

RETO EELISA



GRUPO 3

Raquel Salgueiro Monforte

Andrea Serrano Fernández

Gonzalo Vildósola Díaz-Agero

Escuela Técnica de Ingeniería aeronáutica y del espacio
Master Universitario en Sistemas de Transporte Aéreo

Índice

1. Identificación de la propuesta de innovación y definición de objetivos medibles	2
1.1. Necesidad o problema detectado en AeroElite	2
1.2. Proceso empresarial en el que aparece el problema	3
1.3. Propuesta de innovación	4
1.4. Papel de la inteligencia artificial	5
1.5. Alcance inicial de la propuesta	6
1.6. Objetivos medibles de la propuesta	7
1.7. Desarrollo detallado de los objetivos	8
2. Identificación y asignación de recursos y herramientas	12
2.1. Recursos humanos	12
2.2. Recursos materiales	12
2.3. Recursos tecnológicos	13
2.4. Recursos financieros	13
2.5. Resumen de recursos	14
2.6. Integración con el sistema existente	15
3. Plan de implementación	16
3.1. Cronología de la implementación	17
3.2. Seguimiento del proyecto	17
4. Análisis de riesgo	19

1. Identificación de la propuesta de innovación y definición de objetivos medibles

1.1. Necesidad o problema detectado en AeroElite

AeroElite desarrolla actividades de mantenimiento de motores de aviación ejecutiva en las que se genera una cantidad significativa de residuos técnicos y residuos peligrosos. Estos residuos proceden principalmente de operaciones de desmontaje, limpieza, sustitución de componentes, ensayos, validación, embalaje y logística técnica. Entre ellos se encuentran aceites usados, fluidos residuales, disolventes, absorbentes contaminados, envases contaminados, residuos metálicos, plásticos, cartón y fracción no recuperable. Esta diversidad hace que la gestión de residuos sea especialmente compleja, ya que no todos los residuos tienen la misma peligrosidad, el mismo destino ni el mismo tratamiento final.

El problema concreto identificado es que la gestión actual o convencional de estos residuos puede presentar tres dificultades principales: errores de segregación, falta de trazabilidad detallada y pérdida de materiales potencialmente valorizables. Cuando los residuos se mezclan o no se identifican correctamente, parte de los materiales reciclables o recuperables, como metales o envases limpios, puede acabar mezclada con la fracción peligrosa o con el rechazo. Esto reduce la eficiencia ambiental del proceso, incrementa los costes de gestión y dificulta el cumplimiento de los objetivos de sostenibilidad y de control ambiental.

Además, si el proceso no genera datos suficientes, la empresa tiene más dificultades para saber qué áreas producen más residuos, qué tipologías predominan, qué porcentaje se valoriza realmente y dónde se producen los principales errores de separación. En consecuencia, la toma de decisiones se vuelve menos precisa. AeroElite puede conocer el volumen global de residuos generados, pero sin una trazabilidad detallada es más difícil optimizar la segregación en taller, ajustar la logística interna, mejorar la formación del personal o evaluar si las medidas implantadas están funcionando.

En conclusión, podemos decir que AeroElite necesita mejorar el proceso de clasificación y seguimiento de los residuos técnicos generados en sus actividades MRO para reducir errores de segregación, aumentar la recuperación de materiales valorizables, disminuir la fracción mezclada o no recuperable y disponer de datos fiables para la toma de decisiones ambientales y operativas.

Esta necesidad conecta directamente con un enfoque empresarial porque afecta a varios aspectos clave de la organización:

Dimensión afectada	Problema identificado	Consecuencia para AeroElite
Eficiencia operativa	Segregación manual lenta o con errores	Mayor carga de trabajo y menor rendimiento del proceso
Sostenibilidad	Pérdida de materiales valorizables o mezcla con residuos peligrosos	Menor recuperación y mayor impacto ambiental
Trazabilidad	Falta de datos por tipo, origen y destino	Dificultad para medir, justificar y mejorar el proceso
Costes	Mayor volumen de residuos mezclados o peligrosos	Incremento potencial de costes de gestión y tratamiento

Cumplimiento ambiental	Dificultad para demostrar segregación y control	Menor capacidad de seguimiento de obligaciones ambientales
Toma de decisiones	Información incompleta o poco automatizada	Menor precisión en la planificación de mejoras

El reto, por tanto, no consiste únicamente en incorporar una tecnología novedosa, sino en mejorar un proceso de negocio concreto: la gestión ambiental y la trazabilidad de residuos técnicos en una empresa de mantenimiento de motores.

1.2. Proceso empresarial en el que aparece el problema

El problema aparece dentro del proceso de gestión integral de residuos técnicos de AeroElite, especialmente en la fase de segregación, identificación y registro previo al almacenamiento temporal y a la retirada por gestor autorizado. Este proceso no se parece al de una planta de residuos urbanos convencional, sino al control de corrientes residuales generadas en mantenimiento, validación y logística técnica, con presencia de residuos peligrosos, valorizables y mezclados.

El proceso puede describirse en seis fases:

Fase	Descripción	Relación con la propuesta
1. Generación y recogida interna	Los residuos se generan en Producción, Validación, Logística Técnica y otras áreas y son recogidos por el personal encargado	Permite identificar el origen de los residuos y alimentar la trazabilidad
2. Segregación y preclasificación	Los residuos llegan a una estación inteligente de segregación y registro y pasan por un sistema de alimentación o triaje adaptado al tipo de corriente residual	Es el punto donde se instala la solución tecnológica
3. Digitalización y captura de datos	Cámaras y sensores captan imágenes y datos de composición	Genera la información necesaria para que funcione la IA
4. Clasificación inteligente	El modelo de IA identifica el tipo de residuo y asigna una probabilidad de clasificación	Es el núcleo de la mejora propuesta
5. Separación y almacenamiento temporal	El sistema dirige el residuo al flujo correspondiente: peligroso, valorizable o no recuperable, y lo deja preparado para su almacenamiento temporal controlado	Reduce errores y mejora la segregación
6. Gestión de datos y optimización	Se registran y analizan datos para informes, decisiones y mejora continua	Permite medir resultados y tomar decisiones empresariales

Nuestra propuesta se centrará principalmente en las fases 2, 3, 4, 5 y 6. La mejora afecta a una actividad concreta de la empresa: la clasificación y el registro de residuos técnicos antes de su

almacenamiento temporal y su gestión externa. Actualmente, en muchos entornos MRO la segregación depende de la separación previa realizada por operarios, personal de taller o revisiones manuales posteriores. Sin embargo, debido a la variedad de residuos, la presencia de contaminación cruzada y la rapidez operativa, es frecuente que se produzcan mezclas, errores y pérdidas de trazabilidad. Por ello, introducir una etapa inteligente de preclasificación puede generar un impacto significativo.

1.3. Propuesta de innovación

La propuesta de innovación consiste en implantar un sistema inteligente de apoyo a la clasificación y trazabilidad de residuos con IA en el área de segregación y control de residuos técnicos de AeroElite, comenzando inicialmente con un proyecto piloto en una de sus sedes, preferentemente en Teruel por su mayor disponibilidad de espacio y por el carácter más prolongado de parte de su operativa.

El funcionamiento general sería el siguiente:

Los residuos generados en las distintas zonas de mantenimiento, validación y logística técnica se transportarían a una estación inteligente de segregación y registro. Allí, los residuos sólidos o sus recipientes asociados pasarían por un sistema de alimentación y triaje adaptable al tipo de corriente residual, de forma que cada unidad pudiera exponerse a una fase de digitalización. Durante esta fase, cámaras de alta resolución captarían imágenes de los objetos y sensores adicionales analizarían información sobre su composición y estado, permitiendo diferenciar residuos que visualmente pueden parecer similares, como absorbentes contaminados, envases con restos de producto, chatarra metálica, plásticos o residuos mixtos.

Posteriormente, un modelo de inteligencia artificial procesaría la información captada. El modelo, basado en técnicas de machine learning y redes neuronales convolucionales, identificaría el residuo y lo clasificaría en una categoría concreta: aceites y fluidos, disolventes o absorbentes contaminados, envases contaminados, residuos metálicos valorizables, plásticos o cartón limpios, residuos peligrosos especiales o no recuperables. Además, el sistema asignaría una probabilidad de clasificación, lo que permitiría tomar decisiones más seguras. Por ejemplo, si el sistema identifica un envase contaminado con un 96% de probabilidad, puede enviarlo automáticamente al flujo correspondiente. Si la probabilidad es baja o existen dudas, el residuo podría enviarse a revisión manual o a una categoría específica de control.

Una vez clasificado el residuo, el sistema enviaría una señal al mecanismo de derivación asistida o semiautomatizada. Este mecanismo dirigiría el residuo hacia el contenedor o flujo correspondiente. Los residuos peligrosos se separarían en su corriente específica, los residuos metálicos o materiales valorizables se dirigirían al flujo de recuperación y los residuos no recuperables se enviarían al tratamiento correspondiente.

La innovación no termina en la separación física. El sistema también registraría datos sobre la cantidad, composición, origen y destino preliminar de los residuos. Estos datos se utilizarían para crear informes y paneles de control que permitan monitorizar el avance del proceso, detectar patrones de generación, mejorar la logística interna, ajustar frecuencias de retirada,

reforzar la formación del personal y diseñar estrategias de reducción y valorización. Esta parte de analítica de datos es fundamental porque convierte la solución en una herramienta de gestión empresarial.

La propuesta, por tanto, se concreta en lo siguiente:

Implantar un sistema de IA que identifique, asista la clasificación y registre de forma semiautomatizada los residuos técnicos generados en las actividades MRO de AeroElite, con el objetivo de mejorar la segregación, aumentar la recuperación de materiales valorizables, reducir errores de mezcla y aumentar la trazabilidad ambiental del proceso.

1.4. Papel de la inteligencia artificial

Uno de los aspectos más importantes del reto es explicar con claridad qué papel juega la IA dentro de la mejora. En este caso, la IA no se utiliza de forma genérica, sino para apoyar tareas específicas dentro del proceso de gestión de residuos técnicos.

El papel de la IA se puede dividir en cuatro funciones principales:

- 1. Identificación automática del residuo

La primera función de la IA es analizar imágenes y datos captados por sensores para identificar qué tipo de residuo está pasando por el sistema de preclasificación. Esta tarea sería difícil de realizar de forma rápida y constante mediante procedimientos manuales, especialmente si existe variedad de materiales, contaminación cruzada o un volumen relevante de residuos.

La IA puede reconocer patrones visuales y materiales: forma, color, textura, tamaño, presencia de etiquetas, restos de fluidos, deformaciones o composición aproximada. A partir de esos datos, el sistema asigna una categoría al residuo.

- 2. Clasificación probabilística

La segunda función es asignar una probabilidad de clasificación. Esto significa que el sistema no solo dice “este residuo es metálico” o “este envase está contaminado”, sino que indica con qué grado de confianza realiza esa clasificación.

Este enfoque es importante porque permite establecer reglas de decisión. Por ejemplo:

Probabilidad asignada por la IA	Decisión del sistema
Superior al 90%	Separación automática
Entre 70% y 90%	Separación automática con registro para revisión posterior
Inferior al 70%	Envío a revisión manual o flujo de control
Detección de posible residuo peligroso	Separación prioritaria y alerta

De esta manera, la IA no sustituye completamente la supervisión humana, sino que ayuda a automatizar la mayoría de los casos y a señalar aquellos que requieren revisión, especialmente si existe riesgo de clasificación incorrecta de residuos peligrosos.

- 3. Apoyo a la segregación y derivación semiautomatizada

La tercera función de la IA es apoyar la segregación física del residuo. Una vez identificado el material, el sistema envía una señal al mecanismo de derivación o al operario responsable para conducirlo al flujo adecuado. Esto reduce la probabilidad de que un residuo valorizable acabe mezclado con una corriente peligrosa o no recuperable y permite que el piloto combine automatización en los casos de alta confianza con validación humana en los casos dudosos.

- 4. Generación de datos para la gestión empresarial

La cuarta función, y una de las más relevantes desde el punto de vista empresarial, es la generación de datos. Cada residuo clasificado produce información que puede almacenarse y analizarse posteriormente.

Estos datos permiten responder preguntas como:

- ¿Qué tipo de residuo se genera con más frecuencia en mantenimiento y validación?
- ¿Qué zonas o procesos generan mayor volumen de residuos peligrosos o valorizables?
- ¿Qué porcentaje de residuos acaba mezclado o en rechazo?
- ¿Qué tareas o franjas horarias concentran mayor generación de residuos?
- ¿Qué materiales se clasifican peor o generan más dudas?
- ¿Qué áreas necesitan más contenedores, señalización o formación específica?
- ¿Está mejorando el sistema con el tiempo?

De esta forma, la IA aporta valor no solo en la operación diaria, sino también en la planificación estratégica, en el seguimiento ambiental y en la toma de decisiones de mejora.

1.5. Alcance inicial de la propuesta

Para que la propuesta sea realista, se plantea un alcance inicial limitado y progresivo. No se propone implantar el sistema de forma inmediata en todas las áreas de AeroElite, sino comenzar con un proyecto piloto en una sede o zona específica, preferentemente en Teruel, donde la disponibilidad de espacio y la menor presión de trabajos de ciclo corto favorecen una implantación inicial controlada.

El alcance inicial es el siguiente:

Elemento	Alcance propuesto
Ubicación	Área de segregación y control de residuos técnicos de la sede de Teruel, como proyecto piloto

Tipos de residuos	Aceites y fluidos usados, disolventes o absorbentes contaminados, envases contaminados, residuos metálicos valorizables, plásticos/cartón limpios y no recuperables
Tecnología	Sistema de alimentación y triaje inteligente, cámaras, sensores, modelo de IA, interfaz de validación y dashboard
Duración inicial	12 meses de piloto y evaluación
Usuarios principales	SIG ambiental, Logística Técnica, Producción y responsables de taller
Indicadores	Precisión, errores de segregación, valorización recuperada, fracción no recuperable, trazabilidad y tiempo de clasificación
Resultado esperado	Validar si la IA mejora la segregación y genera datos útiles para la gestión ambiental y operativa

1.6. Objetivos medibles de la propuesta

Estos objetivos deben permitir comprobar si la propuesta funciona y si aporta valor a AeroElite. Para ello, se formulan objetivos SMART: específicos, medibles, alcanzables, relevantes y con un plazo definido.

Antes de fijar las metas definitivas, sería necesario establecer una línea base durante la fase inicial del proyecto. La línea base consiste en medir la situación actual antes de implantar la IA: porcentaje de residuos correctamente segregados, volumen de fracción mezclada o no recuperable, cantidad de materiales valorizables recuperados, tiempo de procesamiento y nivel de trazabilidad. A partir de esa medición inicial, se podrán comparar los resultados posteriores.

Los objetivos propuestos son los siguientes:

Nº	Objetivo	Indicador	Meta propuesta	Plazo
1	Mejorar la precisión de clasificación de residuos técnicos	Porcentaje de residuos correctamente clasificados por la IA	Alcanzar al menos un 90% de precisión global	6 meses desde el inicio del piloto
2	Reducir errores de segregación	Porcentaje de residuos enviados al flujo incorrecto	Reducir los errores un 25% respecto a la línea base	9 meses
3	Aumentar la recuperación de materiales valorizables	Kg o toneladas de materiales valorizables recuperados	Incrementar la recuperación un 15% respecto a la línea base	12 meses
4	Reducir la fracción de residuos mezclados o no recuperables	Porcentaje de residuos no recuperables o mezclados	Reducir esa fracción un 10% respecto a la línea base	12 meses
5	Mejorar la trazabilidad del proceso	Porcentaje de residuos registrados por tipo, cantidad y origen	Registrar al menos el 95% de los residuos procesados	6 meses
6	Mejorar la eficiencia operativa del proceso	Tiempo medio de clasificación y registro por lote de residuos	Reducir el tiempo medio un 15%	9-12 meses

	de segregación y registro		respecto a la línea base	
7	Mejorar la toma de decisiones ambientales	Número de informes o dashboards generados	Generar un informe mensual de seguimiento	Desde el mes 3
8	Apoyar el seguimiento de objetivos ambientales y de cumplimiento	Evolución de valorización, rechazo, trazabilidad y cumplimiento	Revisar indicadores trimestralmente	Durante todo el piloto

Estos objetivos permiten evaluar la propuesta desde varias perspectivas: técnica, operativa, ambiental, de cumplimiento y de gestión.

1.7. Desarrollo detallado de los objetivos

- Objetivo 1. Mejorar la precisión de clasificación de residuos técnicos

El primer objetivo es lograr que el sistema de IA clasifique correctamente los residuos técnicos que pasan por la estación de preclasificación. La precisión de clasificación es un indicador fundamental porque determina la fiabilidad de la solución. Si el sistema no identifica bien los residuos, la segregación posterior tampoco será correcta.

El indicador será el porcentaje de residuos clasificados correctamente sobre el total de residuos analizados. Para calcularlo, se podrá comparar una muestra de clasificaciones realizadas por la IA con una validación manual realizada por personal experto del área ambiental o logística técnica.

La meta propuesta es alcanzar al menos un 90% de precisión global en las fracciones incluidas en el piloto en un plazo de seis meses. Este objetivo es relevante porque permite demostrar que el sistema puede funcionar en un entorno real y con residuos heterogéneos propios del mantenimiento aeronáutico.

Fórmula del indicador:

$$\text{Precisión de clasificación} = \left(\frac{\text{residuos correctamente clasificados}}{\text{residuos analizados}} \right) \times 100$$

- Objetivo 2. Reducir errores de segregación

El segundo objetivo es reducir el número de residuos enviados al flujo incorrecto. Un error de segregación ocurre, por ejemplo, cuando un residuo metálico valorizable se mezcla con residuos contaminados, cuando un envase con restos peligrosos no se identifica correctamente o cuando un residuo no recuperable se incorpora a una corriente valorizable.

Este objetivo es importante porque los errores de segregación reducen la calidad de la valorización, incrementan la fracción peligrosa o no recuperable y dificultan el control ambiental del proceso.

La meta propuesta es reducir los errores de segregación en un 25% respecto a la línea base durante los primeros nueve meses. La línea base se establecería antes de implantar el sistema o durante las primeras semanas de observación.

Fórmula del indicador:

$$\text{Tasa de error de separación} = (\text{residuos enviados al flujo incorrecto} / \text{residuos revisados}) \times 100$$

- Objetivo 3. Aumentar la recuperación de materiales valorizables

El tercer objetivo es incrementar la cantidad de materiales valorizables recuperados. El sistema debe ayudar a que más residuos metálicos, plásticos limpios, cartón u otras fracciones aprovechables sean correctamente separados y enviados a valorización.

La meta propuesta es aumentar la recuperación de materiales valorizables en un 15% durante el primer año respecto a la línea base. Este objetivo conecta directamente con la sostenibilidad, ya que permite reducir la pérdida de materiales útiles y mejorar el desempeño ambiental del proceso.

El indicador se medirá en kg o toneladas de materiales valorizables recuperados. También puede expresarse como porcentaje sobre el total de residuos procesados.

Fórmula del indicador:

$$\text{Porcentaje de residuos mezclados o no recuperables} = (\text{kg de residuos mezclados o no recuperables} / \text{kg totales de residuos procesados}) \times 100$$

- Objetivo 4. Reducir la fracción de residuos mezclados o no recuperables

El cuarto objetivo es reducir la proporción de residuos que terminan en la categoría de mezcla o rechazo. Esta fracción incluye aquellos residuos que, por errores de segregación o falta de identificación, no se recuperan y deben enviarse a tratamiento final.

Reducir esta fracción es importante porque indica que el sistema está aprovechando mejor los materiales y está separando de forma más correcta los residuos generados en la actividad MRO.

La meta propuesta es reducir la fracción mezclada o no recuperable en un 10% durante el primer año respecto a la línea base.

Fórmula del indicador:

$$\text{Porcentaje de rechazo} = (\text{kg de residuos rechazados} / \text{kg totales de residuos procesados}) \times 100$$

- Objetivo 5. Mejorar la trazabilidad del proceso

El quinto objetivo es registrar de forma sistemática los residuos procesados. La trazabilidad significa poder conocer el tipo de residuo, su cantidad, su origen, la fecha y su destino preliminar. Este objetivo es clave porque sin datos no se puede evaluar correctamente la mejora.

La meta propuesta es registrar al menos el 95% de los residuos procesados por el sistema en un plazo de seis meses. Este registro debe incluir, como mínimo, tipo de residuo, peso o volumen, fecha, hora, origen y destino.

Este objetivo tiene una gran importancia empresarial porque permite elaborar informes de seguimiento, justificar avances ambientales, reforzar el cumplimiento y detectar puntos críticos.

Fórmula del indicador:

$$\text{Nivel de trazabilidad} = (\text{residuos registrados con información completa} / \text{residuos procesados}) \times 100$$

- Objetivo 6. Optimizar la eficiencia operativa

El sexto objetivo es mejorar la eficiencia operativa del proceso de segregación y registro de residuos técnicos. La IA y la digitalización deben permitir clasificar y registrar los residuos de forma más ordenada, constante y trazable que un proceso manual o poco sistematizado.

La meta propuesta es reducir en un 15% el tiempo medio de clasificación y registro por lote de residuos durante los primeros nueve a doce meses. Este indicador permite evaluar si la propuesta mejora la eficiencia operativa del proceso sin perder trazabilidad ni control ambiental.

Fórmula del indicador:

$$\text{Tiempo medio de clasificación y registro} = \text{tiempo total empleado} / \text{número de lotes procesados}$$

- Objetivo 7. Mejorar la toma de decisiones ambientales

El séptimo objetivo es generar información útil para responsables del SIG ambiental, Logística Técnica, Producción y responsables de taller.

La meta propuesta es generar al menos un informe mensual desde el tercer mes del piloto. Este informe debería incluir datos sobre residuos procesados, segregación correcta, materiales valorizables, fracción de rechazo, errores detectados y recomendaciones de mejora.

Este objetivo es importante porque transforma los datos técnicos en información de gestión.

- Objetivo 8. Apoyar el seguimiento de objetivos ambientales y de cumplimiento

El octavo objetivo es contribuir al seguimiento de metas ambientales a medio y largo plazo. La propuesta puede apoyar el control de indicadores de segregación, valorización, trazabilidad,

reducción de rechazo y cumplimiento de requisitos asociados a la gestión de residuos peligrosos.

La meta propuesta es realizar una revisión trimestral de indicadores ambientales para evaluar si la implantación del sistema está contribuyendo a mejorar la segregación, la valorización y la trazabilidad de los residuos generados por AeroElite.

2. Identificación y asignación de recursos y herramientas

Para la correcta implantación del sistema inteligente de clasificación y trazabilidad de residuos técnicos mediante inteligencia artificial en AeroElite, es necesario identificar y definir los recursos humanos, materiales, tecnológicos y financieros que permitan ejecutar las actividades previstas y alcanzar los objetivos definidos en el proyecto.

2.1. Recursos humanos

La implantación del sistema requiere la participación coordinada de diversos departamentos de la empresa, aprovechando la estructura organizativa existente:

- El departamento de Producción, responsable de la generación de residuos en las actividades de mantenimiento de motores, participará en la operación diaria del sistema, en la segregación inicial y en la interacción con la estación de clasificación.
- El departamento de Logística Técnica colaborará en la gestión de contenedores, almacenamiento temporal, coordinación con gestores autorizados y control de flujos de residuos.
- El departamento del Sistema Integrado de Gestión (SIG) será clave en la supervisión del sistema, el seguimiento de indicadores ambientales, el control de la trazabilidad y el cumplimiento de requisitos legales y normativos.
- El departamento de Validación podrá participar en la verificación de la correcta clasificación en fases críticas o en la validación de resultados del sistema.

Adicionalmente, será necesaria la participación de personal técnico especializado en inteligencia artificial y sistemas informáticos, que se encargue del desarrollo, mantenimiento y mejora del modelo de clasificación.

Asimismo, se deberá contemplar un plan de formación específico para operarios y técnicos, centrado en el uso del sistema, la interpretación de resultados, una correcta segregación de residuos y la gestión de incidencias. Esto es especialmente relevante en una empresa como AeroElite, donde la competencia técnica del personal es un factor crítico.

2.2. Recursos materiales

Para el funcionamiento del sistema se requerirá la instalación de una estación de clasificación adaptada al entorno MRO de AeroElite, que incluirá:

- Sistema de alimentación o triaje de residuos.
- Cámaras de alta resolución para captura de imágenes.
- Sensores (ópticos o multispectrales) para identificación de materiales.
- Sistema de derivación o separación asistida hacia contenedores.
- Contenedores diferenciados para residuos peligrosos, valorizables y no recuperables.

Estos elementos se integran dentro del proceso de segregación y registro de residuos técnicos, que actualmente se realiza de forma principalmente manual.

Además, será necesario adaptar el espacio físico, preferentemente en la sede de Teruel (planteada como piloto), donde existe mayor disponibilidad operativa.

2.3. Recursos tecnológicos

El sistema se apoyará en diversas herramientas tecnológicas:

- Modelo de inteligencia artificial basado en redes neuronales convolucionales (CNN), encargado de la identificación y clasificación de residuos.
- Sistema de procesamiento de imágenes y datos captados por sensores.
- Base de datos para almacenamiento de información (tipo de residuo, origen, cantidad, fecha).
- Plataforma de visualización (dashboard) para seguimiento de indicadores.

Estas herramientas permitirán generar información clave sobre la generación de residuos, los errores de segregación, la trazabilidad y la evolución del desempeño. Esto facilitará la toma de decisiones y la mejora continua del proceso.

Será necesario garantizar la disponibilidad y fiabilidad de los recursos tecnológicos y humanos, ya que cualquier fallo en el sistema o falta de capacitación del personal podría afectar a la calidad de la clasificación y a la trazabilidad del proceso.

2.4. Recursos financieros

Para garantizar la viabilidad del proyecto, es necesario considerar una estimación básica de los costes asociados, que incluirán:

- Adquisición e instalación de equipos (sensores, cámaras, sistema de clasificación).
- Desarrollo o adaptación del modelo de inteligencia artificial.
- Costes de integración informática.
- Formación del personal.
- Mantenimiento del sistema.

Aunque se trata de una estimación preliminar, la inversión inicial se justifica por la mejora en la eficiencia del proceso, la reducción de costes asociados a residuos peligrosos, el incremento en la valorización de materiales y el refuerzo del cumplimiento ambiental.

Costes iniciales (implantación piloto)

Concepto	Coste estimado (€)
Sensores y cámaras	15.000 – 25.000
Sistema de triaje y separación	20.000 – 40.000
Desarrollo/adaptación IA	15.000 – 30.000
Integración software y base de datos	8.000 – 15.000
Adaptación de espacio y equipos auxiliares	5.000 – 10.000
Formación del personal	2.000 – 5.000

Total estimado: 65.000 – 125.000 €

Costes anuales de operación

Concepto	Coste estimado anual (€)
Mantenimiento del sistema	5.000 – 10.000
Soporte IA/IT	5.000 – 8.000
Actualización y formación	2.000 – 4.000

Total anual: 12.000 – 22.000 €

Beneficios estimados

- Reducción de residuos peligrosos → ahorro en gestión (costes altos en MRO).
- Aumento de materiales valorizables (chatarra metálica, etc.).
- Reducción de errores → menos reprocesos.
- Mejora en cumplimiento ambiental (evita sanciones).

Se estima que la reducción de errores de segregación y la mejora en la valorización de residuos puede compensar parcialmente la inversión inicial en un plazo de 2 a 4 años.

En caso de validación positiva del piloto, estos recursos podrán ampliarse progresivamente al resto de sedes y procesos de la empresa, adaptando la inversión y la capacidad del sistema.

2.5. Resumen de recursos

Tipo de recurso	Elemento	Descripción	Departamento responsable
Recursos humanos	Operarios de producción	Operación del sistema, alimentación de residuos y supervisión	Producción
	Técnicos del SIG	Seguimiento ambiental, control de trazabilidad e indicadores	SIG
	Personal Logística Técnica	Gestión de contenedores y coordinación con gestores	Logística Técnica
	Técnicos IA/IT	Desarrollo, mantenimiento y ajuste del modelo IA	IT externo/soporte
	Personal de Validación	Verificación puntual de clasificaciones críticas	Validación
Recursos materiales	Sistema de triaje/alimentación	Entrada de residuos en el sistema	Producción

	Cámaras de alta resolución	Captura de imágenes para identificación	SIG/IT
	Sensores (ópticos/multiespectrales)	Análisis de composición	SIG/IT
	Sistema de derivación/separación	Redirección a contenedores adecuados	Producción
	Contenedores diferenciados	Clasificación por tipo de residuo	Logística Técnica
Recursos tecnológicos	Modelo IA (CNN)	Identificación automática de residuos	IT
	Sistema de procesamiento de datos	Gestión de información en tiempo real	IT
	Base de datos	Almacenamiento de registros de residuos	SIG
	Dashboard	Visualización de indicadores (KPI)	SIG
Recursos financieros	Inversión inicial	Equipos, instalación y desarrollo IA	Dirección/Finanzas
	Costes operativos	Mantenimiento, formación y mejoras	SIG/Administración

2.6. Integración con el sistema existente

Todos estos recursos se integrarán en los procesos ya definidos dentro del Sistema Integrado de Gestión, especialmente en control operacional, gestión ambiental, seguimiento de indicadores y mejora continua; permitiendo reforzar la trazabilidad, uno de los elementos clave del sistema actual de AeroElite.

La correcta identificación y asignación de recursos constituye un elemento clave para la viabilidad del proyecto, ya que garantiza que todas las actividades definidas pueden llevarse a cabo con los medios adecuados. De este modo, los recursos humanos, materiales y tecnológicos descritos permiten no solo la implantación del sistema de inteligencia artificial, sino también su integración en los procesos existentes de AeroElite, asegurando su contribución efectiva a la mejora de la gestión de residuos y de la trazabilidad.

Asimismo, la propuesta tiene un impacto directo en la eficiencia operativa, la calidad del proceso, la reducción de costes asociados a residuos peligrosos y la mejora del desempeño ambiental de la empresa.

A partir de esta definición de recursos, resulta posible desarrollar un plan de implementación estructurado, en el que se establezcan las actividades necesarias, su programación temporal, la asignación de responsabilidades y los mecanismos de seguimiento. Este plan permitirá materializar la propuesta en un entorno real, asegurando el cumplimiento de los objetivos definidos.

3. Plan de implementación

Para implementar la propuesta se ha diseñado un plan de implementación que cuenta con seis fases, cada una con diversas actividades detalladas en la Ilustración 1.

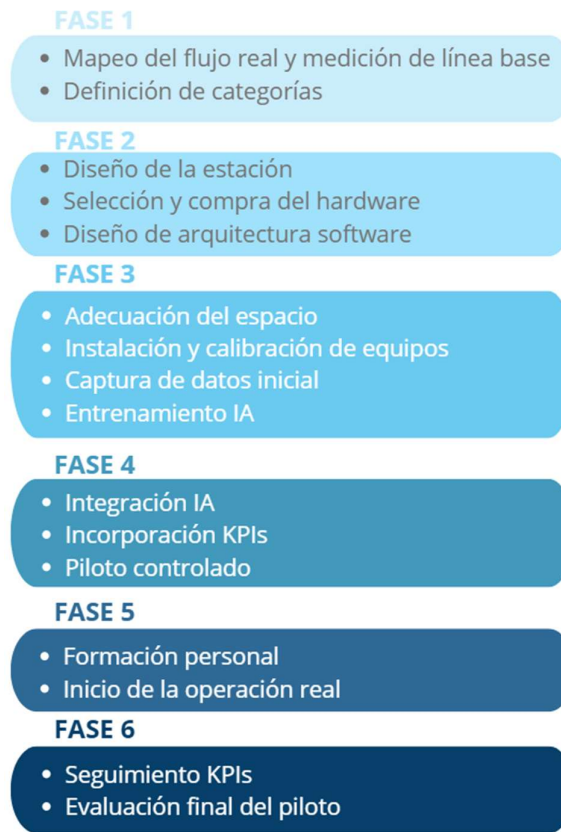


Ilustración 1. Fases de la implementación y sus respectivas actividades.

En la primera fase, se deberá analizar en detalle la situación actual de la empresa donde se tiran los residuos, que tipos hay, cuanta cantidad se produce... Esto permite determinar una línea base en el proyecto de mejora, además de poder definir categorías para estimar el cumplimiento de los objetivos. En la segunda fase, se terminan todos los pasos preliminares antes de iniciar la obra en las instalaciones. Esto incluye la parte de diseño tanto del hardware como el software y la adquisición de todos los elementos que van a ser necesarios para poner todo en marcha.

En la tercera fase, es cuando se pasa de lo diseñado a la realidad al construir el primer sistema funcional de IA clasifica residuos de la empresa. Para ello, primero se adapta el espacio en el que se va a alojar la maquinaria y una vez construido todo, se debe entrenar a la IA, un paso vital con esta novedosa tecnología. En la cuarta fase, la IA ya está implementada y toca probarla en un entorno controlado, aún no en el que actuará definitivamente. Para ello se integra la IA con una parte del sistema, se estiman los KPIs que van a servir para medir su rendimiento y se realiza la prueba. Estos KPIs, y su fórmula para su cálculo están detallados junto con los objetivos en el primer capítulo de este documento así que no se describirán en más detalle.

En la quinta fase, asumiendo que la fase piloto inicial ha sido exitosa, se prueba en la operativa real de la compañía AeroElite. Como va a estar dentro de un gran sistema, antes de su

implantación en el sistema completo, el personal tiene que estar formado en su uso. En la sexta fase, se estudia si su implantación ha sido exitosa, si han surgido problemas inesperados no encontrados en el entorno controlado o si hay margen de mejora.

3.1. Cronología de la implementación

Todo este plan de implementación está pensado para ser realizado en dos años si no surgen grandes contratiempos, como se puede apreciar en la Ilustración 2. En general, cada fase se realiza de forma independiente, ya que una no puede empezar sin haber finalizado la anterior. Las excepciones a esto son la fase 2, ya que el diseño puede iniciar sin que se haya definido del todo todos los parámetros a medir, y la fase 3 ya que la preparación del área de trabajo puede iniciar durante el periodo de compras. El periodo de prueba es de un año, medio en un entorno controlado y otro medio año en el entorno operativo definitivo.

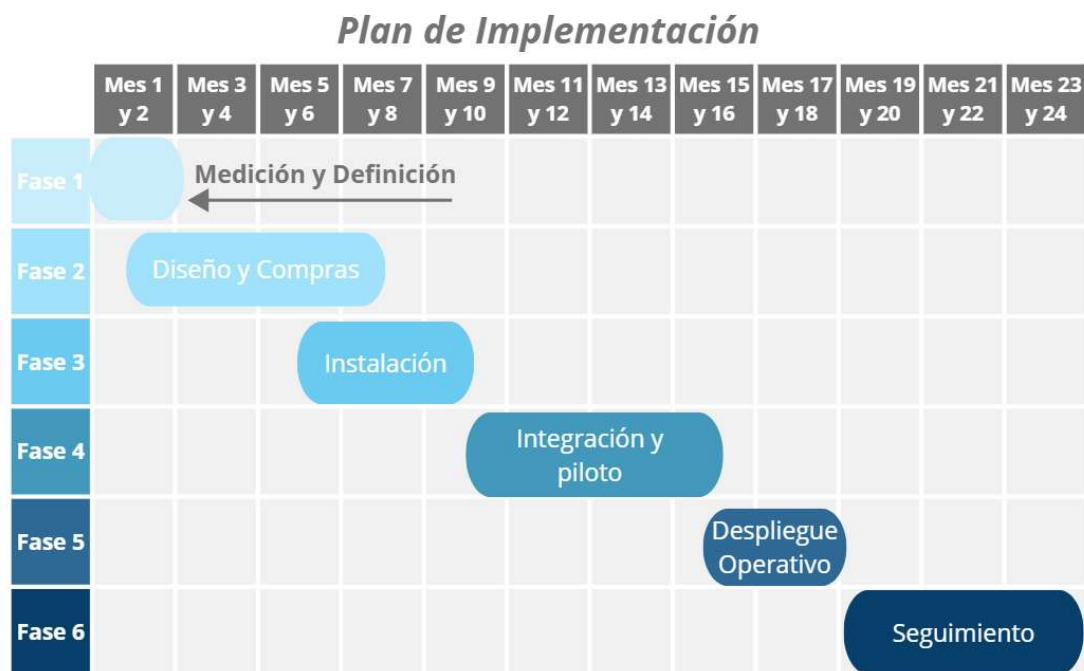


Ilustración 2. Cronograma del plan de implementación.

3.2. Seguimiento del proyecto

Para asegurar que el proyecto cumpla los objetivos se va a tener que implantar alguna forma de seguir los resultados. Esto es de especial importancia en la fase piloto donde se va a evaluar si este sistema es verdaderamente viable y algo que se pueda aplicar a la empresa. Para poder evaluar el sistema va a contar con un registro de los datos, como clasificaciones realizadas o tiempos, que van a ser organizados y transmitidos a un operario a través de un panel. Este panel mostrará la evolución de los indicadores clave y permitirá comparar los resultados con la línea base obtenida en la fase 1.

El seguimiento va a tener tres niveles de revisión, con diferentes frecuencias y objetivos. En primer lugar, se establece un seguimiento semanal operativo, del que se va a encargar el departamento de producción y el de logística, centrado en la estabilidad del sistema, la calidad del dato y la resolución rápida de incidencias: se revisan alertas, fallos de captura, casos de baja

confianza del modelo y problemas de uso en planta, generando una lista de acciones correctivas de corto plazo. En segundo lugar, se realiza un seguimiento mensual en el marco del comité de control del piloto, orientado a evaluar los resultados: se analizan los KPIs del mes, su tendencia y su comparación con la línea base, y se aprueban decisiones de ajuste de la propia IA. Este análisis producirá un informe mensual que resume indicadores, incidencias, acciones y recomendaciones. Por último, se programan revisiones trimestrales para evaluar el alineamiento del piloto con los objetivos globales y con la integración en el SIG: estas revisiones validan si el proyecto progresa según lo esperado, si los riesgos están controlados y si es necesario replanificar recursos, plazos o alcance.

En caso de que al analizar un KPI en alguno de estos tres niveles de revisión se compruebe que no se ha llegado a alguno de los objetivos, hay diseñado un protocolo de actuación. En primer lugar, se debe hacer una supervisión constante del equipo para detectar cuando se producen este tipo de fallos y por qué. Además de incrementar la cantidad de datos recopilados. Con esta información, se rediseñará un programa de entrenamiento para la IA, que solucione el problema. Si aún así no se soluciona la situación se analizará cómo señalar los residuos para poder solucionar el problema.

Si durante el análisis de KPIs en comparación con la línea base, se concluye que el sistema se encuentra en un nivel aceptable. Se realizará una evaluación final que estudie los resultados, desviaciones, causas principales, acciones implementadas y recomendaciones para dar por cerrada la fase piloto e iniciar la operación habitual con la IA.

4. Análisis de riesgo

El utilizar la IA en un sistema de clasificación conlleva sus riesgos que se diferencian con aquellos que entrañan el emplear un técnico. Es importante tener en cuenta todos estos riesgos durante la implementación del proyecto para determinar que se debería medir exactamente. Para evaluar los distintos riesgos que puede entrañar este cambio se ha planteado en este documento el desarrollo de una matriz de riesgo que evalúe tanto la probabilidad de que suceda, como la gravedad del suceso.

Se usará para ambas variables una escala de cinco niveles como se puede ver en la Tabla 1. En función de esta clasificación, un riesgo va a ser más o menos tolerable y eso está representado en la tabla a través de una escala de colores siendo el verde un riesgo tolerable, y el rojo un riesgo intolerable que o se mitiga a uno más tolerable o no se puede proceder con el proyecto.

Tabla 1. Matriz de riesgos.

Probabilidad\Gravedad	A. Insignificante (sin efecto al cumplimiento o a la operación)	B. Menor (retrabajo de coste bajo)	C. Moderado (interrupciones parciales)	D. Mayor (impacto operativo significativo, incidente ambiental menor)	E. Catastrófico (incidente ambiental serio, parada prolongada)
1. Remota (muy improbable)	1A	1B	1C	1D	1E
2. Improbable (podría ocurrir, pero es poco frecuente)	2A	2B	2C	2D	2E
3. Posible (puede ocurrir varias veces durante el piloto)	3A	3B	3C	3D	3E
4. Probable (ocurre con frecuencia si no se refuerzan controles)	4A	4B	4C	4D	4E
5. Casi cierta (se espera que ocurra repetidamente)	5A	5B	5C	5D	5E

Al integrar la IA en un proceso suelen producirse un cierto tipo de errores, en la Tabla 2 se recopilan los riesgos más comunes asociados a estos errores, particularizados para el sistema propuesto en este documento. Ya que la probabilidad será un parámetro que se conocerá durante la fase de pruebas, se analiza la gravedad de los posibles sucesos en este documento. Una vez se estime la probabilidad se empleará la matriz de riesgo para determinar la tolerabilidad de los riesgos. Es importante entender que una vez se implemente la IA pueden identificarse más riesgos no identificados originalmente y que por tanto se necesite una ampliación de esta tabla.

Tabla 2. Evaluación de riesgos del proceso.

Riesgo	Causa típica	Gravedad	Mitigación
Fallo de sensores	Suciedad, mala calibración, vibraciones.	B	Establecimiento de planes preventivos, checklist diaria.
Tiempos de ciclo altos	Infraestructura insuficiente, proceso no optimizado.	B	Plan de mejora continua, métricas de rendimiento.

<i>Ciberataque</i>	Seguridad débil	E	Segmentación de red, control de accesos.
<i>Clasificación errónea de residuo peligrosos como no peligroso</i>	Entrenamiento del modelo insuficiente.	E	Etiquetado estricto, si hay más de un 90% de que sea peligroso revisión humana
<i>Clasificación errónea de residuo no peligrosos como peligroso</i>	Umbral muy conservador, entrenamiento del modelo insuficiente.	C	Obtención de más datos para el análisis, ajuste de umbrales.
<i>Aparición de residuos no contemplados por el modelo</i>	Empleó de nuevos envases, suciedad, iluminación.	D	Control de iluminación, reentrenamiento mensual.
<i>Sobreconfianza del operario</i>	Largos periodos sin errores producen descuidos	C	Formación específica, auditoría de decisiones.
<i>Pérdida de experiencia del operario</i>	Tras largo tiempo sin encargarse de una tarea un operario puede haber perdido sus capacidades.	D	Realización de simulacros periódicos donde el operario deba encargarse de la tarea.
<i>Datos incompletos</i>	Fallos de integración, operación rápida.	D	Alertas si falta origen de residuo, ejercicios de validación.
<i>Entrenamiento del modelo mal ejecutado.</i>	Falta de una base de datos robusta.	D	Recopilación de datos exhaustiva, redundancias.