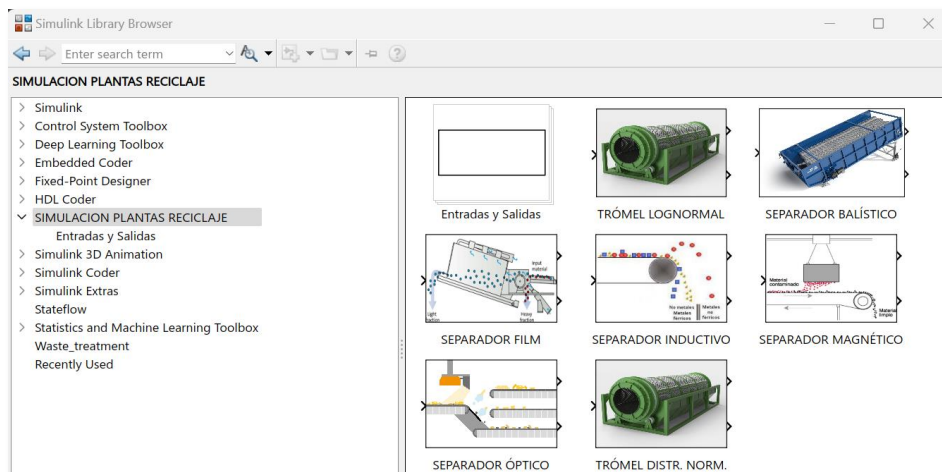
### **3. Descripción del modelo/sistema/herramienta**



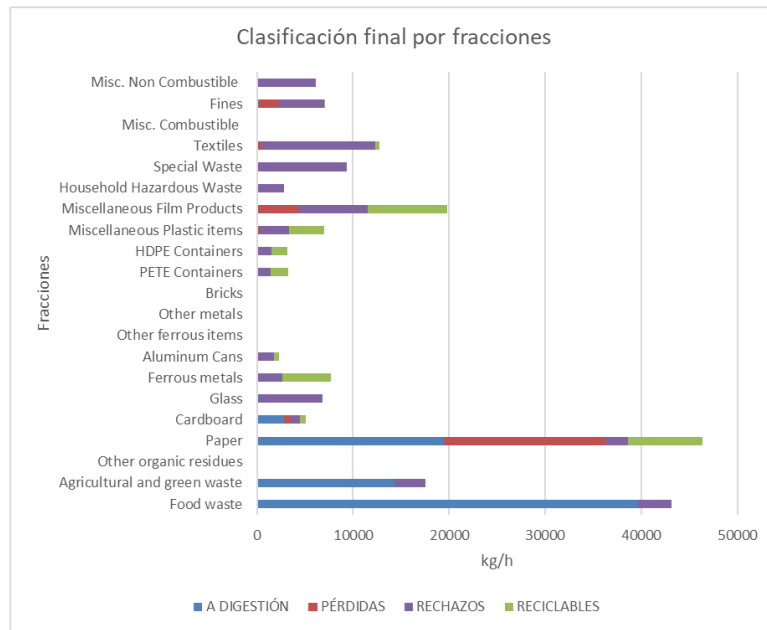
De tal forma, el modelo se ha desarrollado en Matlab y Simulink haciendo uso de diferentes funciones de programación, funciones estadísticas y de cálculo avanzado a fin de encontrar el sistema que mejor simulase el comportamiento de cada etapa de una planta de clasificación de residuos.

#### 4. Resultados

El resultado final obtenido es el de una biblioteca de Simulink con diferentes bloques que simulan el comportamiento de máquinas de plantas de residuos. El fin de la biblioteca de bloques es el de poder utilizarlo para hacer estudios previos de futuros proyectos de construcción de plantas de clasificación de residuos.



*Figura 0. Biblioteca de bloques de Simulink con separadores planta de clasificación de residuos.*



*Gráfico 0. Resultados obtenidos para la simulación de una planta de clasificación de residuos utilizando la biblioteca de bloques creada.*

## 5. Conclusiones

El modelo desarrollado cumple con los requisitos para llevar a cabo la fase previa de estudio, análisis y optimización de un proyecto de construcción de planta de reciclaje, no obstante, los programas de algunos de los bloques están basados en informaciones muy generales sobre los separadores, podrían perfeccionarse en cuanto hubiese a disposición mayor información sobre eficiencias específicas en función de un separador con ciertas características.

## 6. Referencias

- [TANG20] Tanguay-Rioux, F., R. Legros y L. Spreutels, “Particle size analysis of municipal solid waste for treatment process modeling”, *Waste Management & Research* XX(X), pp. 1-9, 2020.
- [SIGM18] Sigmund, U., “Sorting with ballistic separators”, 4th International Symposium On Enhanced Landfill Mining, pp. 89-94, Bélgica, 5-7 febrero 2018.

- [MOLL20] Mollnitz, S., B. Kupper, A. Curtis, K. Khodier, R. Sarc, “Influence of pre-screening on down-stream processing for the production of plastic enriched fractions for the recycling from mixed commercial and municipal waste”, *Waste Management* 119, pp. 365-373, octubre 2020.
- [THOD15] Thoden van Velzen, U., M. Jansen, T. Pretz, “Handbook for sorting of plastic packaging waste concentrates”, Wageningen UR Food & Biobased Research, Wageningen, Alemania, octubre 2015.
- [BARK22] Barkanyi, A., A. Egedy, A. Sarkady, R. Kurdi, J. Abonyi, “Expert-based Modular Simulator for Municipal Waste Processing Technology Design”, *Sustainability* 2022, 14, 16403, pp. 1-14, diciembre 2022.
- [MOHA22] Mohanraj, G.T., S. Joladarashi, H. Hanumanthappa, B. K. Shanmugam, H. Vardhan, G. J. Naik, P. D. Bhat, M. R. Rahman, “Numerical approach for optimization of magnetic roller and evaluating the performance of permanente magnet roller separator through design of experiment”, *Alexandria Engineering Journal* 61, pp 13011-13033, 2022.
- [ANTO21] Antonopoulos, I., G. Faraca, D. Tonini, “Recycling of post-consumer plastic packaging waste in the EU: Recovery rates, material flows and barriers”, *Waste Management* 126, pp 694-705, 2021.
- [LUBO22] Lubongo, C., P. Alexandridis, “Assesment of Performance and Challenges in Use of Commercial Automated Sorting Technology for Plastic Waste”, *Recycling* 2022, 7, 11, pp 1-26, febrero 2022.
- [TROM] NUBA. “Trómeles clasificadores de goma” en <https://www.nubasm.com/producto-cribado-clasificacion-aridos/mallas-de-goma/tromeles-clasificadores-de-goma/> [Última consulta 13/06/2023]
- [BALI] EGGERSMANN. “Separador balístico BRT HARTNER BS” en <https://www.eggerrsmann-recyclingtechnology.com/es/maquinas-de-reciclaje/sistemas-de-apertura-dosificacion-y-separacion-de-brt-hartner/productos/separador-balistico-brt-hartner-bs/> [Última consulta 13/06/2023]

- [MAGN] SOLLAU. “Transportador magnético MD” en <https://www.sollau.es/transportador-magnetico-md> [Última consulta 13/06/2023]
- [INDU] INTEREMPRESAS. “Separador de inducción excéntrico” en [https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos\\_y\\_documentos/2684/SEPARADOR-DE-INDUCCION-EXCENTRICO-v-04.pdf](https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/2684/SEPARADOR-DE-INDUCCION-EXCENTRICO-v-04.pdf) [Última consulta 13/06/2023]
- [FILM] NIHOT. “SDS windshifter” en <https://nihot.nl/products/sds-windshifter/> [Última consulta 13/06/2023]
- [OPTI] GRUP GBI. “Separador optic” en <https://www.grup-gbi.com/ctrm/visita-virtual/separador-optic/> [Última consulta 13/06/2023]
- [DNOR] ECONOMIPEDIA. “Distribución normal” en <https://economipedia.com/definiciones/distribucion-normal.html> [Última consulta 13/06/2023]
- [DLOG] WALLSTREETMOJO. “Log Normal Distribution” en <https://www.wallstreetmojo.com/log-normal-distribution/> [Última consulta 13/06/2023]
- [DROS] RESEARCHGATE. “Probability density function by Rosin-Rammler” en [https://www.researchgate.net/figure/Probability-density-function-by-Rosin-rammler-equation-127-with-parameters-X-100\\_fig6\\_221664861](https://www.researchgate.net/figure/Probability-density-function-by-Rosin-rammler-equation-127-with-parameters-X-100_fig6_221664861) [Última consulta 13/06/2023]

---

## **DEVELOPMENT OF A WASTE SORTING PLANT SIMULATION.**

**Author: Pérez López, Daniela.**

Supervisor: González Rodríguez, Jaime.

Colaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

### **ABSTRACT**

In this project, research and development have been carried out to create a Simulink model that serves to simulate different configurations of a waste sorting plant. The final achieved result is a Simulink repository with various blocks, where each block simulates one of the possible stages of a recycling plant.

**Keywords:** Matlab, Simulink, trommel, separator, ballistic, lognormal distribution, waste sorting, waste management.

### **1. Introduction**

In the offers department of ACCIONA INDUSTRIAL, S.A., the preliminary study of waste sorting plant construction is carried out using a user-unfriendly tool. The challenge posed is to find a model that, replacing the current one, is more user-friendly to use. Additionally, each block of the model will be analyzed in Excel, available literature will be studied, and modifications will be implemented to adapt the equipment's behavior to reality.

### **2. Project definition**

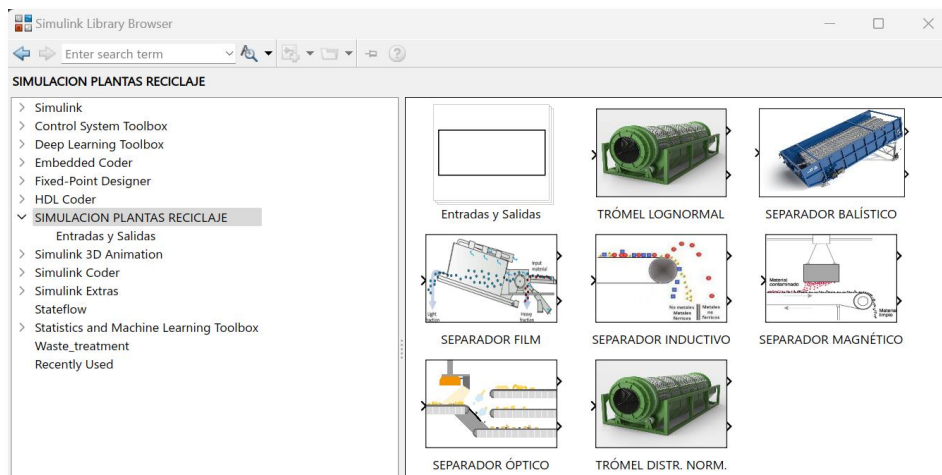
The project consists of conducting a study of the different possibilities using Matlab, which is the chosen tool due to its suitability for the programming and calculation needs of the project, to achieve a simulation with valid results of a recycling plant.

### **3. System/model/tool description**

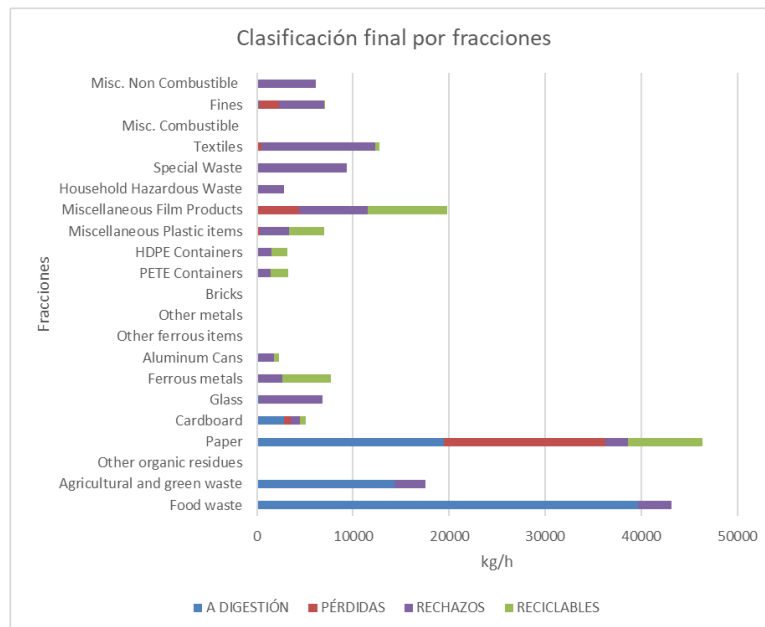
The model has been developed in Matlab and Simulink, making use of various programming functions, statistical functions, and advanced calculation methods in order to find the system that best simulates the behavior of each stage of a waste sorting plant.

#### 4. Results

The final result obtained is a Simulink library with different blocks that simulate the behavior of machines in waste sorting plants. The purpose of the block library is to be able to use it for preliminary studies of future waste sorting plant construction projects.



*Figure 0. Simulink block library for waste sorting plant separators.*



*Gráfico 0. Results obtained for the simulation of a waste sorting plant using the created block library.*

## 5. Conclusions

The developed model meets the requirements for carrying out the preliminary phase of study, analysis, and optimization of a waste recycling plant construction project. However, some of the block programs are based on general information about the separators, and they could be improved with more specific information on efficiencies based on separators with certain characteristics. Having access to more specific information about efficiencies related to separators with certain characteristics would allow for further refinement of the block programs. This additional information could help enhance the accuracy and realism of the simulation model, resulting in more reliable predictions and optimization of the waste recycling plant.

## 6. References

- [TANG20] Tanguay-Rioux, F., R. Legros y L. Spreutels, “Particle size analysis of municipal solid waste for treatment process modeling”, *Waste Management & Research* XX(X), pp. 1-9, 2020.
- [SIGM18] Sigmund, U., “Sorting with ballistic separators”, 4th International Symposium On Enhanced Landfill Mining, pp. 89-94, Bélgica, 5-7 febrero 2018.
- [MOLL20] Mollnitz, S., B. Kupper, A. Curtis, K. Khodier, R. Sarc, “Influence of pre-screening on down-stream processing for the production of plastic enriched fractions for the recycling from mixed comercial and municipal waste”, *Waste Management* 119, pp. 365-373, octubre 2020.
- [THOD15] Thoden van Velzen, U., M. Jansen, T. Pretz, “Handbook for sorting of plastic packaging waste concentrates”, Wageningen UR Food & Biobased Research, Wageningen, Alemania, octubre 2015.
- [BARK22] Barkanyi, A., A. Egedy, A. Sarkady, R. Kurdi, J. Abonyi, “Expert-based Modular Simulator for Municipal Waste Processing Technology Design”, *Sustainability* 2022, 14, 16403, pp. 1-14, diciembre 2022.
- [MOHA22] Mohanraj, G.T., S. Joladarashi, H. Hanumanthappa, B. K. Shanmugam, H. Vardhan, G. J. Naik, P. D. Bhat, M. R. Rahman, “Numerical approach for

- optimization of magnetic roller and evaluating the performance of permanente magnet roller separator through design of experiment”, Alexandria Engineering Journal 61, pp 13011-13033, 2022.
- [ANTO21] Antonopoulos, I., G. Faraca, D. Tonini, “Recycling of post-consumer plastic packaging waste in the EU: Recovery rates, material flows and barriers”, Waste Management 126, pp 694-705, 2021.
- [LUBO22] Lubongo, C., P. Alexandridis, “Assesment of Performance and Challenges in Use of Commercial Automated Sorting Technology for Plastic Waste”, Recycling 2022, 7, 11, pp 1-26, febrero 2022.
- [TROM] NUBA. “Trómeles clasificadores de goma” en <https://www.nubasm.com/producto-cribado-clasificacion-aridos/mallas-de-goma/tromeles-clasificadores-de-goma/> [Última consulta 13/06/2023]
- [BALI] EGGERSMANN. “Separador balístico BRT HARTNER BS” en <https://www.eggerrmann-recyclingtechnology.com/es/maquinas-de-reciclaje/sistemas-de-apertura-dosificacion-y-separacion-de-brt-hartner/productos/separador-balistico-brt-hartner-bs/> [Última consulta 13/06/2023]
- [MAGN] SOLLAU. “Transportador magnético MD” en <https://www.sollau.es/transportador-magnetico-md> [Última consulta 13/06/2023]
- [INDU] INTEREMPRESAS. “Separador de inducción excéntrico” en [https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos\\_y\\_documentos/2684/SEPARADOR-DE-INDUCCION-EXCENTRICO-v-04.pdf](https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/2684/SEPARADOR-DE-INDUCCION-EXCENTRICO-v-04.pdf) [Última consulta 13/06/2023]
- [FILM] NIHOT. “SDS windshifter” en <https://nihot.nl/products/sds-windshifter/> [Última consulta 13/06/2023]
- [OPTI] GRUP GBI. “Separador optic” en <https://www.grup-gbi.com/ctrm/visita-virtual/separador-optic/> [Última consulta 13/06/2023]



- 
- [DNOR] ECONOMIPEDIA. “Distribución normal” en <https://economipedia.com/definiciones/distribucion-normal.html> [Última consulta 13/06/2023]
- [DLOG] WALLSTREETMOJO. “Log Normal Distribution” en <https://www.wallstreetmojo.com/log-normal-distribution/> [Última consulta 13/06/2023]
- [DROS] RESEARCHGATE. “Probability density function by Rosin-Rammler” en [https://www.researchgate.net/figure/Probability-density-function-by-Rosin-rammler-equation-127-with-parameters-X-100\\_fig6\\_221664861](https://www.researchgate.net/figure/Probability-density-function-by-Rosin-rammler-equation-127-with-parameters-X-100_fig6_221664861) [Última consulta 13/06/2023]

## *Índice de la memoria*

<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>6</b>
1.1 Motivación del proyecto .....	7
1.2 Estado de la cuestión.....	7
1.3 Objetivos del proyecto .....	8
1.4 Alineación con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS).....	8
1.5 Metodología de trabajo .....	9
1.6 Recursos a emplear .....	10
<b>Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías.....</b>	<b>11</b>
2.1 Software .....	11
2.1.1 Matlab .....	11
2.1.2 Simulink.....	11
2.1.3 Statistics and Machine Learning Toolbox.....	12
2.2 Hardware: Elementos Planta de Reciclaje .....	12
2.2.1 Trómel .....	12
2.2.2 Separador balístico .....	13
2.2.3 Separador magnético .....	14
2.2.4 Separador inductivo o de corrientes de Foucault.....	15
2.2.5 Separador film o por aire.....	16
2.2.6 Separador óptico .....	17
<b>Capítulo 3. Modelo Desarrollado.....</b>	<b>19</b>
3.1 Introducción: Biblioteca de bloques en Simulink .....	19
3.2 Elementos planta de reciclaje en Simulink .....	22
3.2.1 Trómel .....	22
3.2.2 Separador balístico .....	34
3.2.3 Separador magnético .....	44
3.2.4 Separador inductivo o de corrientes de Foucault.....	48
3.2.5 Separador film o por aire.....	52
3.2.6 Separador óptico .....	56
<b>Capítulo 4. Simulación y análisis de los resultados .....</b>	<b>60</b>

4.1	Comparación de resultados obtenidos.....	63
4.2	Uso y configuración del proyecto para futuras simulaciones .....	64
<b>Capítulo 5. Conclusiones y Trabajos Futuros .....</b>		<b>65</b>
<b>Capítulo 6. Bibliografía.....</b>		<b>67</b>
<b>ANEXO I – Códigos fuente matlab.....</b>		<b>70</b>

## *Índice de figuras*

Figura 1. Trómel [TROM].....	13
Figura 2. Separador balístico [BALI]. .....	14
Figura 3. Separador magnético de bandas cruzadas [MAGN]. .....	15
Figura 4. Separador inductivo [INDU]. .....	16
Figura 5. Separador por aire [FILM]. .....	17
Figura 6. Separador óptico [OPTI]. .....	18
Figura 7. Biblioteca de bloques de Simulink.....	20
Figura 8. Aspecto final de la biblioteca de bloques de Simulink. ....	21
Figura 9. Sub-biblioteca de Simulink con entradas y salidas típicas de una planta de reciclaje. .....	21
Figura 10. Trómel [TROM].....	22
Figura 11. Código de Matlab. ....	25
Figura 12. Entradas y salidas bloque Simulink. ....	26
Figura 13. Programa funcionamiento trómel basado en la distribución normal. ....	26
Figura 14. Resultados de la simulación del trómel.....	27
Figura 15. Distribución normal [DNOR]. ....	28
Figura 16. Resultados pruebas de validación parámetros distintas distribuciones [TANG20]. .....	29
Figura 17. Solución del artículo para la distribución [TANG20].....	30
Figura 18. Distribución lognormal [DLOG].....	30
Figura 19. Distribución Rosin-Rammler [DROS].....	30
Figura 20. Código final que adapta nuestros parámetros a la distribución lognormal. ....	31
Figura 21. Resultados de la simulación del trómel con una distribución lognormal.....	32
Figura 22. Distribuciones “Food waste” con tamaño promedio 30 y desviación estándar 50 para la distribución normal. ....	32
Figura 23. Distribuciones “Agricultural and green waste” con tamaño promedio 40 y desviación estándar 120 para la distribución normal.....	33

Figura 24. Distribuciones “Paper” con tamaño promedio 100 y desviación estándar 100 para la distribución normal. ....	33
Figura 25. Distribuciones “Ferrous metals” con tamaño promedio 90 y desviación estándar 30 para la distribución normal. ....	34
Figura 26. Separador balístico [BALI]. ....	34
Figura 27. Sistema óptimo para la clasificación balística [SIGM18]. ....	37
Figura 28. Bloque Simulink separador balístico. ....	41
Figura 29. Entradas y salidas separador balístico. ....	41
Figura 30. Resultados de la simulación del separador balístico. ....	42
Figura 31. Resultados de pureza para rodantes y no rodantes en balístico con inclinación de 25°. ....	43
Figura 32. Pureza de rodantes a la salida del primer balístico con mayor inclinación y del segundo con menor inclinación. ....	44
Figura 33. Separador magnético de bandas cruzadas [MAGN]. ....	44
Figura 34. Resultados de rendimientos en el separador magnético [BARK22]. ....	47
Figura 35. Resultados de la simulación del separador magnético. ....	48
Figura 36. Separador inductivo [INDU]. ....	49
Figura 37. Resultados de la simulación del separador inductivo. ....	52
Figura 38. Separador film [FILM]. ....	53
Figura 39. Extracto del artículo “Handbook for sorting of plastic packaging waste concentrates” [THOD15]. ....	54
Figura 40. Entradas y salidas bloque Simulink separador por aire. ....	55
Figura 41. Resultados de la simulación del separador film. ....	56
Figura 42. Separador óptico [OPTI]. ....	56
Figura 43. Entradas y salidas Simulink separador óptico. ....	58
Figura 44. Resultados de la simulación del separador óptico. ....	59
Figura 45. Proyecto para Egipto de planta de clasificación de residuos. ....	60
Figura 46. Clasificación final de los residuos en Matlab. ....	62
Figura 47. Clasificación final de los residuos en Excel. ....	63

## *Índice de tablas*

Tabla 1. Tamaño promedio y desviación estándar de cada fracción de residuos. ....	23
Tabla 2. Porcentaje de rodantes y de no rodantes de cada fracción. ....	35
Tabla 3. Tipos de separadores magnéticos. ....	46
Tabla 4. Tamaños promedio y desviaciones estándar utilizados para el separador inductivo. .....	50
Tabla 5. Porcentajes de recuperación establecidos para el separador film. ....	54
Tabla 6. Porcentajes de recuperación para cada fracción para el separador óptico. ....	57

## **Capítulo 1. INTRODUCCIÓN**

Según la información recopilada, el día de la tierra se celebra por primera vez en España en 1970 impulsado por el movimiento ecologista. Sin embargo, no es hasta 1982 cuando se empiezan a ver por primera vez en nuestras calles dos tipos de contenedor de recogida de residuos: el verde, que recoge el vidrio de color, y el blanco, para el vidrio transparente.

Cuatro años más tarde, el 1 de enero de 1986, España se convirtió en miembro de pleno derecho de la Unión Europea (UE), entonces conocida como la Comunidad Económica Europea (CEE), lo que implicó la implementación en nuestro marco normativo de políticas y legislación europeas en diferentes áreas, como agricultura, medio ambiente e industria, para cumplir con los estándares y requisitos de la UE.

A partir de entonces se crean la primera planta de reciclaje en Navarra y, posteriormente en 1991, en Madrid y en Barcelona.

Treinta años más tarde, España cuenta con aproximadamente 365 grandes plantas de tratamiento de residuos (84 plástico, 26 papel, 12 metal, 48 orgánico y 8 de vidrio) a cargo de diferentes empresas que buscan la eficiencia, optimización y adaptación de estas plantas a las nuevas posibilidades.

Siendo así, en este proyecto, a fin de llevar a cabo la implantación de futuras plantas de clasificación de residuos o de renovación de plantas actuales bajo un diseño lo más optimizado y eficiente posible, se busca desarrollar un modelo de simulación de una planta de reciclaje de manera que se puedan obtener balances de masa en cada una de las etapas del proceso y así poder encontrar la configuración más óptima.

Para ello hemos basado nuestro modelo de simulación de planta de clasificación de residuos en uno ya creado en Excel para una oferta de planta de reciclaje que se planea

construir en Egipto a cargo de la empresa Acciona y que hemos utilizado para crear nuestra propia simulación en Simulink, el cual es un entorno de programación visual basado en la programación en Matlab.

## ***1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO***

La motivación del proyecto es la de crear una biblioteca de bloques de Simulink en la que cada bloque simula el comportamiento de una etapa de una planta de reciclaje de manera que para cada futuro proyecto de construcción de una planta de clasificación de residuos se lleva a cabo una simulación del funcionamiento en Simulink utilizando la biblioteca de bloques creada en este proyecto.

Actualmente, esta biblioteca de bloques resulta necesaria para poder optimizar la eficiencia de las futuras plantas de clasificación de residuos agilizando su simulación. De manera que, la simulación es relevante para poder llevar a cabo cálculos previos a la implantación de la planta, no solo desde el punto de vista financiero, sino de obtención de datos como balances de masa para:

- Analizar la capacidad y el potencial de las actuales plantas de reciclaje.
- Disponer de una herramienta para comparar los rendimientos reales de las plantas de reciclaje frente a los teóricos esperados.
- Estudios en el impacto de cambios en la tendencia de consumo de nuestra sociedad actual (basados en nuestros residuos).
- Tener números para plantear la construcción de futuras plantas de reciclaje y estandarizar los cálculos en la industria del reciclaje de basura.

## ***1.2 ESTADO DE LA CUESTIÓN***

En el departamento de ofertas de ACCIONA INDUSTRIAL, S.A. en el área de gestión de residuos, se disponía de un Excel, que ha sido utilizado en multitud de ofertas para el diseño de las futuras plantas de reciclaje.



No obstante, el Excel disponible no era una herramienta amigable para el usuario, y no permitía toda la flexibilidad deseable para realizar cambios, por lo que limitaba mucho el número de configuraciones a probar.

Se había realizado una búsqueda de Softwares comerciales, que permitieran llevar a cabo de una manera más eficiente esta tarea, sin encontrarse ninguno en el mercado que se adaptara a las necesidades del departamento. Por lo que se decide pasar dicho modelo a Simulink, creando una biblioteca de bloques, que puedan ser fácilmente combinados para hacer rápidamente estudios con diferentes configuraciones de planta.

### ***1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO***

El motivo principal del proyecto es el de cambiar de herramienta de simulación, ya que existe un modelo que hace su función, sin embargo, no de manera eficiente y amigable para el usuario. Además, a partir de la biblioteca de bloques creada se conseguirán simular diferentes configuraciones de planta de reciclaje, y como consecuencia optimizar el diseño y rendimiento de las mismas.

### ***1.4 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)***

La elaboración de este proyecto contribuye a lograr los siguientes objetivos de desarrollo sostenible, en adelante ODS:

*Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación.*

Gracias a la simulación previa a la construcción de plantas de clasificación de residuos se pueden lograr construcciones más comprometidas con el medioambiente.

*Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles.*

Se busca la simulación de una planta de clasificación de residuos, por lo que se buscan no solo ciudades sino un ecosistema limpio, es decir, resiliente y sostenible.

*Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.*

De la clasificación de residuos que son fruto del consumo y de la producción de los humanos se consigue recuperar, reutilizar o tratar las diferentes fracciones de residuos que generamos, buscando ser cada vez más sostenibles.

*Objetivo 14: Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos.*

Gracias a la clasificación de residuos en plantas de reciclaje se evita que acaben en océanos, mares y recursos marinos y se consigue reciclar o reutilizar aquellos residuos que puedan tener una segunda vida, como podrían ser los residuos orgánicos, los magnéticos o los plásticos.

## **1.5 METODOLOGÍA DE TRABAJO**

En este proyecto, a lo largo de su desarrollo hemos pasado por diferentes fases. Al principio hubo una primera etapa de toma de contacto con la materia basada en el estudio y la búsqueda de información acerca de:

- Las diferentes etapas de una planta de reciclaje.
- La herramienta de simulación a disposición (Simulink) y sus funcionalidades.
- El modelo de simulación en Excel que sirve como base de este proyecto.
- Los tipos de residuos sólidos urbanos que se utilizarán como entrada a la planta de reciclaje y que tratamos de clasificar.
- La función de distribución que mejor representa el tamaño de las diferentes fracciones de residuos sólidos urbanos, que entran a una planta de reciclaje.

A continuación, hubo una segunda etapa de puesta en práctica en búsqueda de una solución óptima al proyecto basada en los conocimientos adquiridos durante el grado en ingeniería, al empezar el proyecto y en la búsqueda constante de información a lo largo del proceso.

Una vez alcanzada la solución que mejor se adaptaba a nuestras necesidades, hubo una etapa posterior de perfeccionamiento y, por último, la redacción de esta memoria.

## ***1.6 RECURSOS A EMPLEAR***

Los principales recursos empleados en este trabajo son Matlab y Simulink con el toolbox de “*Machine Learning and Statistics*”. Además, de la ayuda y del material proporcionado por D. Jaime González, director de este proyecto, que constan de un Excel que sirve de modelo a la simulación que se obtiene en este proyecto y un documento en el que vienen explicados con detalle los bloques de la planta de reciclaje utilizados.

## **Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS**

Tal y como se ha comentado, el proyecto se apoya en un software que simula el comportamiento de un sistema real, por lo que cabe hacer una descripción de los programas utilizados, así como de los elementos en los que se fundamenta.

A continuación, se dan unas pinceladas de las diferentes tecnologías utilizadas y más adelante se profundiza en su aplicación y desarrollo.

### **2.1 SOFTWARE**

El software utilizado es Matlab, el cual cuenta con un entorno de programación visual basado en la programación en Matlab, llamado Simulink.

#### **2.1.1 MATLAB**

MATLAB es una herramienta de programación y cálculo numérico avanzado. La elección de este programa se justifica debido a que su uso principal es el del análisis de datos, el desarrollo de algoritmos y la creación de modelos. Además, cuenta con una serie de aplicaciones integradas y diferentes “*toolbox*” para mayor especialización y diversificación de sus productos. En concreto, en este proyecto se hace uso de la aplicación *Simulink* y del *toolbox “Statistics and Machine Learning Toolbox”*.

#### **2.1.2 SIMULINK**

La principal herramienta utilizada para llevar a cabo el proyecto es SIMULINK. Se trata de una aplicación, integrada en Matlab, en la cual se llevan a cabo diseños y simulaciones basados en diagramas de bloques. Su uso está justificado ya que soporta cálculos y análisis numéricos avanzados y de gran cantidad de datos. Además, visualmente es sencilla de usar y entender. Por otra parte, Simulink también tiene la opción de crear lo que se llama una

“biblioteca de bloques”, lo que hace que sea una herramienta que se le puede dar un uso adaptado a las necesidades de una aplicación concreta.

### **2.1.3 STATISTICS AND MACHINE LEARNING TOOLBOX**

Este *toolbox* contiene funciones y aplicaciones que ayudan a describir, analizar y modelar datos. Esta caja de herramientas es fundamental en este proyecto para el modelaje del funcionamiento de cada elemento en una planta de reciclaje.

## **2.2 *HARDWARE: ELEMENTOS PLANTA DE RECICLAJE***

A continuación, se detallan una serie de elementos que pueden formar una etapa en una planta de reciclaje. El objetivo es el de familiarizar al lector con los componentes más destacables de cualquier planta de reciclaje.

### **2.2.1 TRÓMEL**

El trómel suele ser la primera etapa en muchas plantas clasificación de residuos. Se trata de un equipo que lleva a cabo la separación de los materiales que entran a la planta en función de su tamaño.

El trómel está formado por un tambor cilíndrico que gira a cierta velocidad y que tiene unos orificios a través de los cuales salen algunos de los residuos. Además, suele ser una de las primeras etapas dado que puede venir equipado con unas cuchillas abre-bolsas.



*Figura 1. Trómel [TROM].*

Su funcionamiento se basa en la entrada de los residuos a través de una cinta transportadora al tambor cilíndrico, de manera que a medida que el tambor gira, los materiales más grandes quedan atrapados en el interior y los materiales más pequeños pasan a través de los orificios y caen a otra cinta de la planta.

### **2.2.2 SEPARADOR BALÍSTICO**

El separador balístico hace una criba de residuos a partir de una combinación de la acción de la gravedad y de la fuerza centrífuga que logra clasificar los materiales según su tamaño, peso y forma.

El balístico esta formado por una serie de tambores en paralelo y con cierta inclinación con la horizontal que giran alternadamente de manera que los residuos más rodantes caen y los no rodantes suben por la fuerza centrífuga de los tambores.



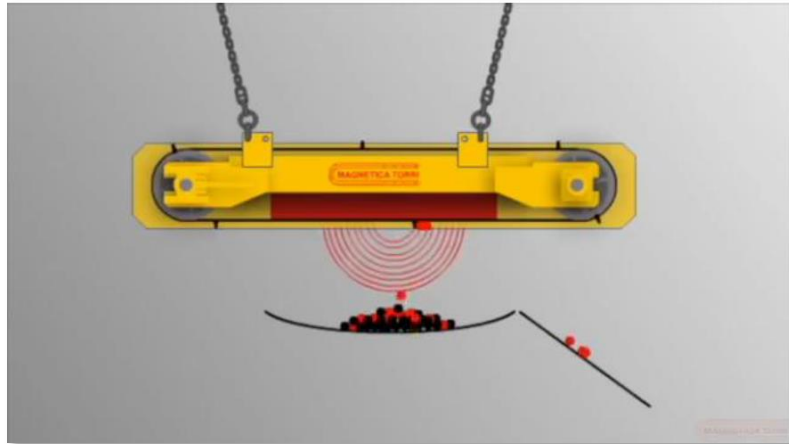
*Figura 2. Separador balístico [BALI].*

### **2.2.3 SEPARADOR MAGNÉTICO**

El separador magnético, tal y como indica su nombre, lleva a cabo la separación de los materiales magnéticos de la fracción de residuos, es decir, de aquellos materiales férricos que contienen hierro y son atraídos por un imán.

Este separador basa su funcionamiento en la atracción a través de un campo magnético, generado por imanes permanentes o electroimanes, que se sitúa sobre una de las cintas transportadoras de la planta de forma que atrae y por lo tanto separa las fracciones de residuos magnéticos del resto de residuos.

Los materiales magnéticos clasificados son volcados sobre un contenedor basculante, o bien hacia una prensa de metales.



*Figura 3. Separador magnético de bandas cruzadas [MAGN].*

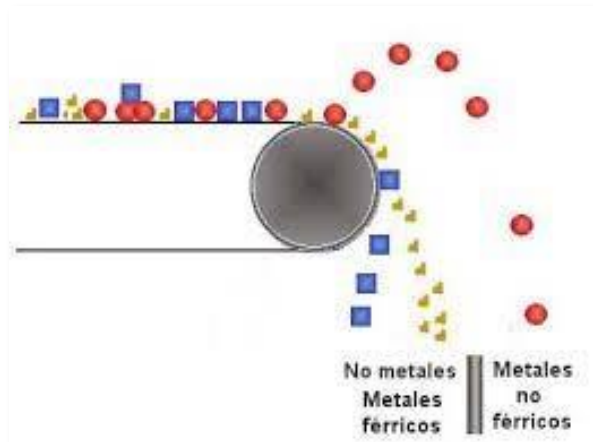
Debido a su gran eficiencia y bajo coste, en una misma planta se suelen colocar varios separadores magnéticos.

#### **2.2.4 SEPARADOR INDUCTIVO O DE CORRIENTES DE FOUCAULT**

El separador inductivo, también conocido como separador de corrientes de Foucault, se utiliza para la criba de metales no férricos, como: el aluminio, el latón, el cobre o el acero de tungsteno.

Su funcionamiento se basa en el paso de los residuos a través de una cinta transportadora equipada con un campo magnético. De tal forma, cuando un metal no ferroso, entra en contacto con el campo magnético, se generan unas corrientes de Foucault en el metal. Estas corrientes a su vez crean su propio campo magnético, lo que a su vez genera una fuerza de repulsión que separa el metal del resto de los materiales, según vemos en la siguiente imagen:





*Figura 4. Separador inductivo [INDU].*

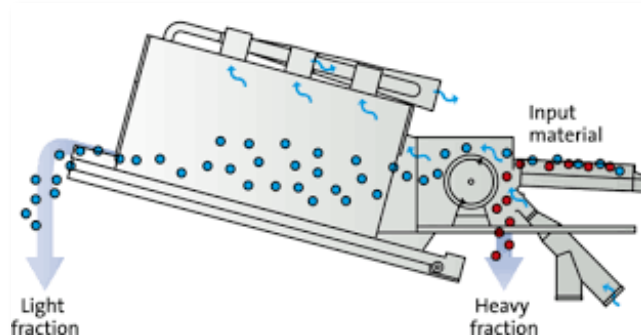
La intensidad del campo magnético sobre la cinta es ajustable a las necesidades de la corriente de entrada, a fin de optimizar la separación.

En una planta de reciclaje, se suelen colocar varios separadores de inducción, uno en la línea de finos y otro en la fracción intermedia de rodantes, y es importante que la materia llegue bien distribuida, para que cuando un metal no férrico cruce el campo magnético inducido sufra un efecto de repulsión y salte a una cierta distancia por delante del tambor de Foucault y lejos del resto de materiales.

### **2.2.5 SEPARADOR FILM O POR AIRE**

La etapa de separado a través de aire trata de separar los materiales más ligeros de otros materiales más pesados.

Su funcionamiento consiste en la aplicación de una corriente de aire de alta velocidad para soplar o aspirar los materiales de densidad más baja, normalmente plástico film.



*Figura 5. Separador por aire [FILM].*

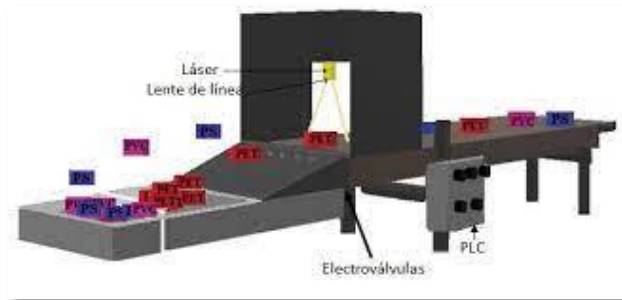
Los residuos entrarían a través de una cinta transportadora al separador donde el equipo puede estar compuesto por una combinación de conductos de aire, ventiladores, ciclones, tamices u otros dispositivos para llevar a cabo la separación por aire de los residuos más ligeros.

Por lo general, la eficiencia de estos equipos suele ser muy baja, dado que el principio básico para que un residuo sea arrastrado por una corriente es el de que tenga una densidad baja, el cual puede ser un residuo de cualquier fracción, aunque principalmente serán los films.

### **2.2.6 SEPARADOR ÓPTICO**

Los separadores ópticos llevan a cabo una separación en función de las propiedades ópticas y características de color de los residuos.

El separador óptico consta de un sensor que identifica la longitud de onda del material y si está configurado para separarlo, a continuación, en la cinta transportadora separa el residuo soprándolo con una corriente de aire o a través de dispositivos mecánicos que desvían los materiales identificados hacia diferentes fracciones.



*Figura 6. Separador óptico [OPTI].*

La principal ventaja de un separador óptico es su capacidad para identificar y separar materiales en función de propiedades ópticas, como el color, la transparencia o la opacidad, es capaz de identificar y separar materiales como PET transparente, HDPE opaco, PVC, cartón, papel, vidrio y metales.

El separador óptico puede clasificar casi cualquier material, pero es necesario que la materia venga bastante distribuida con algo de distancia, esto se consigue a través de cintas aceleradoras.

## **Capítulo 3. MODELO DESARROLLADO**

Por ser el estudio de las plantas de reciclaje un sistema complejo en el que entran en juego un gran número de variables y de análisis estadísticos, el modelo que nos ocupa se ha desarrollado haciendo uso de Matlab y de Simulink, aplicaciones de cálculo numérico avanzado y programación visual por bloques.

Siendo así, una vez expuesto el funcionamiento y la aplicación de los diferentes elementos de una planta de clasificación de residuos más frecuentes y que se van a utilizar para este proyecto, cabe detallar cómo se ha alcanzado el perfeccionamiento de sus análogos en Matlab y Simulink.

Asimismo, más adelante en esta memoria se muestran los resultados obtenidos de una simulación con los bloques desarrollados y se analizan los resultados a fin de demostrar su correcto funcionamiento.

### ***3.1 INTRODUCCIÓN: BIBLIOTECA DE BLOQUES EN SIMULINK***

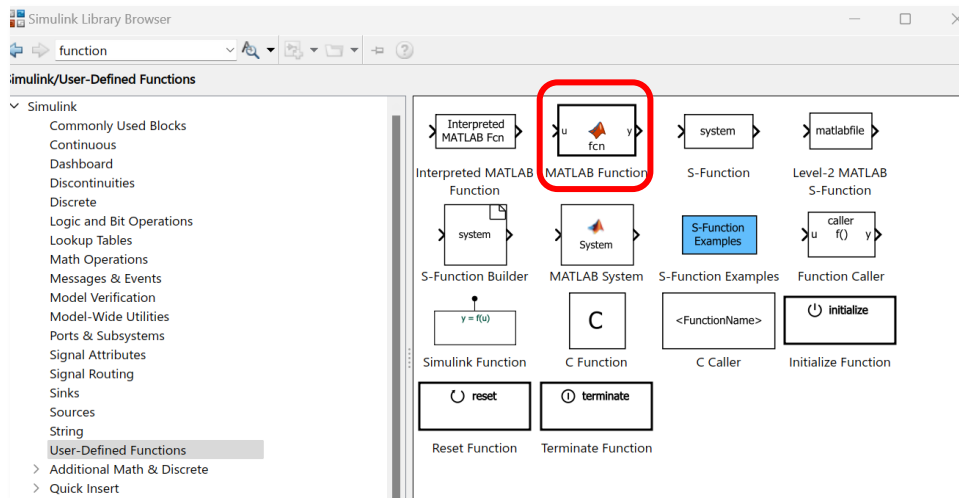
Para llevar a cabo la simulación de una planta de clasificación de residuos es imprescindible contar con los elementos que forman una planta de reciclaje de manera que de cara a configurar la simulación dispongamos de todas las herramientas que se necesitan.

Siendo así, uno de los objetivos de este proyecto ha sido el de crear una biblioteca de Simulink que contuviese los diferentes separadores que podrían configurar una planta de clasificación de residuos.

Cabe destacar, previa a la explicación del desarrollo de cada elemento programado, que a fin de replicar el funcionamiento de los elementos en el software utilizado se ha hecho uso

de un bloque de Simulink el cual a partir de una o más variables de entrada permite crear funciones.

Este bloque se encuentra dentro de la categoría “*User-Defined Functions*” de la biblioteca por defecto de Matlab.



*Figura 7. Biblioteca de bloques de Simulink.*

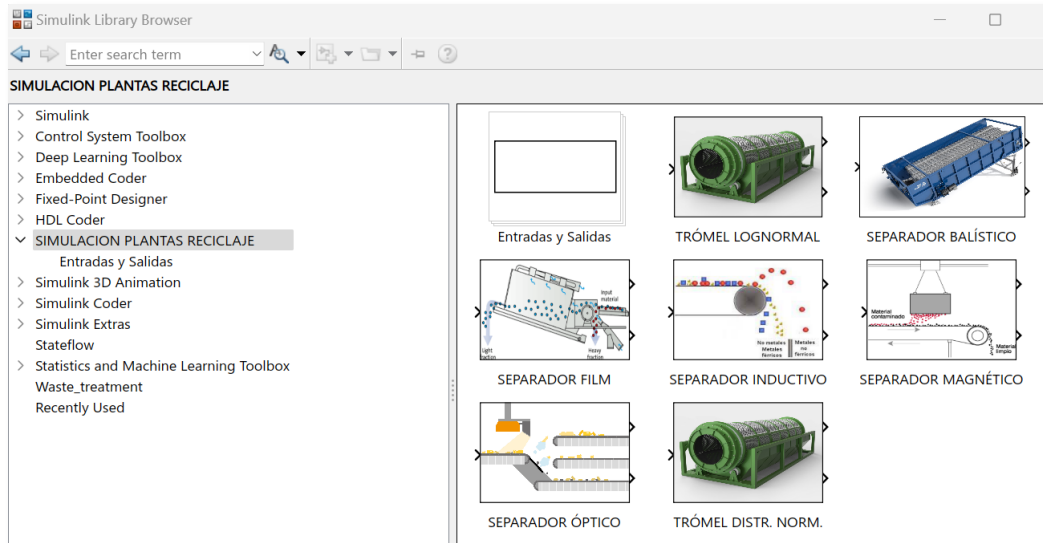
De entre la totalidad de los bloques que el usuario puede definir se ha elegido “MATLAB function” por ser un bloque programable y, por lo tanto, el que mejor se adaptaba a nuestras necesidades. Al seleccionar dicho bloque y su estructura de programación en el editor de Matlab es la siguiente:

```
function [outputs] = nombre_funcion (inputs)

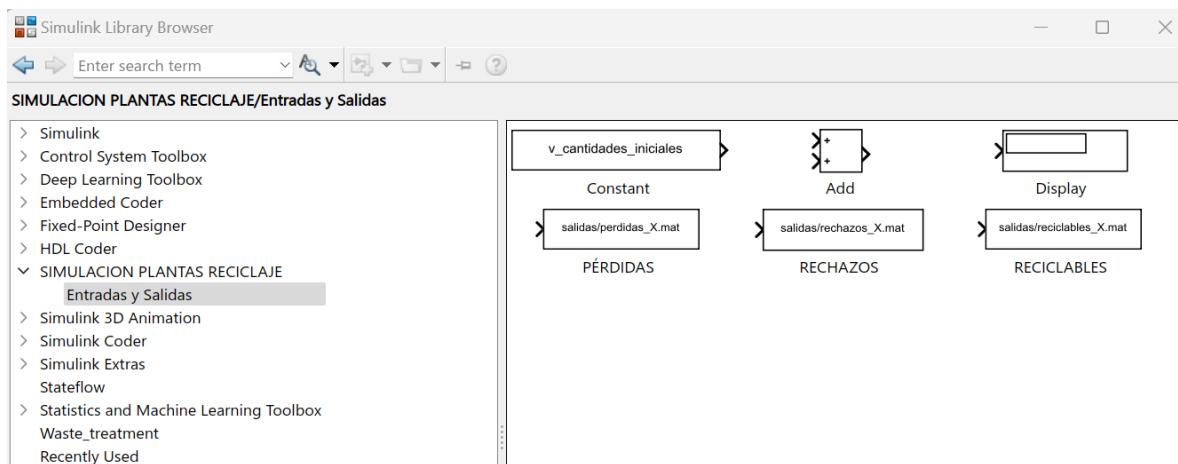
Línea de código 1;
Línea de código 2;
...
```

Una vez encontrado el bloque que mejor se adaptaba a las necesidades de configuración de la simulación, el reto era el de encontrar el programa que replicase el comportamiento de cada elemento.

Siendo así, una vez perfeccionado el funcionamiento de cada bloque tal y como detallaremos a continuación, el resultado final es el de una biblioteca de Simulink con los diferentes bloques para usar en futuras configuraciones.



*Figura 8. Aspecto final de la biblioteca de bloques de Simulink.*

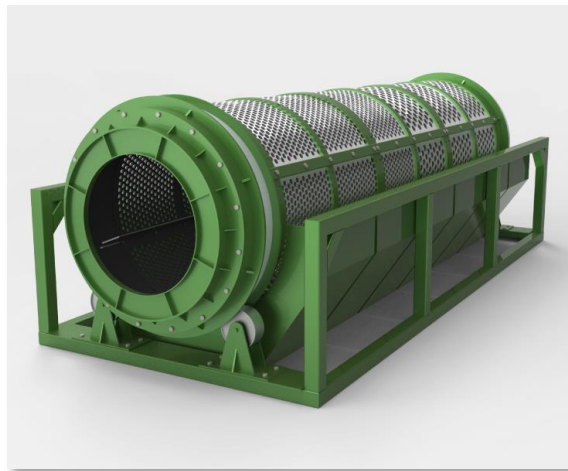


*Figura 9. Sub-biblioteca de Simulink con entradas y salidas típicas de una planta de reciclaje.*

## **3.2 ELEMENTOS PLANTA DE RECICLAJE EN SIMULINK**

### **3.2.1 TRÓMEL**

Tal y como se ha comentado, el objetivo del trómel es de clasificar los residuos en función de su tamaño, dado que algunos materiales saldrían por los orificios del tambor cilíndrico y otros quedarían atrapados en su interior.



*Figura 10. Trómel [TROM].*

Según se ha explicado previamente, necesitaríamos definir un programa que lleve a cabo la clasificación de residuos en función del tamaño de los mismos.

No obstante, crear la función no es tan simple como definir un tamaño, que sería el tamaño del orificio del trómel, e indicar que todos los residuos que tuviesen tamaño inferior saldrían por los orificios del trómel y que el resto permanecerían en el interior, dado que no contamos con el dato del tamaño exacto de cada residuo. Únicamente podemos hacer una aproximación en base al tamaño promedio de cada fracción y su desviación estándar, es decir, basándonos en el modelo estadístico de la distribución normal.

Según la distribución normal, a partir del tamaño medio de cada basura, su desviación estándar y el tamaño a partir del cual se evaluará la distribución, el programa establecería la cantidad de residuos que saldrían del trómel y la cantidad que no.

De manera que, para dividir los residuos en función de su tamaño promedio y su desviación estándar, hemos creado una tabla de Excel en la cual vienen definidos los parámetros de cada tipo de residuo y su cantidad inicial. Dicha tabla, tendrá el siguiente aspecto:

<b>fractions</b>	<b>Initial_Mass_flow</b>	<b>size_tromel1</b>	<b>size_STD_tromel1</b>
Food waste	43.120,0	30	50
Agricultural and green waste	17.500,0	40	120
Other organic residues	-	30	50
Paper	46.380,0	100	100
Cardboard	5.080,0	200	200
Glass	6.780,0	20	40
Ferrous metals	7.700,0	90	30
Aluminum Cans	2.260,0	90	20
Other ferrous items	-	170	50
Other metals	-	200	90
Bricks	-	180	40
PETE Containers	3.260,0	175	45
HDPE Containers	3.140,0	175	45
Miscellaneous Plastic items	7.020,0	160	55
Miscellaneous Film Products	19.760,0	200	90
Household Hazardous Waste	2.800,0	220	220
Special Waste	9.320,0	200	220
Textiles	12.720,0	220	220
Misc. Combustible	-	220	100
Fines	7.040,0	10	30
Misc. Non Combustible	6.120,0	200	220

*Tabla 1. Tamaño promedio y desviación estándar de cada fracción de residuos.*

Tal y como podemos observar, cada fila de la tabla corresponde a una fracción de residuo (*Food waste, Agricultural and green waste, ...*) y cada columna define los parámetros de cada clasificación de basura (tamaño promedio y desviación estándar).



Según se verá en la definición de otros elementos de la planta, el objetivo de definir una tabla con los parámetros de cada fracción en Excel para algunos elementos de la planta de reciclaje es el de tener todos los datos agrupados en un solo fichero y así poder agilizar el proceso en caso de que fuese necesario cambiar algún parámetro.

Otra forma, hubiese sido insertar los parámetros de forma manual en Matlab o como constantes en Simulink, pero de esta manera no tendríamos todos los datos agrupados y organizados de un solo vistazo y a la hora de realizar algún cambio habría que tener mucho cuidado de no cambiar el parámetro incorrecto.

Una vez definida la tabla Excel con las características de cada fracción, la misma se carga en Matlab y se utiliza para replicar el funcionamiento del trómel.

Para cargar la tabla en Matlab se utilizará el comando `readtable()`, según el cual obtendremos una tabla con los datos de la tabla de Excel.

A continuación, una vez cargada la tabla en Matlab trasladaremos cada columna de la tabla a un vector de Matlab de manera que podamos operar con los datos:

```
% cargamos la tabla en Matlab
nombre_tabla = readtable('nombre_fichero_excel.xlsx');

% copiamos cada columna en un vector
tamaños_promedio_tromel = nombre_tabla(:, 'nombre_columna');
desviaciones_estandar_tromel = nombre_tabla(:, 'nombre_columna');
```

El fichero final de Matlab en el que cargaremos todos los parámetros tendrá la siguiente estructura:

```

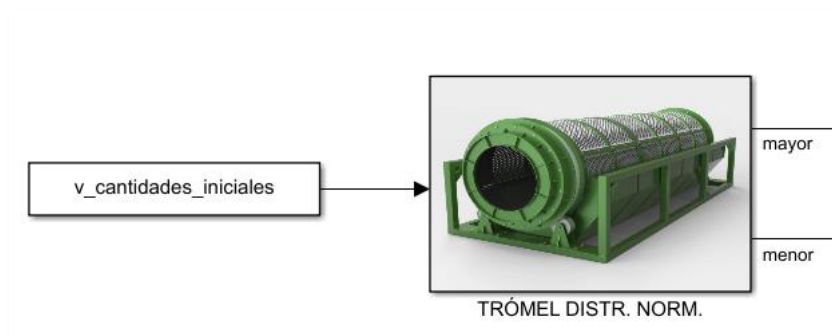
4  %% CARGA DE PARAMETROS DE BASURA %%
5
6  waste_matrix = readtable('waste_definition_EGYPT.xlsx');
7
8  % leo el listado de residuos y las cantidades de entrada
9  v_fracciones = table2array(waste_matrix(:, 'fractions'));
10 v_cantidades_iniciales = table2array(waste_matrix(:, 'Initial_Mass_flow')); %vector con cantidades iniciales
11
12 % TROMEL 1
13 v_mu_t1 = table2array(waste_matrix(:, 'size_tromell')); %vector con tamaño medio de las basuras
14 v_sigma_t1 = table2array(waste_matrix(:, 'size_STD_tromell')); %vector con desviacion tipica de las basuras

```

*Figura 11. Código de Matlab.*

Una vez definidos los parámetros a utilizar y cargados en Matlab, procedemos a utilizarlos para nuestro modelo en Simulink.

Como decíamos al principio, hemos hecho uso del bloque “Matlab function”, según el cual podemos crear un programa en función de unos parámetros de entrada. En nuestro caso el programa hará una selección en función de una distribución normal, por lo que utilizaremos el comando `normcdf()` para dividir los residuos en función de una distribución acumulativa normal. Tal y como hemos ido indicando, dicho comando trabaja con el tamaño de malla en el que evaluaremos la distribución, el tamaño promedio ( $\mu$ ) y la desviación estándar ( $\sigma$ ), por lo que estos parámetros definirán las entradas del bloque:



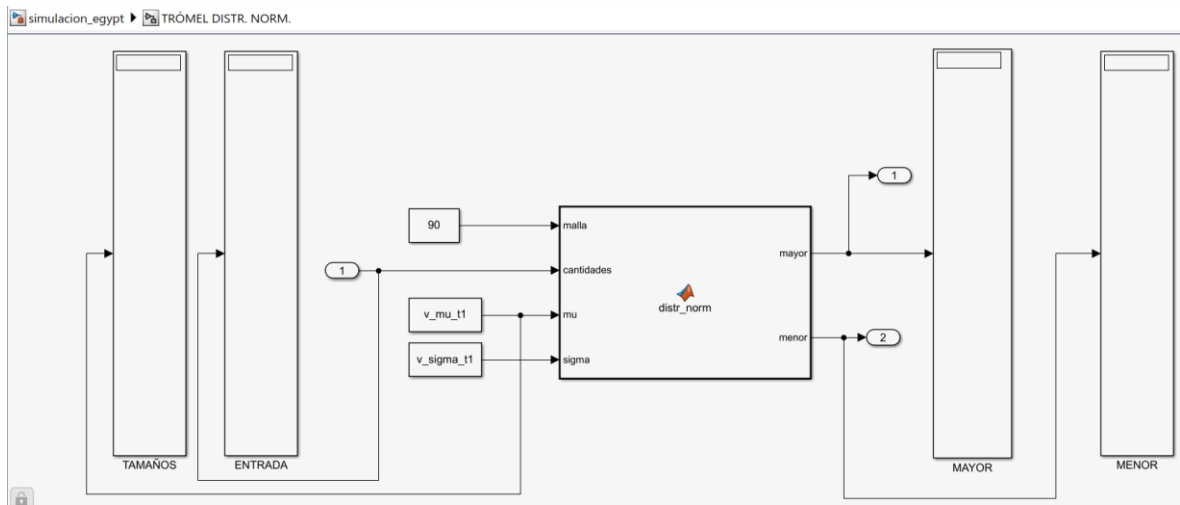


Figura 12. Entradas y salidas bloque Simulink.

Para la definición del bloque, recordamos que su estructura es la siguiente:

```
function [outputs] = nombre_funcion (inputs)
Línea de código 1;
Línea de código 2;
...
```

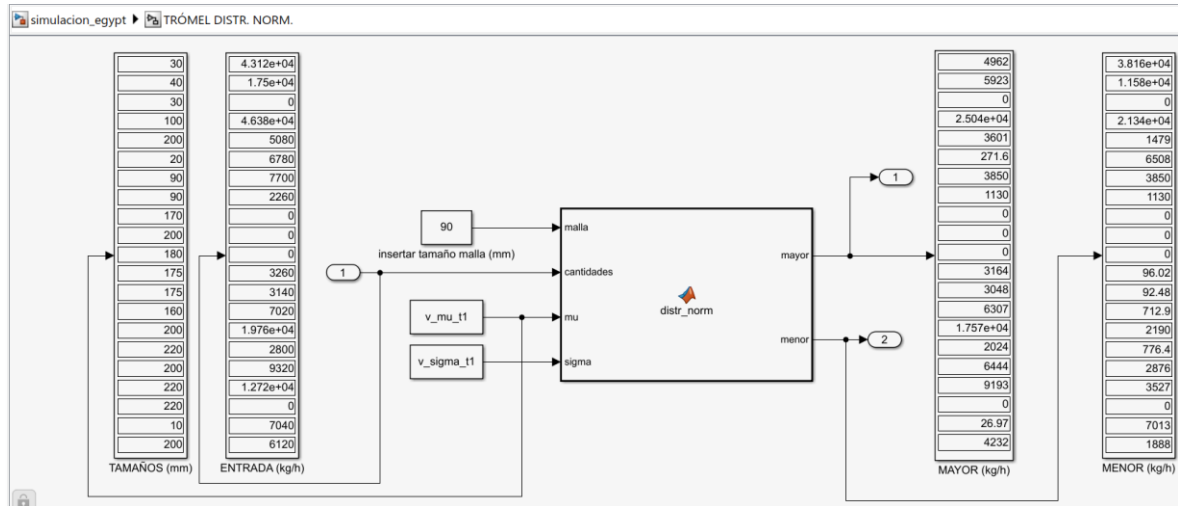
Por lo que, el programa final para que el bloque funcione correctamente resulta:

```
1 function [mayor, menor] = distr_norm(malla, cantidades, mu, sigma)
2
3     distr_norm_acum = normcdf(malla, mu, sigma);
4
5     menor = cantidades.*distr_norm_acum;
6     mayor = cantidades - menor;
```

Figura 13. Programa funcionamiento trómel basado en la distribución normal.

### 3.2.1.1 Resultados obtenidos

Con todo definido, el resultado final al compilar el programa resultaría en dos vectores con los valores de cantidad de residuos que salen por una línea y a la cantidad que salen por la otra.



**Figura 14. Resultados de la simulación del trómel.**

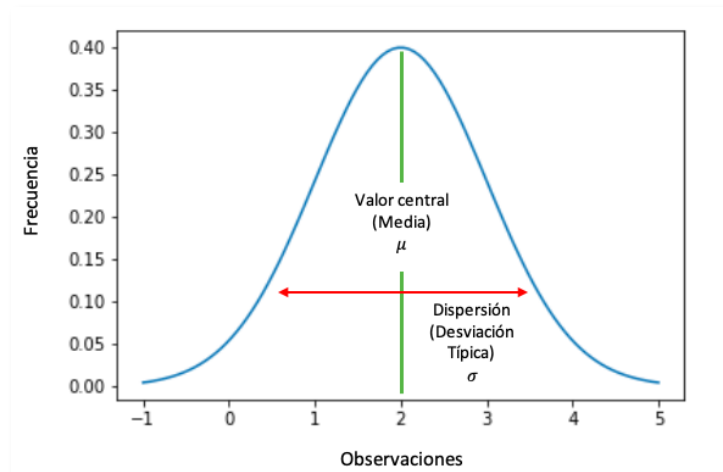
Según vemos en el resultado final y atendiendo a la distribución normal definida en nuestro programa, por una línea de salida del separador obtendríamos las fracciones de residuos con tamaño promedio inferior al tamaño de malla y por la otra línea las fracciones de residuo con tamaño superior.

Analizando los resultados obtenidos para la primera fracción de residuos “*Food Waste*” a la que entran 43.120 kg/h de residuos con un tamaño promedio de 30 mm y una desviación estándar de 50 mm, observamos que utilizando un mallado de 90 mm, la cantidad de residuos de menor tamaño es de 38.158 kg/h mientras que la cantidad de “*Food Waste*” de mayor tamaño es de 4.962 kg/h, es decir, según la distribución normal un 88,5% de los residuos de la fracción estarían por debajo de un tamaño de 90 mm y un 11,5% tendrían mayor tamaño.

### 3.2.1.2 Ampliación Trómel

Tal y como se puede ver en la Figura 14, el resultado obtenido parece correcto, no obstante, analizando el reparto de los residuos en función de una distribución normal nos damos cuenta de que no es del todo correcto, dado que, una distribución normal en la que la desviación

estándar sea suficientemente grande con respecto a la media puede arrojar valores negativos, y que, por lo tanto, no tiene sentido físico que haya tamaños negativos.



*Figura 15. Distribución normal [DNOR].*

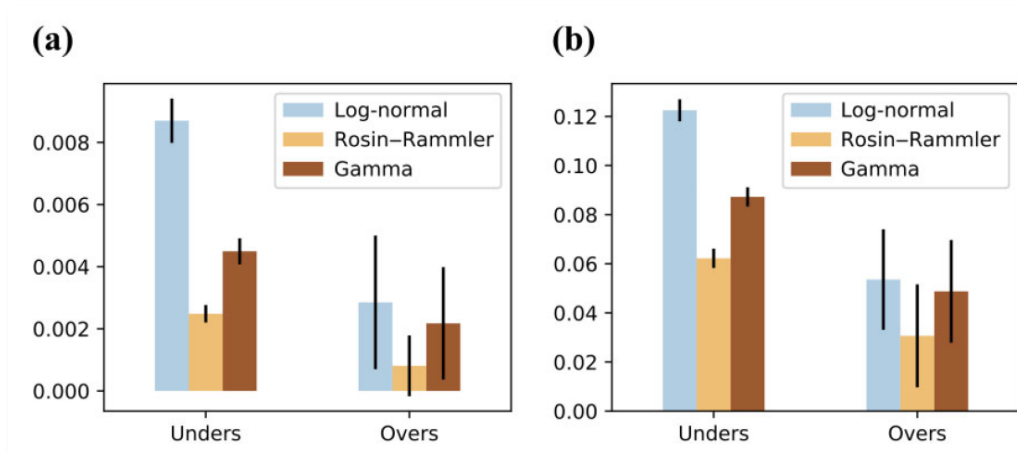
Profundizando en el tema, encontramos un artículo de investigación dirigido por Tanguay-Rioux, F., investigador canadiense, titulado “*Particle size analysis of municipal solid waste for treatment process modeling*” [TANG20] en el que concluyen que el tamaño de las partículas de los residuos municipales, a lo que hacen referencia con MSW (*municipal solid waste*), es un factor determinante a la hora de modelar una planta de reciclaje. Para ello, a fin de aproximar lo máximo posible la simulación al comportamiento real, buscan encontrar la distribución que más asemeja el tamaño de las partículas simuladas a la realidad, por lo que estudian tres tipos diferentes de distribución: la lognormal, la Rosin-Rammler y la gamma.

En el artículo, los investigadores llevan a cabo una serie de tests que definen como “*Goodness-of-fit tests*” en los que prueban como de válidas son las distribuciones analizadas.

Estos “*Goodness-of-fit tests*” se basan en el test de la suma de los cuadrados de la diferencia entre el tamaño real y el tamaño estimado de los residuos, según el cual cuanto menor sea

este valor mejor estimación habremos realizado, y en el test de Kuiper, según el cual se determinan las máximas y las mínimas diferencias entre los valores obtenidos

Según los “*Goodness-of-fit tests*” mostrados en el artículo, realizados para los parámetros que definen las distribuciones (tamaño promedio y desviación estándar), se obtienen los siguientes resultados:



**Figura 16. Resultados pruebas de validación parámetros distintas distribuciones [TANG20].**

A la izquierda, los resultados del test de la suma de los cuadrados de la diferencia entre el tamaño real y el tamaño estimado de los residuos, cuanto más bajos más se aproxima a la realidad. A la derecha, los resultados del test de Kuiper, cuantas menos diferencias más aproximado a la realidad. Ambos tests concluyen que la distribución que mejor se aproxima a los valores reales es la de Rosin-Rammler.

A continuación, en el artículo descartan la distribución gamma dado que al verificar las tres distribuciones en una planta de combustible derivado de basura (RDF, *refuse-derived fuel*) se concluye que es la distribución que menos se aproxima a la realidad.

Del artículo, entendemos que entre la distribución Rosin-Rammler y la distribución lognormal ambas se aproximan de forma similar a la solución propuesta en el artículo canadiense:

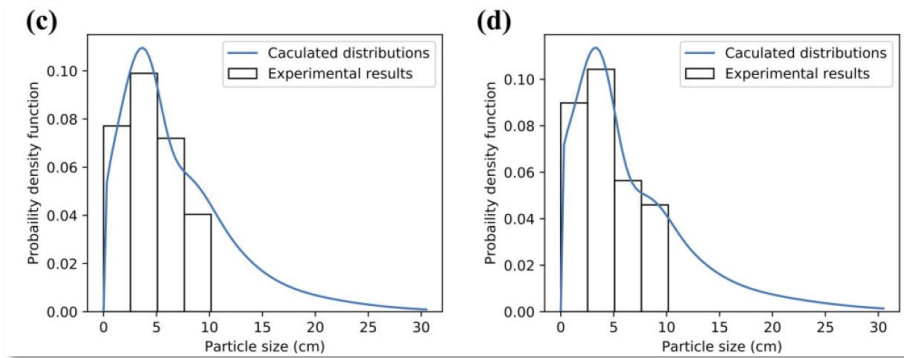


Figura 17. Solución del artículo para la distribución [TANG20].

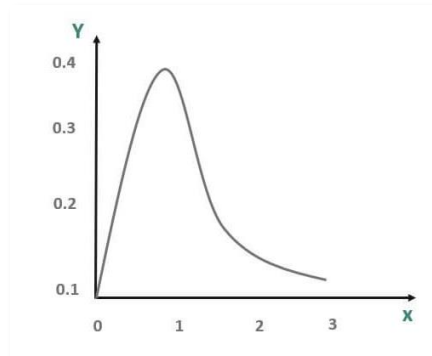


Figura 18. Distribución lognormal [DLOG].

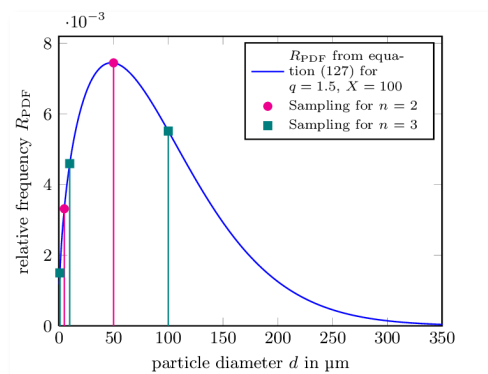


Figura 19. Distribución Rosin-Rammler [DROS].

Por lo que, atendiendo al artículo, modificamos nuestra función basada en una distribución normal para utilizar una distribución lognormal.

Sin embargo, los parámetros utilizados por la lognormal no son los mismos que los de la distribución normal por lo que hay que adaptar la función haciendo la siguiente transformación:

$$\mu = \log \left( \frac{m^2}{\sqrt{v^2 + m^2}} \right)$$

$$\sigma = \sqrt{\log \left( \frac{v^2}{m^2} + 1 \right)}$$

Siendo:

$\mu$ : el tamaño promedio para la distribución lognormal.

$\sigma$ : la desviación estándar para la distribución lognormal.

$m$ : el tamaño promedio para la distribución normal.

$v$ : la desviación estándar para la distribución normal.

Incorporando dicho código en el bloque de la función ya creado:

```

1  function [mayor, menor] = distr_lognorm(malla, cantidades, mu, sigma)
2
3      mu_ln = mu;
4      sigma_ln = sigma;
5
6  for i = 1:1:21
7      mu_ln(i) = log((mu(i)^2)/sqrt(sigma(i)^2+mu(i)^2));
8      sigma_ln(i) = sqrt(log(sigma(i)^2/mu(i)^2+1));
9  end
10
11  distr_lognorm_acum = logncdf(malla,mu_ln,sigma_ln);
12
13  menor = cantidades.*distr_lognorm_acum;
14  mayor = cantidades - menor;

```

**Figura 20. Código final que adapta nuestros parámetros a la distribución lognormal.**

Una vez perfeccionado el código que simula el comportamiento del trómel, comprobamos su comportamiento dibujando las gráficas de las distribuciones y comprobando que efectivamente no hay tamaños negativos:



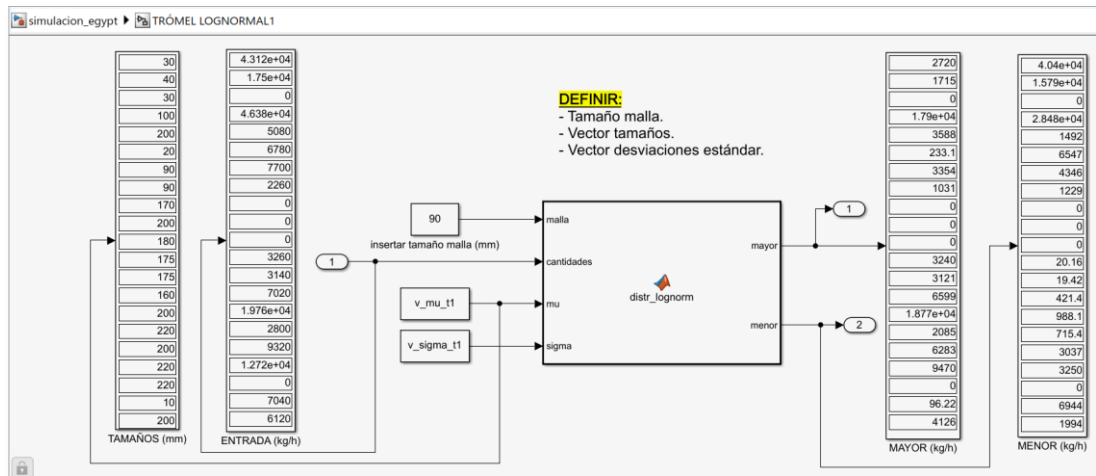


Figura 21. Resultados de la simulación del trómel con una distribución lognormal.

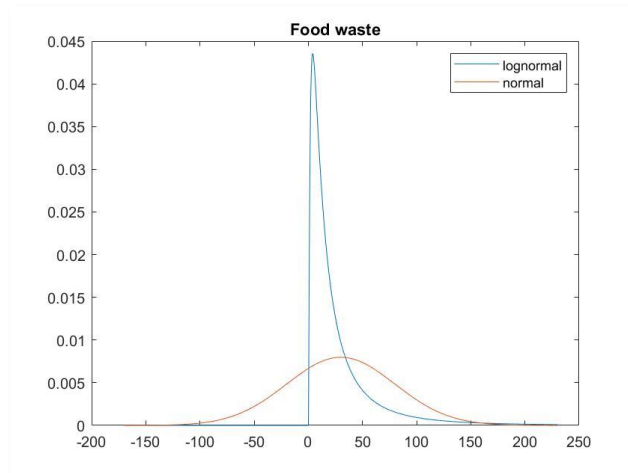
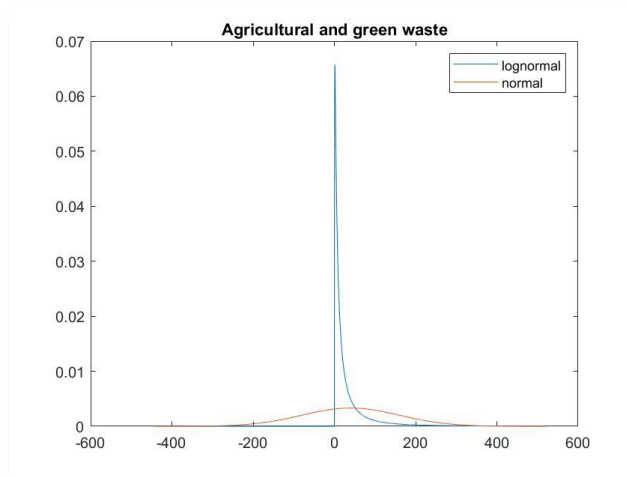
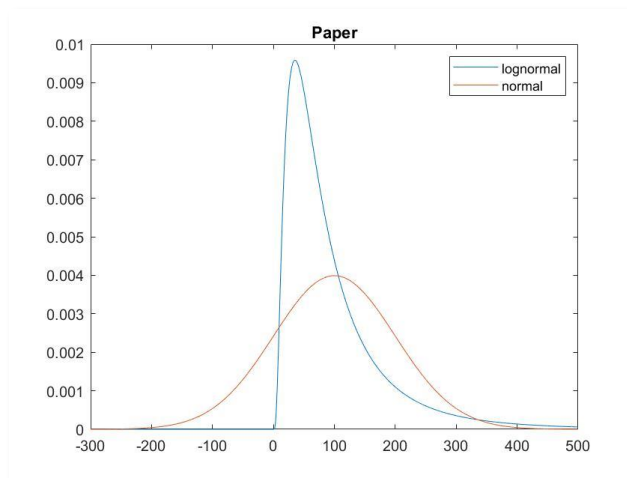


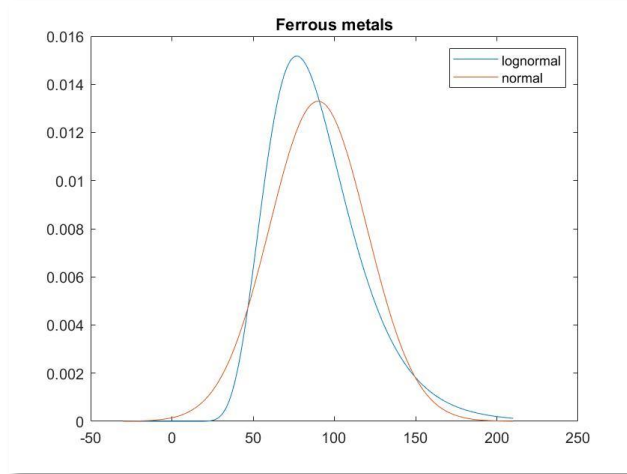
Figura 22. Distribuciones “Food waste” con tamaño promedio 30 y desviación estándar 50 para la distribución normal.



*Figura 23. Distribuciones “Agricultural and green waste” con tamaño promedio 40 y desviación estándar 120 para la distribución normal.*



*Figura 24. Distribuciones “Paper” con tamaño promedio 100 y desviación estándar 100 para la distribución normal.*



*Figura 25. Distribuciones “Ferrous metals” con tamaño promedio 90 y desviación estándar 30 para la distribución normal.*

En la última figura mostrada, dado que la desviación estándar es mucho menor que el tamaño promedio, la distribución lognormal se ajusta de forma muy aproximada a la distribución normal.

### **3.2.2 SEPARADOR BALÍSTICO**

Según se ha comentado, del funcionamiento básico de un separador balístico obtenemos una clasificación en función del tamaño, el peso y la forma.



*Figura 26. Separador balístico [BALI].*

Del modelo que nos sirve de base para nuestro programa, hemos obtenido el porcentaje de residuos rodantes y no rodantes de cada fracción, los cuales cargaremos en el Excel que teníamos creado para el trómel.

fractions	Initial_Mass_flow	per_3D_ballistic1	per_2D_ballistic1
Food waste	43.120,0	64%	36%
Agricultural and green waste	17.500,0	50%	50%
Other organic residues	-	50%	50%
Paper	46.380,0	10%	90%
Cardboard	5.080,0	10%	90%
Glass	6.780,0	100%	0%
Ferrous metals	7.700,0	68%	32%
Aluminum Cans	2.260,0	79%	21%
Other ferrous items	-	89%	11%
Other metals	-	72%	28%
Bricks	-	68%	32%
PETE Containers	3.260,0	79%	21%
HDPE Containers	3.140,0	79%	21%
Miscellaneous Plastic items	7.020,0	79%	21%
Miscellaneous Film Products	19.760,0	10%	90%
Household Hazardous Waste	2.800,0	37%	63%
Special Waste	9.320,0	67%	33%
Textiles	12.720,0	21%	79%
Misc. Combustible	-	56%	44%
Fines	7.040,0	20%	80%
Misc. Non Combustible	6.120,0	87%	13%

*Tabla 2. Porcentaje de rodantes y de no rodantes de cada fracción.*

No obstante, más allá de una estimación del porcentaje de residuos rodantes respecto al resto, dado que el tamaño, el peso y la forma de cada residuo no son características que se puedan conocer con exactitud para cada tipo de basura, para la simulación esas variables no podrán ser un criterio.

Parámetros que sí que se podrían ajustar son los configurables del propio separador, que también influyen en el resultado de la separación. En nuestro caso y basándonos en el artículo “*Sorting with ballistic separators*” [SIGM18] de Sigmund, U., ingeniero mecánico, uno de los parámetros más significativos en la clasificación es la inclinación del separador.

Según otros artículos científicos, otro factor determinante podría ser la velocidad de centrifugado de los tambores, sin embargo, el margen no es tan amplio como para provocar un efecto demasiado significativo.

La inclinación del separador junto con un porcentaje aproximado de los residuos rodantes serán las variables en base a las cuales nuestro programa hará el filtrado.

Así, según diferentes artículos científicos, resulta que el separador balístico hace un cribado efectivo, pero no deja de ser muy general, por lo que, en las cintas de salida del separador, las fracciones se ven contaminadas por restos de otras fracciones. El rendimiento del separador (“*yield*”) y la pureza de las fracciones (“*purity*”), son las dos variables que indican la efectividad del separador y que se ven afectados por la cantidad tratada.

Para analizar la efectividad de nuestra simulación analizaremos estos dos parámetros: el rendimiento del separador (“*yield*”) y la pureza de las fracciones de salida (“*purity*”).

Para definir el primero nos basaremos en los estudios llevados a cabo y explicados en el artículo de Sigmund, U., según el cual para obtener el porcentaje de rendimiento más elevado en la totalidad de la separación balística lo mejor opción es la de hacer un sistema de separadores balísticos con en el que haya: uno con más pendiente y otro con menos pendiente.

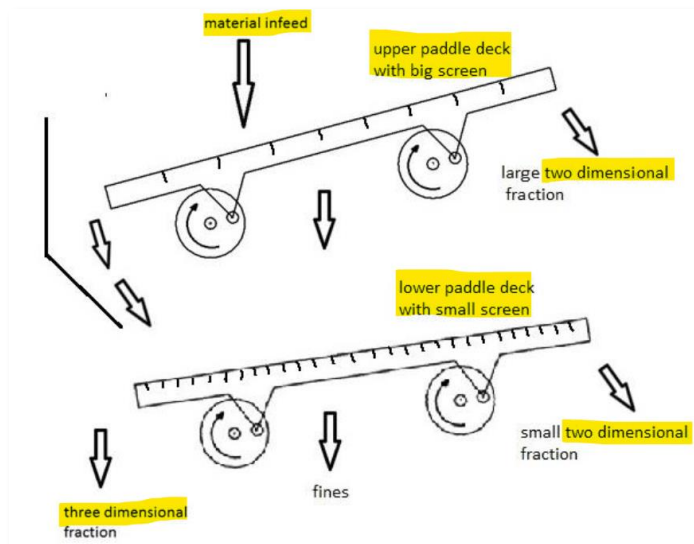
El objetivo de poner dos separadores en serie, uno con más pendiente que otro, es el de obtener:

- mayor pureza en la línea de rodantes del separador con menor inclinación,
- mayor pureza en la línea de no rodantes del separador con mayor inclinación y
- mayor pureza a la salida de ambas líneas.

Además, con respecto al rendimiento, que indica el porcentaje que sale por la salida que debería:

- cuando hay menor inclinación empeora para los residuos rodantes, dado que, al haber poca inclinación, respecto a la totalidad de los residuos rodantes alguno podría perderse por la línea de no rodantes, y
- cuando hay mayor inclinación empeora para los residuos no rodantes, por el mismo motivo, al haber demasiada inclinación algún objeto no rodante podría caer por la línea de rodantes.

El esquema sería el siguiente:



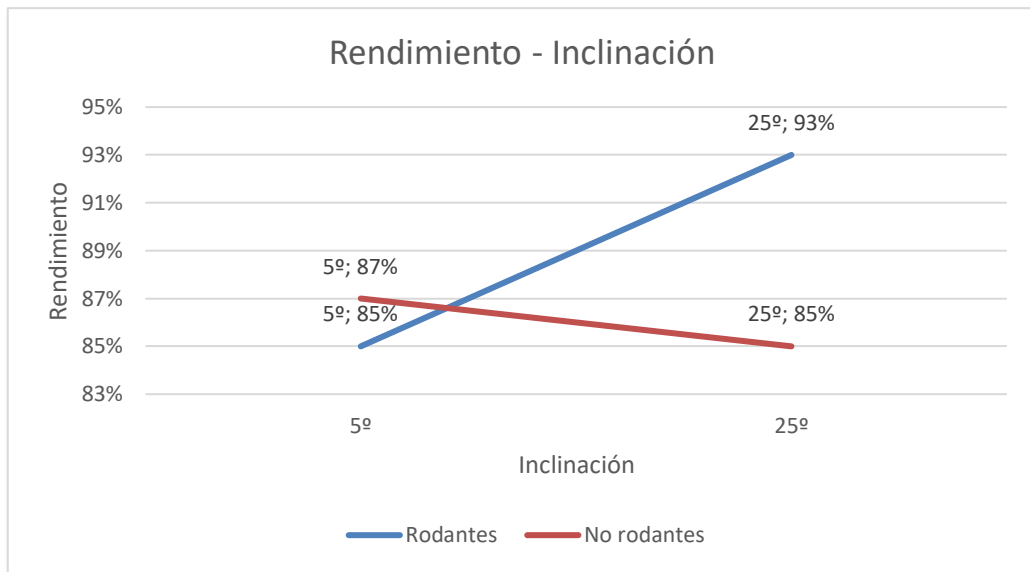
*Figura 27. Sistema óptimo para la clasificación balística [SIGM18].*

Tal y como se puede ver en la figura, en el primer separador con mayor inclinación obtendríamos mayor pureza en la fracción de no rodantes, pero a su vez menor rendimiento, dado que algún objeto no rodante podría haberse ido por la línea de rodantes.

Al colocar el segundo separador con menor inclinación lo conseguimos es mayor pureza en la línea de rodantes, que recordamos que podría venir contaminada por algún objeto no rodante, y menor rendimiento en la salida de rodantes, no obstante, como ya teníamos un buen rendimiento de entrada no llega a dañar del todo la línea.

Una vez analizado el sistema y decidido implementarlo en nuestra simulación lo primero que hemos hecho ha sido calcular el rendimiento que tendrá nuestro separador en función de la inclinación.

De las conclusiones obtenidas del artículo “*Handbook for sorting of plastic packaging waste concentrates*” [THOD15] publicado por el instituto de Wageningen, en Países Bajos, sobre la optimización de los separadores balísticos, hemos decidido lo siguiente: la inclinación del separador será un valor comprendido entre los 5°-25° y para los residuos rodantes el rendimiento se encontrará aproximadamente entre el 85% y el 93%, siendo mejor cuanto más inclinación haya, tal y como hemos explicado, mientras que para los residuos no rodantes, el rendimiento estará entre el 85% y el 87%, empeorando cuanto mayor inclinación haya.



**Gráfico 1. Relación entre la pendiente del separador y el rendimiento de las salidas.**

Para nuestro programa el rendimiento será el primer valor que calculemos dado que será una de las variables de nuestra función, la cual determinará la cantidad de residuos que salen por cada línea.

La función utilizada para la separación se basa en la cantidad de residuos que entra al separador, el porcentaje que tenemos estimado de residuos rodantes y no rodantes y el rendimiento, calculado en función de la inclinación del separador.

De manera que un primer término de la fórmula que determina la cantidad de rodantes en función del rendimiento del separador para los objetos rodantes (*per\_yield\_3D*) y del porcentaje estimado de rodantes (*per\_rolling*) en la cantidad de residuos de entrada (*cantidades*) sería:

$$cantidades \times per\_rolling \times per\_yield\_3D$$

Además, a este término le añadimos la cantidad de residuos no rodantes que han salido por la línea de rodantes en función del porcentaje estimado de residuos no rodantes (*per\_flat*) en la cantidad de residuos de entrada (*cantidades*) y en función del restante del rendimiento del separador para los objetos no rodantes (*1-per\_yield\_2D*):

$$cantidades \times per\_flat \times (1-per\_yield\_2D);$$

La suma de ambos términos determinaría la cantidad de residuos que obtendríamos por la salida de lo que en teoría deberían ser los rodantes de la fracción inicial, lo que únicamente pasaría para el caso en el que *per\_yield\_3D* y *per\_yield\_2D*, es decir el rendimiento de ambas fracciones, fuese 100%.

Las mismas formulas aplicarían para calcular la fracción de salida de los no rodantes.

Por último, con respecto a los cálculos, hemos añadido en la simulación el cálculo de la pureza de las salidas, el cual resulta ser el porcentaje de residuos rodantes que deberían salir por la línea de rodantes del separador, es decir el primer término del resultado final, entre el total de la cantidad salida por la línea de rodantes:



$$pureza = \frac{cantidades \times per_{rolling} \times per_{yield_{3D}}}{cantidades \times per_{rolling} \times per_{yield_{3D}} + cantidades \times per_{flat} \times (1 - per_{yield_{2D}})} \times 100$$

Resumiendo, en nuestro programa las entradas serían el vector con las cantidades de cada fracción que entran al separador, los vectores con los porcentajes de rodantes y de no rodantes de cada fracción y los grados de inclinación con la horizontal del separador.

Con el dato de los grados de inclinación del balístico calcularíamos el rendimiento de la clasificación para rodantes (*per\_yield\_3D*) y no rodantes (*per\_yield\_2D*) en función del Gráfico 1 para a continuación poder calcular la cantidad final que sale por la línea de rodantes (*rolling*) y la de no rodantes (*flat*).

Además, como dato adicional hemos calculado la pureza de las salidas: *purity\_3D* y *purity\_2D*.

```
function [rolling, flat, purity_3D, purity_2D] = ballistic(cantidades,
inclinacion, per_rolling, per_flat)

% teniendo en cuenta que la inclinación estará entre 5 y 25 grados y que el
% porcentaje de yield_3D será como máximo 93% y el de yield_2D 87% y el
% mínimo de ambos 85%

per_yield_3D = (85 + 0.4*(inclinacion-5))/100;
per_yield_2D = (87 - 0.1*(inclinacion-5))/100;

rolling = cantidades.*per_rolling.*per_yield_3D + cantidades.*per_flat.*(1-
per_yield_2D);
purity_3D = ((cantidades.*per_rolling.*per_yield_3D)./rolling)*100;

flat = cantidades.*per_flat.*per_yield_2D + cantidades.*per_rolling.*(1-
per_yield_3D);
purity_2D = ((cantidades.*per_flat.*per_yield_2D)./flat)*100;
```

En Simulink, el bloque correspondiente al separador balístico sería tal que así:



Figura 28. Bloque Simulink separador balístico.

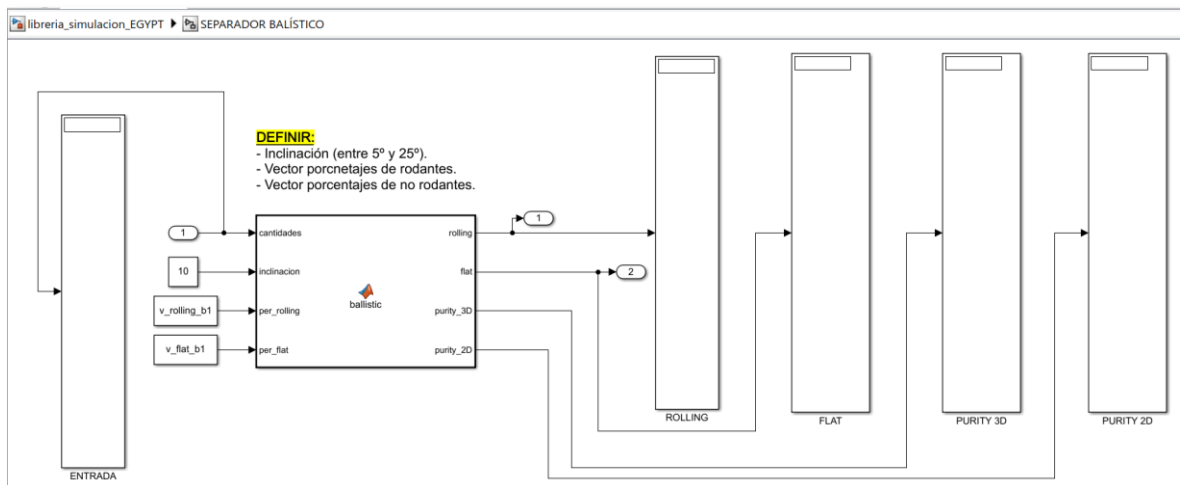
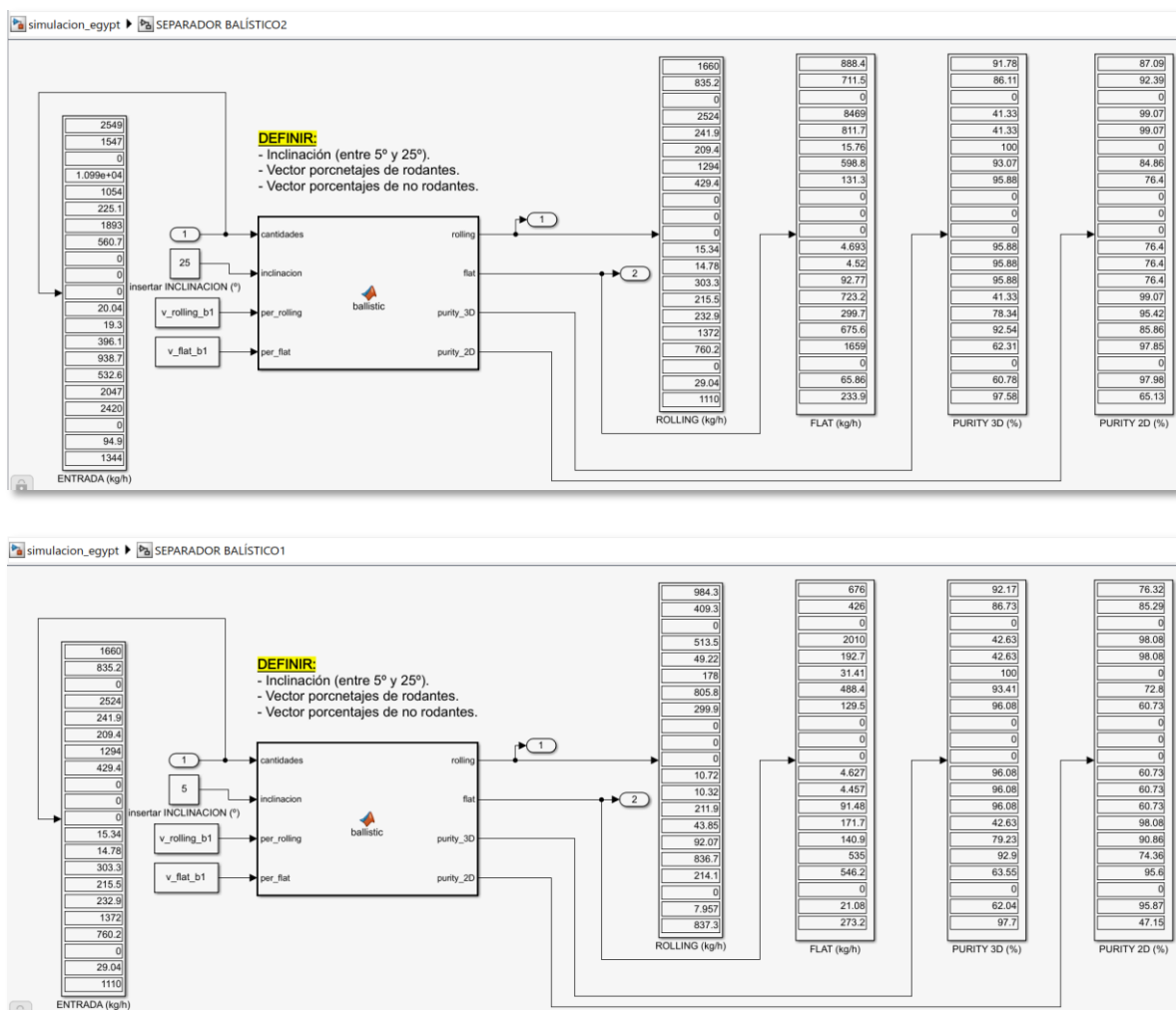


Figura 29. Entradas y salidas separador balístico.

Como podemos observar en la Figura 29, la inclinación del separador balístico sería un parámetro a introducir a mano desde Simulink. Los vectores con los porcentajes de rodantes y no rodantes, sin embargo, los cargaríamos desde Matlab.

### 3.2.2.1 Resultados obtenidos

Una vez realizada la simulación de la planta, analizamos los resultados obtenidos en el comportamiento del separador balístico a fin de comprobar su correcto funcionamiento y el acierto de configurar un balístico con menor inclinación a la salida de un con mayor inclinación:



*Figura 30. Resultados de la simulación del separador balístico.*

Tal y como podemos observar, en el separador con mayor inclinación los porcentajes de pureza son mayores para la salida de residuos no rodantes mientras que el porcentaje de

pureza de rodantes del primer separador mejora al pasar por el segundo balístico con menor inclinación.

91.78	87.09
86.11	92.39
0	0
41.33	99.07
41.33	99.07
100	0
93.07	84.86
95.88	76.4
0	0
0	0
0	0
95.88	76.4
95.88	76.4
95.88	76.4
41.33	99.07
78.34	95.42
92.54	85.86
62.31	97.85
0	0
60.78	97.98
97.58	65.13
PURITY 3D (%)	PURITY 2D (%)

*Figura 31. Resultados de pureza para rodantes y no rodantes en balístico con inclinación de 25°.*

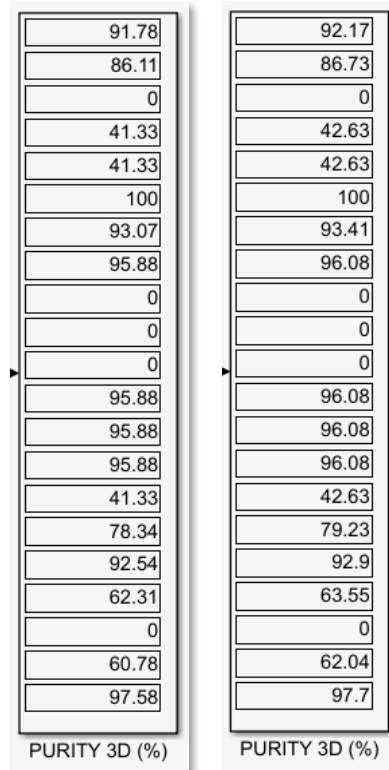


Figura 32. Pureza de rodantes a la salida del primer balístico con mayor inclinación y del segundo con menor inclinación.

### 3.2.3 SEPARADOR MAGNÉTICO

El separador magnético, según se ha comentado, lleva a cabo la separación de aquellos materiales que contienen hierro y que son atraídos por un imán de la fracción de residuos.

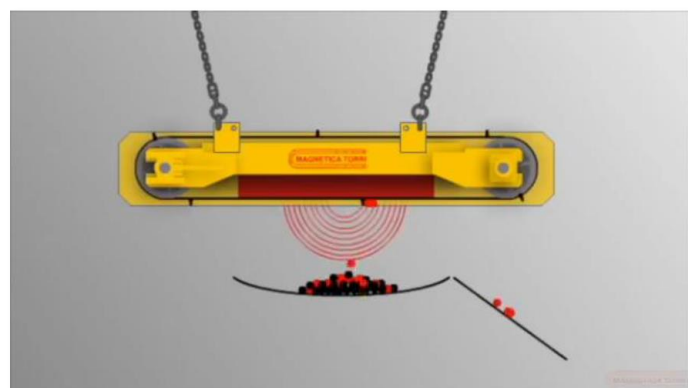


Figura 33. Separador magnético de bandas cruzadas [MAGN].

Según las informaciones recopiladas, a diferencia del trómel y del separador balístico, respecto a la clasificación del separador magnético no hay una distribución estadística en función de la cual podamos programar nuestra simulación.

Para replicar el funcionamiento del magnético nos basaremos en los estudios de eficiencia del separador magnético que hemos encontrado, dado que en la práctica el porcentaje final de materiales férricos recuperados no llega a ser del 100% puesto que la recuperación del separador depende tanto de las características del imán, como de la cinta transportadora y de los residuos tratados.

Algunos de estos factores que influyen en la eficiencia del separador magnético son la distribución de los residuos sobre la cinta transportadora, la velocidad de la cinta, el ancho de la cinta, la intensidad del campo magnético y el tamaño y peso de los materiales férricos.

Además, las sustancias magnéticas se clasifican en diferentes categorías según su magnetismo:

- Fuertemente magnéticas ( $H < 1.500$  Gauss)
- Medianamente magnéticas ( $H < 3.000-6.000$  Gauss)
- Débilmente magnéticas ( $H < 6.000-30.000$  Gauss)

Por lo que, existen diferentes separadores magnéticos en función de las necesidades de la planta, entre los cuales están:

- Imanes permanentes: para residuos ferromagnéticos y algunos materiales paramagnéticos.
- Electroimanes: para partículas débilmente paramagnéticas.
- Imanes de materiales superconductores: para conseguir un incremento de campo magnético superior a 2.500 Gauss, el máximo de los electroimanes.

A continuación, mostramos una clasificación de los diferentes separadores magnéticos en función de la intensidad de su campo magnético:

<i>Intensidad</i>	<i>Tipo</i>	<i>Separador</i>
Baja intensidad	Seco	Tambor (Ball-Norton)
		Rodillo inducido
	Húmedo	Banda (Crocket)
		Tambor
Alta intensidad convencional	Seco	Bandas cruzadas (Wheterill)
		Discos
	Húmedo	Rodillo inducido
		Rodillo de imanes permanentes
	Húmedo	Carrusel
		Filtro magnético
Alta intensidad con superconductores	Seco y húmedo	Diseños especiales (cuadripolar, multipolo, centrifugo)
		Diseño clásico (tambor)

*Tabla 3. Tipos de separadores magnéticos.*

En nuestra simulación basaremos el funcionamiento básico de nuestro programa en el funcionamiento del separador de alta intensidad convencional de bandas cruzadas, el cual consta de dos cintas transportadoras separadas unos centímetros que se cruzan perpendicular en un punto. La cinta superior está equipada con unos imanes permanentes de alta intensidad (1.000-5.000 Gauss) que generan un campo que atrae los residuos férricos y los transporta hacia un contenedor basculante, o bien hacia una prensa de metales.

Este tipo de separador deja a los residuos fuertemente magnéticos, débilmente magnéticos o de tamaño y peso superior al soportado por el campo magnético generado sin ser clasificados correctamente.

De manera que, según la investigación desarrollada en el artículo: “*Expert-Based Modular Simulator for Municipal Waste Processing Technology Design*” [BARK22] publicado en Noviembre de 2022 por investigadores de la Universidad de Panonia, en Hungría, el rendimiento de los separadores magnéticos estaría entre el 82,5% y el 90% aproximadamente.

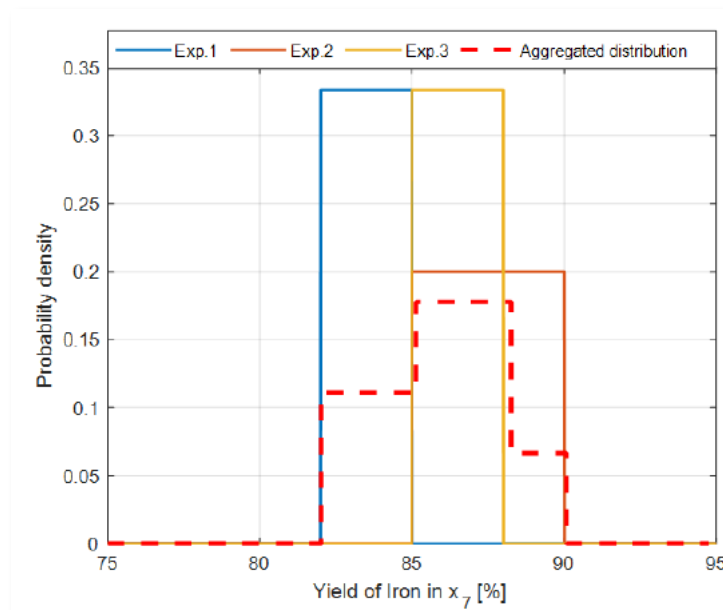


Figura 34. Resultados de rendimientos en el separador magnético [BARK22].

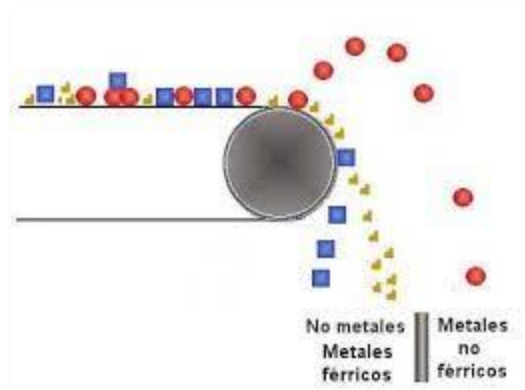
Siendo así, el rendimiento que hemos definido para nuestra simulación es de 87,5% para la fracción de residuos férricos “*Ferrous Metals*” y del 83% para la fracción “*Other ferrous items*”.

Dado que únicamente se trata de dos fracciones férricas, estos porcentajes los introduciremos directamente en el código del separador magnético, de modo también, que no podrán ser modificables desde el entorno de la simulación.

```
function [no_magneticos, magneticos, recovery] = sep_mag(cantidades)
```







*Figura 36. Separador inductivo [INDU].*

De manera similar al separador magnético, la clasificación depende tanto de las características de los residuos (tamaño, peso, forma, distribución, ...) como de las características del separador (velocidad y ancho de la cinta, campo magnético generado, antigüedad, ...), por lo que, la eficiencia de recuperación del inductivo no será del 100%.

No obstante, dado que el funcionamiento básico del separador inductivo se basa en la fuerza de repulsión que produzca el campo magnético creado para impulsar y clasificar los residuos metálicos no magnéticos, crearemos la clasificación de nuestro programa en función de las características que poseemos de los residuos, es decir, tal y como hicimos para el trómel, nuestra clasificación se hará siguiendo una distribución lognormal en función del tamaño promedio de los residuos.

Simplemente, en vez de cargar en Matlab un vector con los tamaños promedio de todas las fracciones de residuos y otro con todas las desviaciones estándar, seleccionaremos únicamente las fracciones que interactuaran en el separador inductivo, es decir, “*Aluminium Cans*” y “*Other metals*”.

fractions	Initial_Mass_flow	size_ind1	size_STD_ind1
Food waste	43.120,0	0	0
Agricultural and green waste	17.500,0	0	0
Other organic residues	-	0	0
Paper	46.380,0	0	0
Cardboard	5.080,0	0	0
Glass	6.780,0	0	0
Ferrous metals	7.700,0	0	0
Aluminum Cans	2.260,0	90	20
Other ferrous items	-	0	0
Other metals	-	200	90
Bricks	-	0	0
PETE Containers	3.260,0	0	0
HDPE Containers	3.140,0	0	0
Miscellaneous Plastic items	7.020,0	0	0
Miscellaneous Film Products	19.760,0	0	0
Household Hazardous Waste	2.800,0	0	0
Special Waste	9.320,0	0	0
Textiles	12.720,0	0	0
Misc. Combustible	-	0	0
Fines	7.040,0	0	0
Misc. Non Combustible	6.120,0	0	0

Tabla 4. Tamaños promedio y desviaciones estándar utilizados para el separador inductivo.

Estos datos, tal y como hicimos para el trómel, los cargaremos en vectores de Matlab según el siguiente código y serán entradas de nuestro bloque:

```
% SEPARADOR INDUCTIVO 1
v_mu_ind = table2array(waste_matrix(:, 'size_ind1')); %vector con tamaño promedio
de las fracciones
v_sigma_ind = table2array(waste_matrix(:, 'size_STD_ind1')); %vector con
desviaciones estandar de las fracciones
```

Mientras que la programación del bloque constará de 4 entradas: el vector con las cantidades de entrada, el tamaño de malla en el cual se evaluará la distribución y los vectores con los tamaños promedio y desviaciones estándar de los residuos.

Las salidas serán dos vectores: uno con las cantidades de residuos no inductivos y otro con las cantidades de residuos inductivos. Además, también hemos creado una salida que muestra el porcentaje de residuos inductivos recuperados (*recovery*).

```
function [no_inductivos, inductivos, recovery] = sep_ind_lognormal(malla,
cantidades, mu, sigma)

    aluminium_cans = cantidades(8,:);
    other_metals = cantidades(10,:);

    % posiciones de aluminium cans y de other metals
    mu_ln_aluminiumcans = log((mu(8)^2)/sqrt(sigma(8)^2+mu(8)^2));
    sigma_ln_aluminiumcans = sqrt(log(sigma(8)^2/mu(8)^2+1));

    mu_ln_othermetals = log((mu(10)^2)/sqrt(sigma(10)^2+mu(10)^2));
    sigma_ln_othermetals = sqrt(log(sigma(10)^2/mu(10)^2+1));

    distr_lognorm_acum_aluminiumcans =
logncdf(malla,mu_ln_aluminiumcans,sigma_ln_aluminiumcans);
    distr_lognorm_acum_othermetals =
logncdf(malla,mu_ln_othermetals,sigma_ln_othermetals);

    aluminiumcans = cantidades(8).*distr_lognorm_acum_aluminiumcans;
    othermetals = cantidades(10).*distr_lognorm_acum_othermetals;

    inductivos = zeros([21 1]);

    inductivos(8,:) = aluminiumcans;
    inductivos(10,:) = othermetals;

    no_inductivos = cantidades - inductivos;

    purity_aluminiumcans = aluminiumcans/aluminium_cans*100;
    purity_othermetals = othermetals/other_metals*100;

    recovery = ([purity_aluminiumcans purity_othermetals])
```

A diferencia del programa utilizado para el trómel, en vez de hacer los cálculos con los vectores, hemos extraído los valores de las celdas correspondientes a los residuos que nos son de interés y hemos operado con ellos.

### **3.2.4.1 Resultados obtenidos**

Fruto de la simulación hemos obtenido una clasificación de los residuos inductivos basándonos en la clasificación según la repulsión de los objetos de tamaño inferior al tamaño establecido para hacer la criba, hemos obtenido los siguientes resultados:

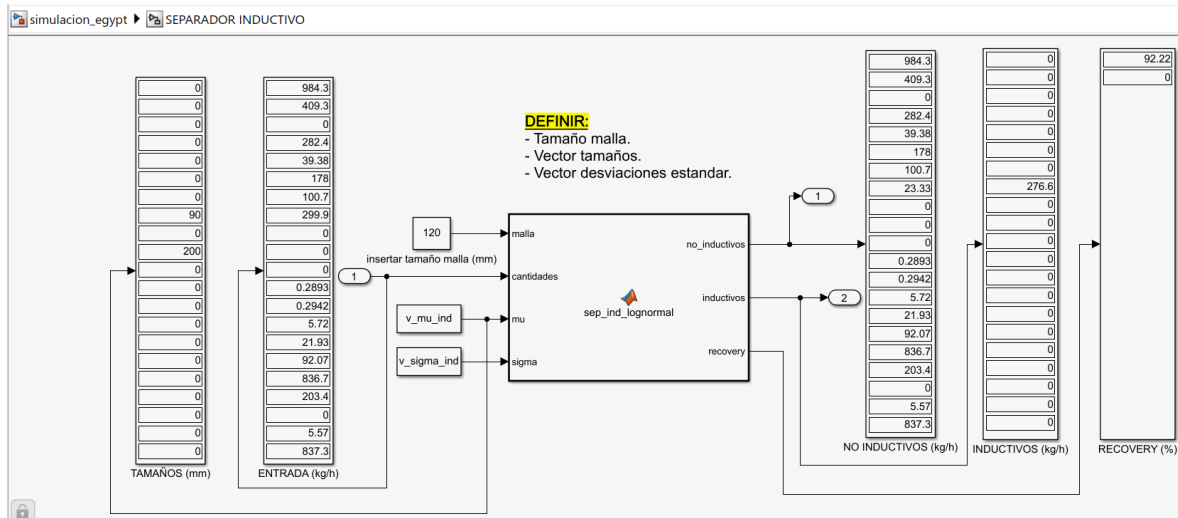


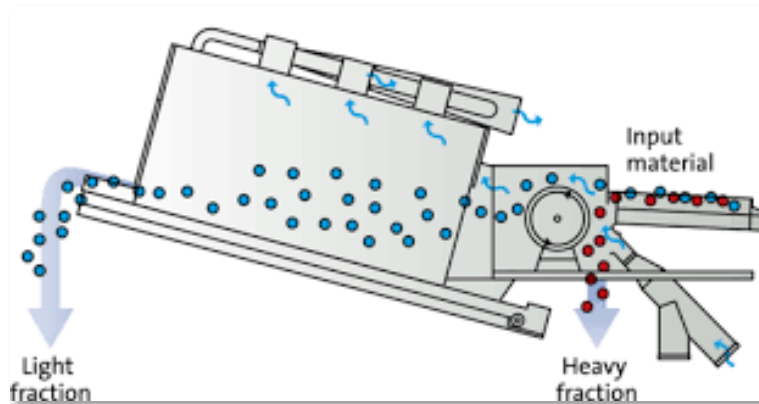
Figura 37. Resultados de la simulación del separador inductivo.

Según la clasificación, de los 299,9 kg/h de residuos de “Aluminum cans” que teníamos a la entrada con un tamaño promedio de 90 mm, analizando la distribución para un mallado de 120 mm, recuperaríamos 276,6 kg/h de residuos inductivos, es decir, nuestro separador magnético cumpliría con un rendimiento del 92,22%.

Hemos basado nuestra clasificación en el tamaño de los residuos, no obstante, a efectos prácticos sería más significativo basar nuestra función en la densidad de los mismos. De momento, dado que no contamos con ese dato, hemos supuesto que residuos con tamaño superior a los 12 cm, no serían impulsados suficientemente para hacer la criba, lo cual aunque no afina del todo, se acerca a la realidad.

### 3.2.5 SEPARADOR FILM O POR AIRE

El separador film hace un filtrado de los residuos más livianos que pueden ser arrastrados por una corriente de aire.



*Figura 38. Separador film [FILM].*

La eficiencia de clasificación de estos equipos, por lo general suele ser muy baja y no sigue otro criterio que el residuo que es soplado en el momento que pasa a través de la corriente de aire del separador tenga la densidad para ser arrastrado por la fuerza del aire.

Nuestro programa es muy simple, el usuario no ha de configurar ningún parámetro del bloque dado que nosotros ya hemos definido el porcentaje de cada fracción basándonos en los resultados de contaminación a la salida de estos separadores mostrados en diferentes artículos de investigación.

De tal forma, de acuerdo con el artículo “*Handbook for sorting of plastic packaging waste concentrates*” [THOD15] publicado por el instituto de Wageningen, en Países Bajos, el porcentaje a la salida del separador por aire de cada fracción es entorno al 10% para los residuos PET y las botellas, 20% para los residuos PVC y alrededor del 40% para los residuos film.

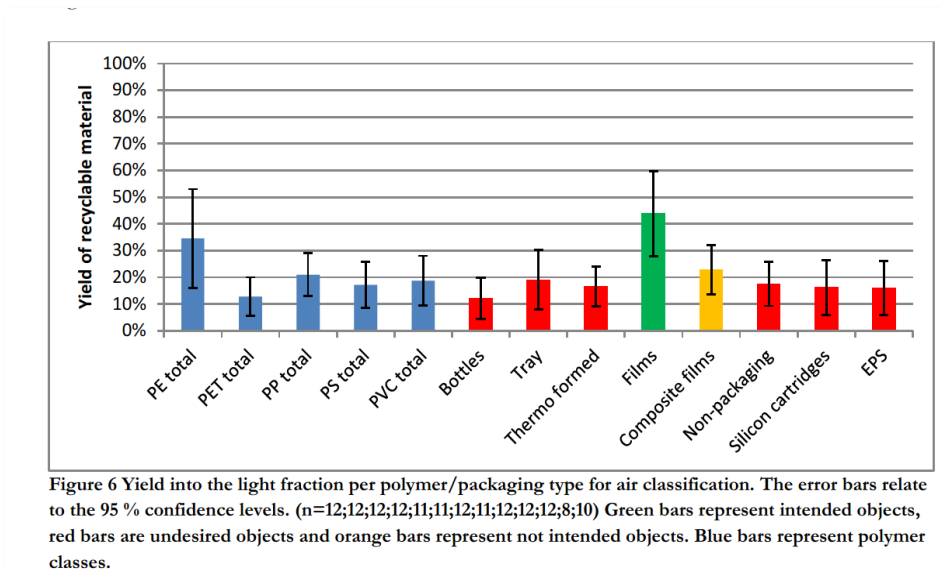


Figura 39. Extracto del artículo “Handbook for sorting of plastic packaging waste concentrates” [THOD15].

Para nuestro programa, nos hemos guiado por los valores mostrados en la Figura 39 para definir un porcentaje de recuperación a cada fracción, según los cuales hemos decidido:

Fraction	Recovery (%)
Paper	45%
Cardboard	20%
Bricks	10%
PETE Containers	10%
HDPE Containers	5%
Miscellaneous Plastic ítems	10%
Textiles	5%
Fines	30%

Tabla 5. Porcentajes de recuperación establecidos para el separador film.

Siendo así, nuestro bloque únicamente cuenta con una entrada, el vector con las cantidades de cada fracción, y dos salidas, la de los residuos previamente listados separados y el resto.

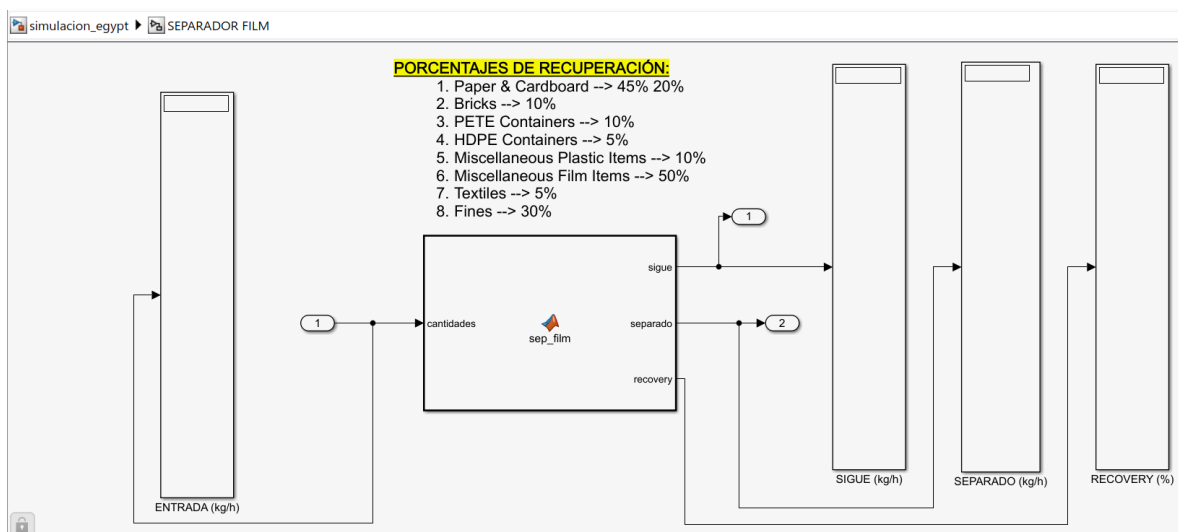
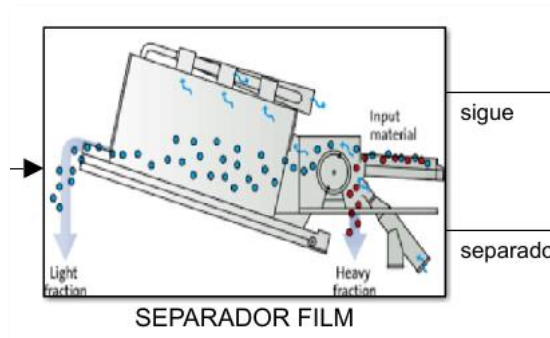


Figura 40. Entradas y salidas bloque Simulink separador por aire.

Internamente, el programa únicamente aplica los porcentajes de recuperación que hemos definido tras nuestro estudio a cada fracción y muestra las salidas.

### 3.2.5.1 Resultados obtenidos

Con los porcentajes definidos, tal y como vemos a continuación, los residuos separados son de fracciones distintas por lo que los residuos separados por el separador film serán residuos reciclables.



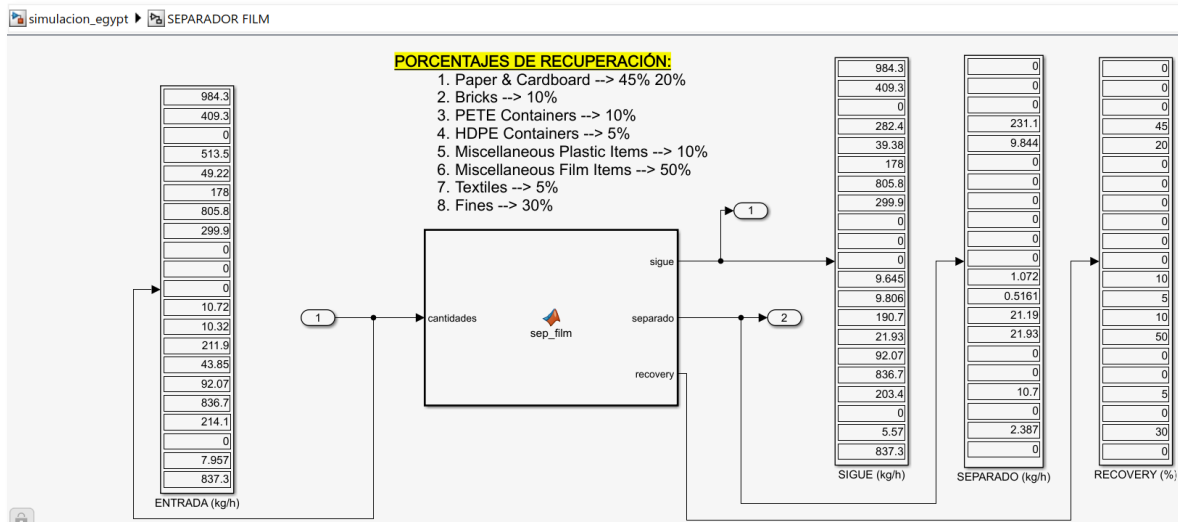


Figura 41. Resultados de la simulación del separador film.

Además, dado que las cantidades de los residuos separados no son cantidades demasiado significativas, todos los residuos clasificados serán directamente enviados a la línea de residuos reciclables de la planta, en vez de continuar siendo clasificados.

### 3.2.6 SEPARADOR ÓPTICO

El separador óptico clasifica los residuos en función de la longitud de onda que el usuario defina como filtro para clasificar los residuos que necesite.

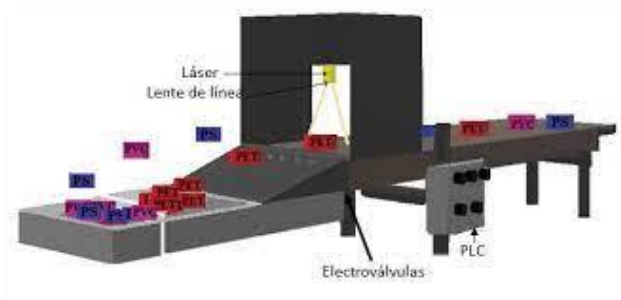


Figura 42. Separador óptico [OPTI].

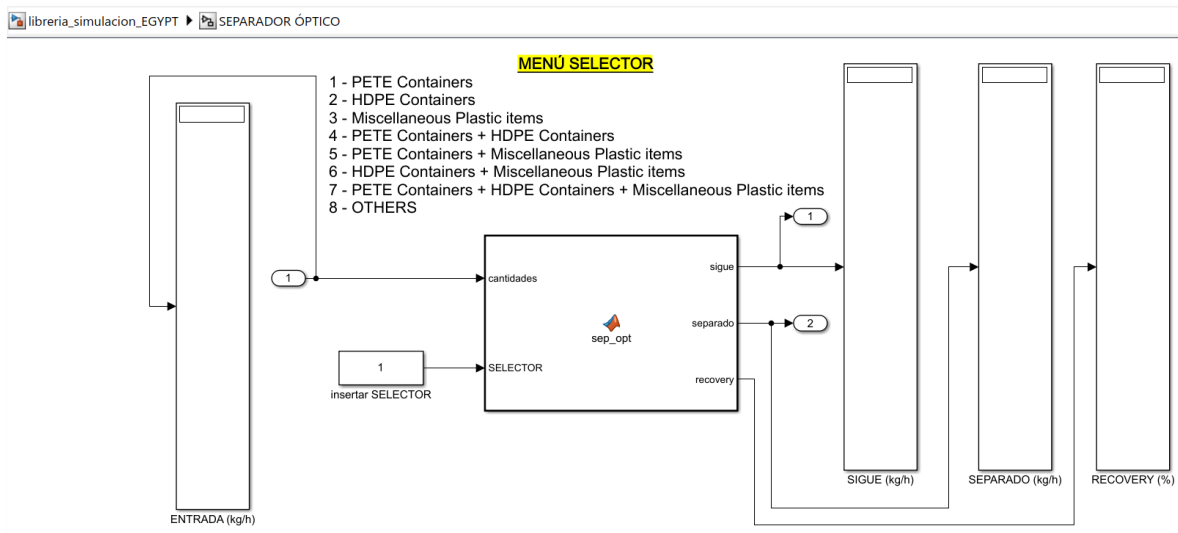
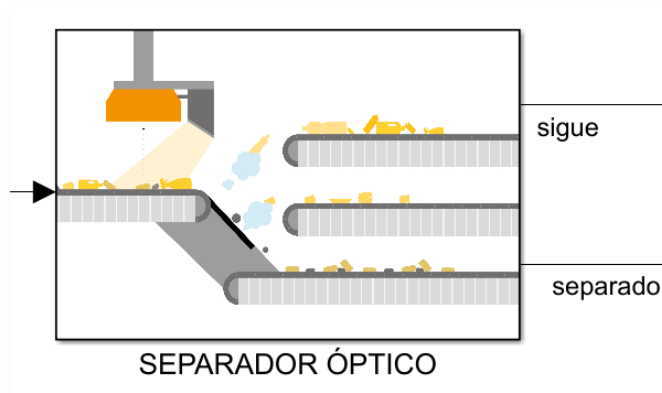
De tal forma, a fin de replicar el criterio de selección del separador óptico nuestro programa contará con un selector según el cual el usuario podrá definir que fracción de residuos quiere separar.

Una vez más, basándonos en los resultados obtenidos en el estudio llevado a cabo en el artículo de investigación “*Assessment of Performance and Challenges in Use of Commercial Automated Sorting Technology for Plastic Waste*” [LUBO22] dirigido por investigadores de la Universidad de Buffalo, en el estado americano de Nueva York, hemos decidido la eficiencia de recuperación para cada fracción, según el cual:

<b>Fraction</b>	<b>Recovery (%)</b>
PETE Containers	99%
HDPE Containers	99%
Miscellaneous Plastic ítems	93%
PETE Containers + HDPE Containers	95%
PETE Containers + Miscellaneous Plastic Items	99%
HDPE Containers + Miscellaneous Plastic Items	90%
PETE Containers + HDPE Containers + Miscellaneous Plastic Items	97%
Others	95%

*Tabla 6. Porcentajes de recuperación para cada fracción para el separador óptico.*

De tal forma, al insertar el separador óptico en la configuración de una simulación, en función de la fracción de residuo que el usuario necesite clasificar insertará el selector correspondiente y nuestro programa aplicará el porcentaje de eficiencia definido.



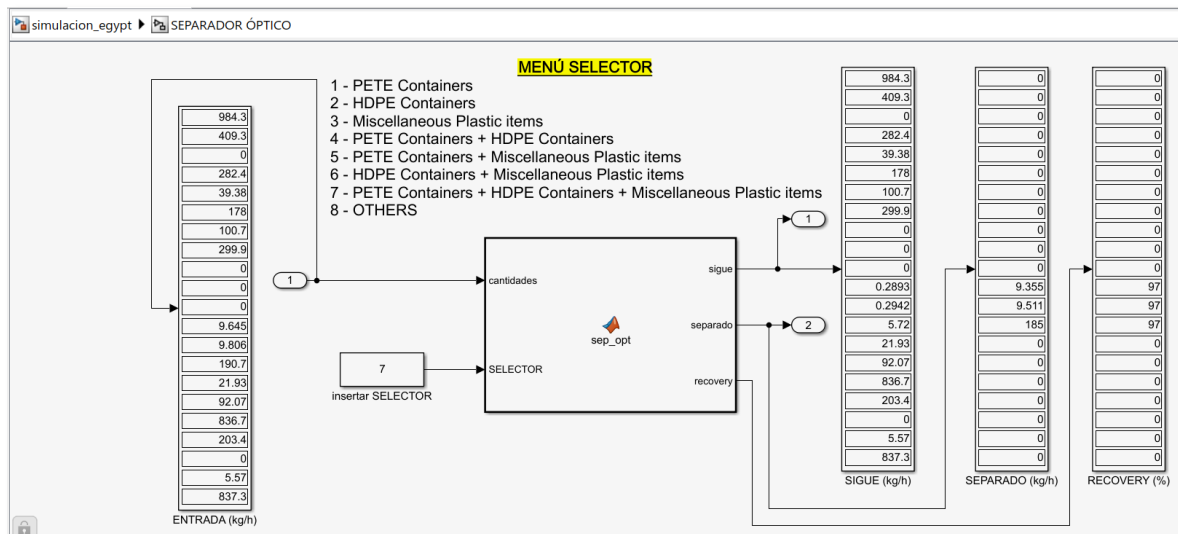
*Figura 43. Entradas y salidas Simulink separador óptico.*

Tal y como vemos en la imagen, la función del separador óptico tiene dos entradas: el vector con las cantidades iniciales y el indicador de fracción que el usuario tendrá que introducir a mano en función de los residuos quiera separar y dos salidas y un display para mostrar los porcentajes aplicados.

### 3.2.6.1 Resultados obtenidos

Una vez el usuario ha configurado el selector del bloque en función de la fracción que necesita separar, el programa que hemos definido hará la multiplicación del vector de cantidades por el vector con los porcentajes de recuperación definidos.

Si el usuario necesita modificar los porcentajes de recuperación de alguna fracción, debería acceder al Simulink que contiene los bloques de la biblioteca y modificar el código del bloque del separador óptico.



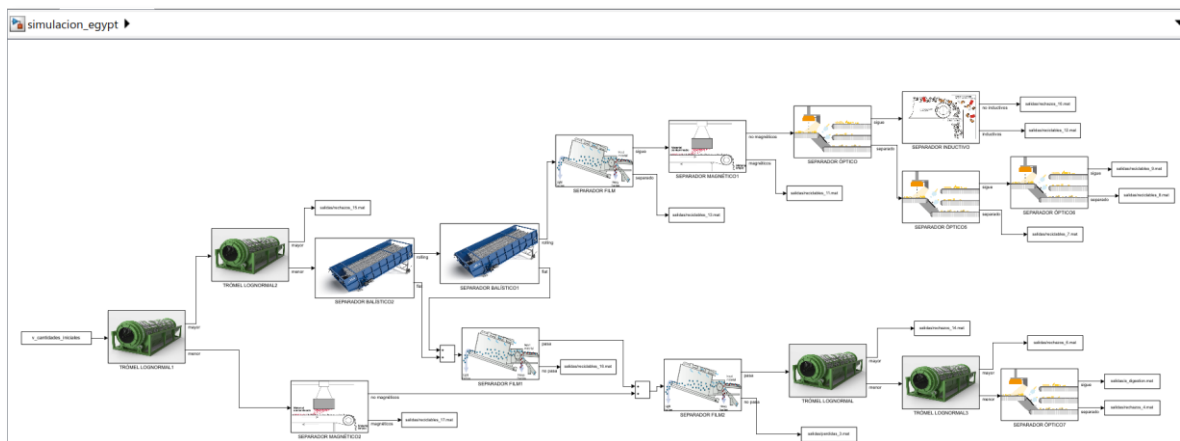
**Figura 44. Resultados de la simulación del separador óptico.**

Según vemos en la imagen, al introducir un 7 en la casilla del selector hacemos un filtrado de los residuos PETE, HDPE y de otros misceláneos de plástico. Según las eficiencias mostradas en el artículo mencionado, los separadores ópticos que separan estos residuos tienen una eficiencia del 97%, por lo que de acuerdo con el artículo hemos hecho una clasificación de estos residuos del 97%.

## Capítulo 4. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### RESULTADOS

Una vez definido el bloque análogo de cada elemento que podría formar una etapa de una planta de clasificación de residuos, hemos llevado a cabo una configuración en Simulink, utilizando nuestros bloques, de un proyecto de construcción de una planta en Egipto a cargo de la empresa ACCIONA INDUSTRIAL, S.L.



**Figura 45. Proyecto para Egipto de planta de clasificación de residuos.**

Tal y como podemos ver en la Figura 45, el modelo de planta de clasificación de residuos a partir del cual analizaremos nuestros resultados consta de 2 trómeles a la entrada para hacer una primera clasificación de residuos más gruesos y residuos más finos.

Avanzando por la línea de gruesos, nos encontramos con dos separadores balísticos, el primero con mayor inclinación para conseguir mayor pureza en la línea de no rodantes y el segundo, a la salida de los rodantes, con menor inclinación para conseguir mejorar la pureza de los rodantes.

De la clasificación de los separadores balísticos, los residuos no rodantes pasan por un filtro por aire para clasificar los residuos más ligeros como residuos reciclables, mientras que los más densos se juntan con los residuos de la línea de finos.

Los residuos rodantes también pasan por un filtro por aire para separar como reciclables los residuos más livianos mientras que el resto atraviesa un filtrado magnético, un inductivo y varios ópticos.

Por otra parte, la línea de finos que obteníamos tras el primer trómel pasa por un separador magnético una corriente de aire, 2 trómeles con mallado más pequeño y un separador óptico.

De todo ello obtenemos:

- un vector con la cantidad de cada fracción que ira a un proceso a digestión, que serán los residuos orgánicos,
- un vector con la cantidad de residuos que son reciclables, entre los cuales habrá papel, residuos magnéticos, no férricos y plásticos varios,
- otro vector con los residuos considerados rechazos por no haber sido clasificados correctamente ya sea por la naturaleza, por el tamaño o por la densidad del residuo y
- otro con residuos considerados pérdidas por ser residuos que no superan alguna de las etapas del tratamiento.

Los resultados los mostramos a continuación en un gráfico de barras apiladas:

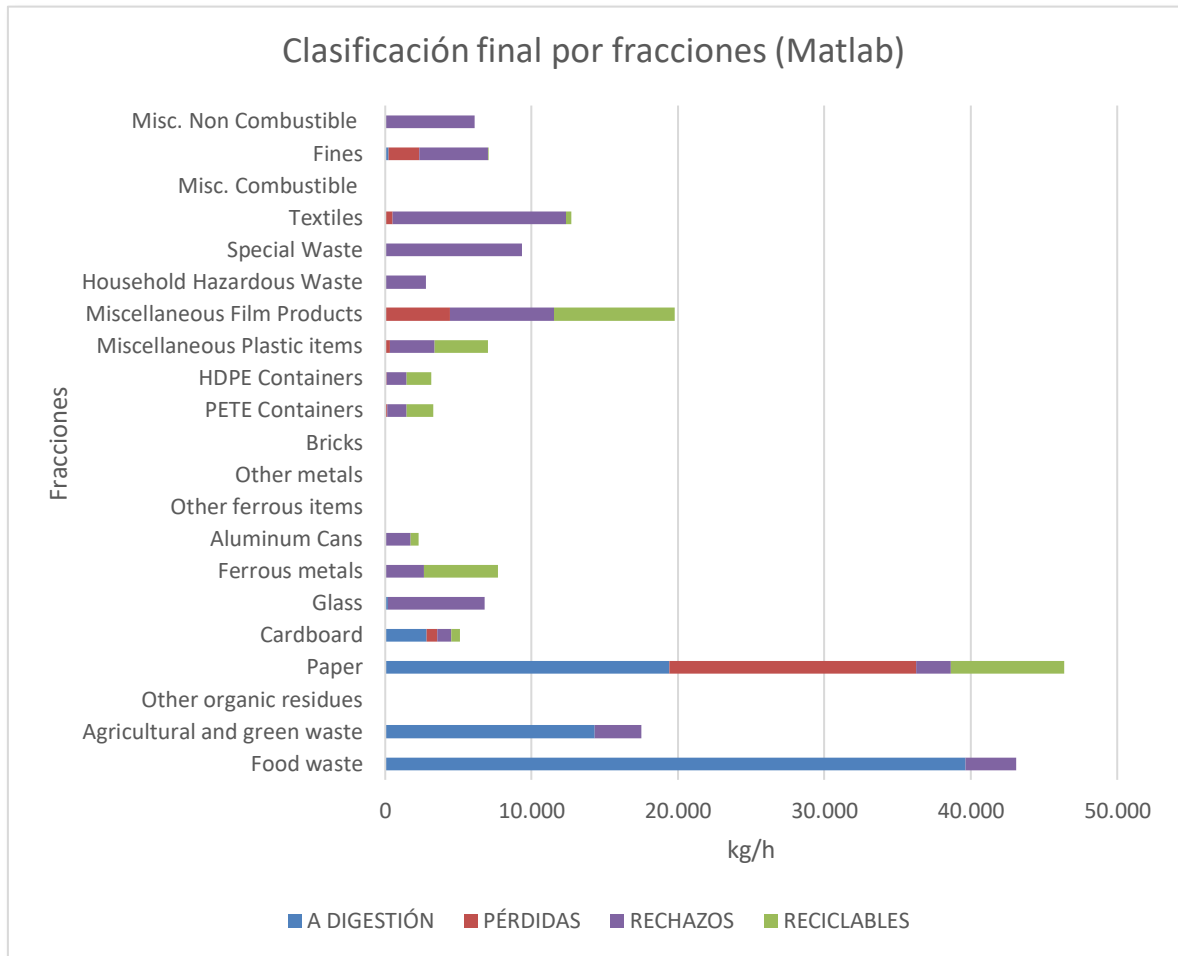


Figura 46. Clasificación final de los residuos en Matlab.

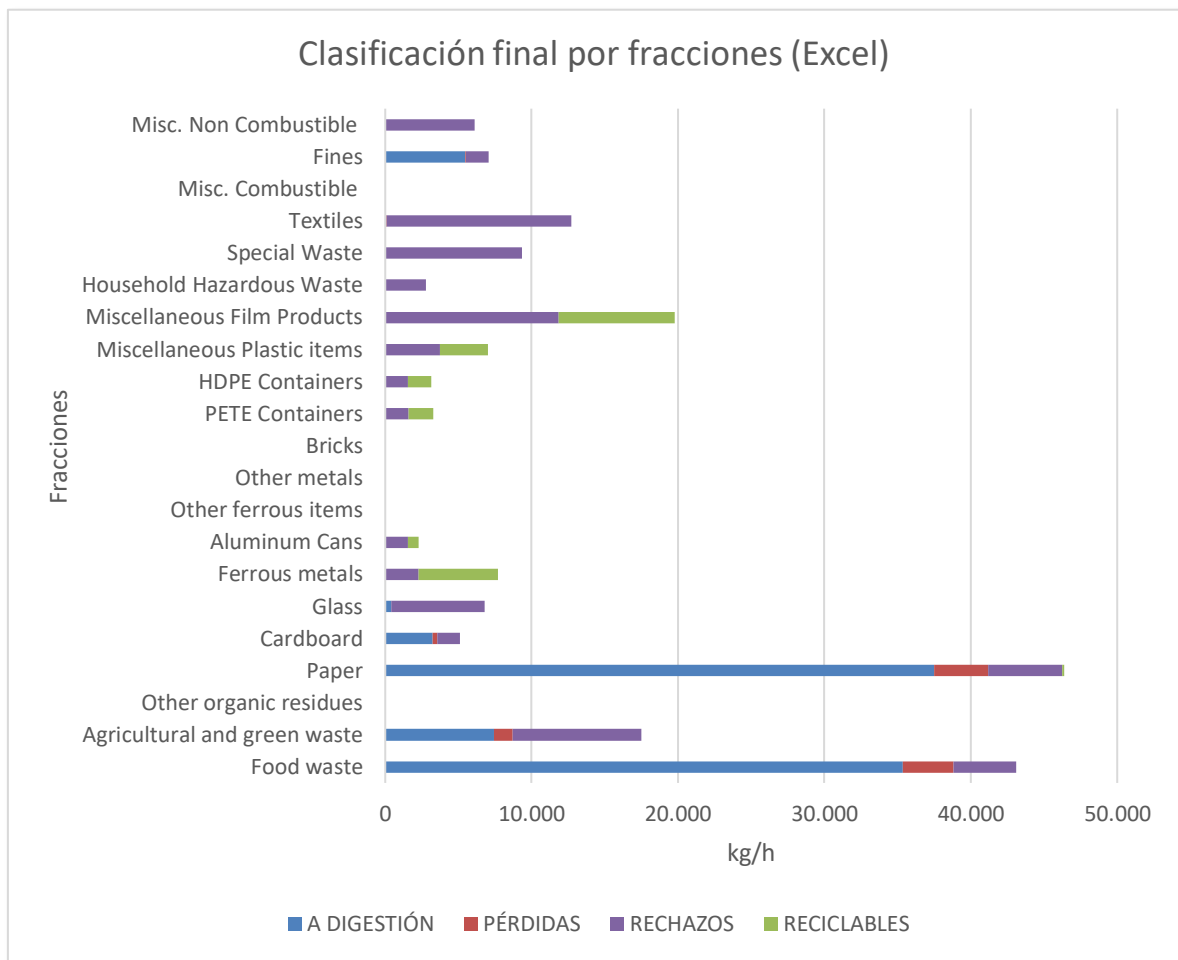
Tal y como esperábamos, la mayoría de los residuos orgánicos, es decir, las fracciones “*Food Waste*”, “*Agricultural and green waste*” y “*Paper*” irán a digestión por ser residuos que pueden ser tratados y transformados en fertilizantes y en biogás. El resto de estas fracciones ha resultado en rechazos por no ser bien clasificados o para el caso de los papeles en pérdidas por ser poco densos para mayor clasificación, esto lo sabemos dado que únicamente hay una salida de rechazos por la línea de finos tras el separador por aire.

Además de los residuos orgánicos, la otra gran clasificación es la de reciclables, en ella encontraríamos restos de papeles, materiales magnéticos, alguna lata de aluminio, algunos plásticos PETE y HDPE y otro misceláneos del film.

El resto de las fracciones, son separador como rechazos, dado que como hemos comentado, ya sea por su tamaño, su densidad o su naturaleza no han sido clasificados correctamente.

#### 4.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

Hemos obtenido los resultados de la simulación con el Excel facilitado por ACCIONA a fin de llevar a cabo un análisis de las mejoras realizadas en nuestro proyecto.



**Figura 47. Clasificación final de los residuos en Excel.**

Analizando los resultados obtenidos con ambas simulaciones, observamos que para Matlab la fracción de residuos clasificados como pérdidas aumenta, el motivo es que todos los



residuos que avanzan por la línea de finos y que además son sopladados por el separador por aire son clasificados como perdidas por ser demasiado livianos.

Por otra parte, en Matlab obtenemos mayor fracción de residuos reciclables de la fracción de papeles lo cual sería más acertado que únicamente clasificarlos como aptos para digestión, pérdidas o rechazos.

Por último, con Matlab hemos eliminado toda la fracción de residuos finos que había sido clasificada como apto para digestión siendo clasificada en Matlab como rechazos o como perdidas, dado que por su naturaleza de residuos finos son poco densos para poder ser tratados posteriormente.

## ***4.2 USO Y CONFIGURACIÓN DEL PROYECTO PARA FUTURAS SIMULACIONES***

de cara a dar un uso a la biblioteca de bloques creada, explicamos brevemente cuales serían los pasos a seguir:

1. Crear una carpeta de trabajo y copiar los ficheros slblocks.m, librería\_simulacion.slx y entradas\_salidas.slx
2. Crear una tabla de Excel en la carpeta de trabajo en la cual se definan los tamaños promedio, las desviaciones estándar y el porcentaje de rodantes y de no rodantes de cada fracción de residuos.
3. Crear un script en Matlab para cargar cada columna de la tabla como vector en Matlab y compilar el script.
4. Abrir y compilar el scrip slblocks.m
5. Abrir Simulink desde el Command Window de Matlab.
6. En Simulink, abrir la “Library browser” y hacer F5 para refrescar la biblioteca y poder utilizar la biblioteca creada.
7. Configurar la planta de clasificación de residuos deseada, modificar los parámetros necesarios de cada bloque y compilar.

## **Capítulo 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

Gracias a este proyecto se ha desarrollado un sistema práctico, eficiente, cómodo, dinámico y funcional para llevar a cabo la fase previa de estudio y análisis de la construcción de una planta de clasificación de residuos.

Este proyecto partía de un modelo creado en Excel el cual partiendo de los mismos datos: cantidades iniciales, tamaños promedio, desviaciones estándar, porcentajes de recuperación y eficiencia de los separadores, mallados y demás datos de configuración de los elementos y de los residuos, obtiene las mismas 4 clasificaciones que hemos mostrado con nuestro modelo en Matlab: reciclables, a digestión, rechazos y pérdidas.

Con nuestro modelo, además de aportar sencillez a un sistema complejo hemos conseguido reducir el tiempo de configuración de la simulación, así como de comprensión y de lectura de los datos mostrados.

El modelo es sencillo y práctico para el usuario, sin embargo, para lograr el objetivo alcanzado hemos dedicado muchas horas a la investigación a fin de afinar al máximo el comportamiento de cada bloque en nuestro modelo y buscar resultados coherentes basados en estudios científicos.

Además de la investigación para lograr los resultados más exactos en la simulación, también han sido muchas horas dedicadas a la propia herramienta utilizada, Matlab, a fin de encontrar los bloques de Simulink y las funciones de Matlab que se adaptasen a la complejidad del sistema, siendo a su vez sencillo para el usuario final.

No obstante, de cara a futuros proyectos, a pesar de que nuestro modelo cumple con los requisitos para hacer una buena clasificación quedaría perfeccionar el comportamiento de cada bloque. En algunos de los bloques, por ejemplo, en el separador balístico, nuestro

programa calculaba la eficiencia del separador en función de la inclinación del mismo. El trómel es un elemento que también cuenta con una ligera inclinación, quizás podría ser un dato influyente en la clasificación.

En uno de los artículos leídos para la optimización del separador magnético también descubrimos que, dado que existen en el mercado diferentes separadores magnéticos, las características de cada uno también influyen. Por ejemplo, si se trata de un separador con un rodillo magnético dentro de la cinta transportadora, el grosor de la cinta influirá en la intensidad del campo magnético creado y por lo tanto la clasificación no será la misma que para un grosor de cinta más pequeño.

## Capítulo 6. BIBLIOGRAFÍA

- [TANG20] Tanguay-Rioux, F., R. Legros y L. Spreutels, “Particle size analysis of municipal solid waste for treatment process modeling”, Waste Management & Research XX(X), pp. 1-9, 2020.
- [SIGM18] Sigmund, U., “Sorting with ballistic separators”, 4th International Symposium On Enhanced Landfill Mining, pp. 89-94, Bélgica, febrero 2018.
- [MOLL20] Mollnitz, S., B. Kupper, A. Curtis, K. Khodier, R. Sarc, “Influence of pre-screening on down-stream processing for the production of plastic enriched fractions for the recycling from mixed comercial and municipal waste”, Waste Management 119, pp. 365-373, octubre 2020.
- [THOD15] Thoden van Velzen, U., M. Jansen, T. Pretz, “Handbook for sorting of plastic packaging waste concentrates”, Wageningen UR Food & Biobased Research, Wageningen, Alemania, octubre 2015.
- [BARK22] Barkanyi, A., A. Egedy, A. Sarkady, R. Kurdi, J. Abonyi, “Expert-based Modular Simulator for Municipal Waste Processing Technology Design”, Sustainability 2022, 14, 16403, pp. 1-14, diciembre 2022.
- [MOHA22] Mohanraj, G.T., S. Joladarashi, H. Hanumanthappa, B. K. Shanmugam, H. Vardhan, G. J. Naik, P. D. Bhat, M. R. Rahman, “Numerical approach for optimization of magnetic roller and evaluating the performance of permanente magnet roller separator through design of experiment”, Alexandria Engineering Journal 61, pp 13011-13033, 2022.
- [ANTO21] Antonopoulos, I., G. Faraca, D. Tonini, “Recycling of post-consumer plastic packaging waste in the EU: Recovery rates, material flows and barriers”, Waste Management 126, pp 694-705, 2021.

- [LUBO22] Lubongo, C., P. Alexandridis, “Assesment of Performance and Challenges in Use of Commercial Automated Sorting Technology for Plastic Waste”, *Recycling* 2022, 7, 11, pp 1-26, febrero 2022.
- [TROM] NUBA. “Trómeles clasificadores de goma” en <https://www.nubasm.com/producto-cribado-clasificacion-aridos/mallas-de-goma/tromeles-clasificadores-de-goma/> [Última consulta 13/06/2023]
- [BALI] EGGERSMANN. “Separador balístico BRT HARTNER BS” en <https://www.eggerrmann-recyclingtechnology.com/es/maquinas-de-reciclaje/sistemas-de-apertura-dosificacion-y-separacion-de-brt-hartner/productos/separador-balistico-brt-hartner-bs/> [Última consulta 13/06/2023]
- [MAGN] SOLLAU. “Transportador magnético MD” en <https://www.sollau.es/transportador-magnetico-md> [Última consulta 13/06/2023]
- [INDU] INTEREMPRESAS. “Separador de inducción excéntrico” en [https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos\\_y\\_documentos/2684/SEPARADOR-DE-INDUCCION-EXCENTRICO-v-04.pdf](https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/2684/SEPARADOR-DE-INDUCCION-EXCENTRICO-v-04.pdf) [Última consulta 13/06/2023]
- [FILM] NIHOT. “SDS windshifter” en <https://nihot.nl/products/sds-windshifter/> [Última consulta 13/06/2023]
- [OPTI] GRUP GBI. “Separador optic” en <https://www.grup-gbi.com/ctrm/visita-virtual/separador-optic/> [Última consulta 13/06/2023]
- [DNOR] ECONOMIPEDIA. “Distribución normal” en <https://economipedia.com/definiciones/distribucion-normal.html> [Última consulta 13/06/2023]

- [DLOG] WALLSTREETMOJO. “Log Normal Distribution” en <https://www.wallstreetmojo.com/log-normal-distribution/> [Última consulta 13/06/2023]
- [DROS] RESEARCHGATE. “Probability density function by Rosin-Rammler” en [https://www.researchgate.net/figure/Probability-density-function-by-Rosin-rammler-equation-127-with-parameters-X-100\\_fig6\\_221664861](https://www.researchgate.net/figure/Probability-density-function-by-Rosin-rammler-equation-127-with-parameters-X-100_fig6_221664861) [Última consulta 13/06/2023]

## ANEXO I – CÓDIGOS FUENTE MATLAB

### ➤ CARGA DE PARAMETROS EN MATLAB

```
clc
clear all

%% CARGA DE PARAMETROS DE BASURA %%

waste_matrix = readtable('waste_definition_EGYPT.xlsx');

% leo el listado de residuos y las cantidades de entrada
v_fracciones = table2array(waste_matrix(:, 'fractions'));
v_cantidades_iniciales = table2array(waste_matrix(:, 'Initial_Mass_flow'));
%vector con cantidades iniciales de basura

% TROMEL 1
v_mu_t1 = table2array(waste_matrix(:, 'size_tromel1')); %vector con tamaño medio
de las basuras
v_sigma_t1 = table2array(waste_matrix(:, 'size_STD_tromel1')); %vector con
desviacion tipica de las basuras

% TROMEL 2
v_mu_t2 = table2array(waste_matrix(:, 'size_tromel2')); %vector con tamaño medio
de las basuras
v_sigma_t2 = table2array(waste_matrix(:, 'size_STD_tromel2')); %vector con
desviacion tipica de las basuras

% BALISTIC 1
v_rolling_b1 = table2array(waste_matrix(:, 'per_3D_ballistic1'));
v_flat_b1 = table2array(waste_matrix(:, 'per_2D_ballistic1'));

% SEPARADOR INDUCTIVO 1
v_mu_ind = table2array(waste_matrix(:, 'size_ind1')); %vector con tamaño promedio
de las fracciones
v_sigma_ind = table2array(waste_matrix(:, 'size_STD_ind1')); %vector con
desviaciones estandar de las fracciones
```

### ➤ CÓDIGO FUENTE TRÓMEL

```
function [mayor, menor] = distr_lognorm(malla, cantidades, mu, sigma)

mu_ln = mu;
sigma_ln = sigma;

for i = 1:1:21
```

```
mu_ln(i) = log((mu(i)^2)/sqrt(sigma(i)^2+mu(i)^2));
sigma_ln(i) = sqrt(log(sigma(i)^2/mu(i)^2+1));
end

distr_lognorm_acum = logncdf(malla,mu_ln,sigma_ln);

menor = cantidades.*distr_lognorm_acum;
mayor = cantidades - menor;
```

➤ **Código fuente separador balístico**

```
function [rolling, flat, purity_3D, purity_2D] = ballistic(cantidades,
inclinacion, per_rolling, per_flat)

% teniendo en cuenta que la inclinacion estará entre 5 y 25 grados y que el
% porcentaje de yield_3D será como máximo 93% y el de yield_2D 87% y el
% mínimo de ambos 85%

per_yield_3D = (85 + 0.4*(inclinacion-5))/100;
per_yield_2D = (87 - 0.1*(inclinacion-5))/100;

rolling = cantidades.*per_rolling.*per_yield_3D + cantidades.*per_flat.*(1-
per_yield_2D);
purity_3D = ((cantidades.*per_rolling.*per_yield_3D)./rolling)*100;

a = isnan(purity_3D);

for i = 1:length(purity_3D)
    if a(i) == 1
        purity_3D(i) = 0;
    end
end

flat = cantidades.*per_flat.*per_yield_2D + cantidades.*per_rolling.*(1-
per_yield_3D);
purity_2D = ((cantidades.*per_flat.*per_yield_2D)./flat)*100;

b = isnan(purity_2D);

for i = 1:length(purity_2D)
    if b(i) == 1
        purity_2D(i) = 0;
    end
end
```

➤ **Código fuente separador magnético**

```
function [no_magneticos, magneticos, recovery] = sep_mag(cantidades)

per_recovery = zeros([21 1]);
```



```
per_recovery(7,:) = 0.875; % Ferrous metals
per_recovery(9,:) = 0.83; % Other ferrous items

magneticos = cantidades.*per_recovery;
no_magneticos = cantidades - magneticos;

recovery = magneticos./cantidades*100;

a = isnan(recovery);

for i = 1:length(recovery)
    if a(i) == 1
        recovery(i) = 0;
    end
end
```

➤ **Código fuente separador inductivo o de corrientes de Foucault**

```
function [no_inductivos, inductivos, recovery] = sep_ind_lognormal(malla,
cantidades, mu, sigma)

    mu_ln = mu;
    sigma_ln = sigma;
    aluminium_cans = cantidades(8,:);
    other_metals = cantidades(10,:);

    % posiciones de aluminium cans y de other metals
    mu_ln_aluminiumcans = log((mu(8)^2)/sqrt(sigma(8)^2+mu(8)^2));
    sigma_ln_aluminiumcans = sqrt(log(sigma(8)^2/mu(8)^2+1));

    mu_ln_othermetals = log((mu(10)^2)/sqrt(sigma(10)^2+mu(10)^2));
    sigma_ln_othermetals = sqrt(log(sigma(10)^2/mu(10)^2+1));

    distr_lognorm_acum_aluminiumcans =
logncdf(malla,mu_ln_aluminiumcans,sigma_ln_aluminiumcans);
    distr_lognorm_acum_othermetals =
logncdf(malla,mu_ln_othermetals,sigma_ln_othermetals);

    aluminiumcans = cantidades(8).*distr_lognorm_acum_aluminiumcans;
    othermetals = cantidades(10).*distr_lognorm_acum_othermetals;

    inductivos = zeros([21 1]);

    inductivos(8,:) = aluminiumcans;
    inductivos(10,:) = othermetals;

    no_inductivos = cantidades - inductivos;

    purity_aluminiumcans = aluminiumcans/aluminium_cans*100;
    purity_othermetals = othermetals/other_metals*100;
```

```
recovery = ([purity_aluminiumcans purity_othermetals])

a = isnan(recovery);

for i = 1:length(recovery)
    if a(i) == 1
        recovery(i) = 0;
    end
end
```

➤ **Código fuente separador film o por aire**

```
function [sigue, separado, recovery] = sep_film(cantidades)

per_recovery = zeros([21 1]);

% Paper & Cardboard
    per_recovery(4,:) = 0.45;
    per_recovery(5,:) = 0.20;

% BRICKS
    per_recovery(11,:) = 0.10;

% PETE Containers
    per_recovery(12,:) = 0.10;

% HDPE Containers
    per_recovery(13,:) = 0.05;

% Miscellaneous Plastic Items
    per_recovery(14,:) = 0.10;

% Miscellaneous Film Items
    per_recovery(15,:) = 0.50;

% Textiles
    per_recovery(18,:) = 0.05;

% Fines
    per_recovery(20,:) = 0.30;

separado = cantidades.*per_recovery;
sigue = cantidades - separado;

recovery = separado./cantidades*100;

a = isnan(recovery);

for i = 1:length(recovery)
    if a(i) == 1
```

```
        recovery(i) = 0;  
    end  
end
```

➤ **Código fuente separador óptico**

```
function [sigue, separado, recovery] = sep_opt(cantidades, SELECTOR)  
  
per_recovery = zeros([21 1]);  
  
if SELECTOR == 1 % PETE Containers  
    per_recovery(12,:) = 0.99;  
  
elseif SELECTOR == 2 % HDPE Containers  
    per_recovery(13,:) = 0.99;  
  
elseif SELECTOR == 3 % Miscellaneous Pastic Items  
    per_recovery(14,:) = 0.93;  
  
elseif SELECTOR == 4 % PETE Containers + HDPE Containers  
    per_recovery(12:13,:) = 0.95;  
  
elseif SELECTOR == 5 % PETE Containers + Miscellaneous Pastic Items  
    per_recovery(12,:) = 0.99;  
    per_recovery(14,:) = 0.99;  
  
elseif SELECTOR == 6 % HDPE Containers + Miscellaneous Pastic Items  
    per_recovery(13:14,:) = 0.90;  
  
elseif SELECTOR == 7 % PETE Containers + HDPE Containers + Miscellaneous Pastic  
Items  
    per_recovery(12:14,:) = 0.97;  
  
elseif SELECTOR == 8 % OTHERS  
    per_recovery(6:21,:) = 0.95;  
  
end  
  
separado = cantidades.*per_recovery;  
sigue = cantidades - separado;  
  
recovery = separado./cantidades*100;  
  
a = isnan(recovery);  
  
for i = 1:length(recovery)  
    if a(i) == 1  
        recovery(i) = 0;  
    end  
end
```

```
end
```

