

INFORME PROYECTOS— 2024-2025

Título completo del proyecto:

**SOSTENIBILIDAD EN EL RECICLADO DE BATERIAS DE LITIO ION PARA UNA
TRANSICIÓN VERDE
RECILION**

Informe publicable de resultados.

Programa: Proyectos de I+D en colaboración con empresas

Referencia proyecto en AIDIMME: 22400059

Expediente: IMDEEA/2024/75

Duración: Del 01/01/2024 al 31/10/2025

Coordinado en AIDIMME por: Silvia Oyonarte

Contenido

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO	2
1.1. EMPRESAS COLABORADORAS	3
2. ACTIVIDADES REALIZADAS, DESARROLLO DEL PROYECTO	5
2.1 PAQUETE DE TRABAJO 1: DEFINICIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES Y PARÁMETROS DEL PROCESO DE RECICLADO. (ITE_AIDIMME)	6
TAREA 1.1. DETERMINACIÓN DE ESPECIFICACIONES Y PARÁMETROS DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE GRAFITO DEL ÁNODO	6
TAREA 1.2. DETERMINACIÓN DE ESPECIFICACIONES Y PARÁMETROS DEL PROCESO. MATERIAL CATÓDICO.	7
TAREA 1.3. SELECCIÓN DE TIPO DE CELDA Y QUÍMICA PARA EL RECICLADO.	10
PT2. PAQUETE DE TRABAJO 2: PRETRATAMIENTO DE LAS CELDAS EN FIN DE VIDA: DESACTIVACIÓN, DESENSAMBLADO, ACONDICIONAMIENTO Y SEPARACIÓN DE LAS FRACCIONES. (ITE)	11
TAREA 2.1. DESACTIVACIÓN DE LAS CELDAS	11
TAREA 2.2. DESENSAMBLADO Y APERTURA DE LAS CELDAS.....	12
TAREA 2.3. EXTRACCIÓN, ACONDICIONAMIENTO DE LOS COMPONENTES DE LA CELDA Y SEPARACIÓN DE LAS ...	12
PT3. DESARROLLO DE PROCESO SOSTENIBLE PARA LA SEPARACIÓN Y RECUPERACIÓN DE GRAFITO. (ITE).....	13
TAREA 3.1. SEPARACIÓN Y RECUPERACIÓN DEL GRAFITO	13
TAREA 3.2. CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA DEL GRAFITO RECICLADO	13
SE CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICA LAS FRACCIONES OBTENIDAS POR TEP Y SALES FUNDIDAS	13
.....	14
TAREA 3.3. ANÁLISIS DE VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LAS TÉCNICAS DE SEPARACIÓN QUÍMICA ESTUDIADAS	15
PT4. DESARROLLO DE PROCESO SOSTENIBLE PARA LA RECUPERACIÓN DE METALES DEL MATERIAL ACTIVO (CÁTODO). RECICLADO HIDROMETALÚRGICO DEL CÁTODO. (AIDIMME)	15
TAREA 4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA QUÍMICA DEL MATERIAL CATÓDICO. TRACCIÓN DE METALES DE LOS CÁTODOS DE BATERÍAS.....	16
TAREA 4.2. PREPARACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DEL MATERIAL CATÓDICO EN FUNCIÓN DE LA PRESENTACIÓN DEL MATERIAL	17
TAREA 4.3. ELECTRO-LIXIVIACIÓN DE METALES DE LOS CÁTODOS DE BATERÍAS	18
TAREA 4.4. EVALUACIÓN DE LOS RENDIMIENTOS DE RECUPERACIÓN DE METALES	20
PT5. VALIDACIÓN DEL PROCESO DE RECICLADO DESARROLLADO. (ITE_AIDIMME)	21
TAREA 5.1. VALORIZACIÓN DEL GRAFITO RECICLADO Y DEL CÁTODO REFORMULADO COMO MATERIALES ANÓDICO Y CATÓDICO	21
TAREA 5.2. VALIDACIÓN DEL PROCESO HIDROMETALÚRGICO.....	23
TAREA 5.3. VALORIZACIÓN DE METALES EXTRAÍDOS. REFORMULACIÓN DE MATERIAL CATÓDICO	29
3. VALIDACIÓN LAS EMPRESAS COLABORADORAS.....	31
4. CONCLUSIONES	36
1. CONCLUSIONES SOBRE EL TRABAJO REALIZADO POR AIDIMME	36
RESPECTO AL PROCESO APLICADO AL MATERIAL CATÓDICO	37

1. Introducción y objetivos del proyecto

El proyecto RECILION surge como respuesta a la creciente demanda de baterías de ion-litio y a la presión que esto genera sobre la disponibilidad de materias primas críticas. A ello se suma la necesidad de gestionar adecuadamente los residuos asociados y de cumplir con las exigencias europeas, que impulsan hacia modelos de reciclado más eficientes y sostenibles. Esta situación exige alternativas que reduzcan la dependencia de materias primas exteriores y que permitan minimizar el impacto ambiental de los procesos existentes.

Los métodos convencionales de reciclaje, basados en tecnologías pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas, presentan importantes limitaciones debido a su elevado consumo energético y la generación de residuos. Frente a ello, el proyecto plantea un enfoque integral que introduce tratamientos previos optimizados, procedimientos de separación menos contaminantes y técnicas electroquímicas para recuperar metales de manera selectiva, reduciendo el uso de reactivos peligrosos y disminuyendo las emisiones. Además, incorpora soluciones innovadoras, como disolventes eutécticos y CO₂ supercrítico para eliminar aglutinantes, así como la reutilización de lixiviados en la formulación de nuevos materiales catódicos.

El proyecto se llevó a cabo conjuntamente entre el ITE y AIDIMME. El ITE se responsabiliza principalmente de las fases de descarga, desmontaje de las celdas y recuperación de los materiales críticos procedentes del ánodo. AIDIMME, por su parte, concentra su labor en la recuperación de los metales estratégicos del cátodo, aplicando procesos avanzados para su extracción y posterior valorización. Esta colaboración permite abordar el reciclaje de las baterías de forma integral y coordinada, aplicando el conocimiento especializado de cada centro en su respectiva área.

El objetivo general del proyecto RECILION es desarrollar un proceso completo y sostenible para el reciclado de baterías de ion-litio que permita maximizar la recuperación de materiales críticos y demostrar la viabilidad técnica y ambiental de los materiales obtenidos para su posible reintroducción en nuevas baterías. Para el alcance del objetivo principal se requieren los siguientes objetivos específicos:

- Desactivar las celdas garantizando la seguridad en su manipulación, evitando riesgos eléctricos y químicos.
- Separar de manera eficiente los componentes en fracciones identificables, como metales, plásticos y electrodos, para facilitar su posterior tratamiento.
- Recuperar los electrodos y obtener la denominada “black mass” donde se encuentra la mayor parte de los materiales críticos de una batería.

- Definir y validar un proceso electro-hidrometalúrgico para la extracción y recuperación de metales críticos (litio, cobalto, níquel y manganeso) presentes en el material catódico.
- Adaptar los lixiviados obtenidos para su valorización mediante la reformulación de precursores catódicos, permitiendo la reintroducción de los metales recuperados en nuevas baterías.
- Finalmente, evaluar el comportamiento electroquímico del grafito reciclado y del material catódico reformulado, comprobando su viabilidad para aplicaciones en baterías de ion-litio


1.1. Empresas colaboradoras

El proyecto contó con 5 entidades identificadas por jugar un papel crítico en la cadena de valor del proceso investigado y desarrollado, ya sea por la actividad principal que realizan, interés mostrado en la idea de proyecto, análisis de sus necesidades y/o valor añadido que se les puede aportar con el desarrollo del mismo.

Las empresas que colaboraron y/o mostraron interés por parte de AIDIMME fueron:

	<ul style="list-style-type: none"> • GITICSA SERVICIOS TÉCNICOS INDUSTRIALES, S.L
	<ul style="list-style-type: none"> • SUCESORES DE LEONARDO GARCIA S.L.
	<ul style="list-style-type: none"> • JOSÉ JAREÑO, S.A.

Las empresas que colaboraron por parte de ITE

	<ul style="list-style-type: none">• GDES Energy Services S.A.U.
	<ul style="list-style-type: none">• DESGUACE CORTES S.L.
	<ul style="list-style-type: none">• TERA BATTERIES RECYCLING, S.L

2. Actividades realizadas, desarrollo del proyecto

El plan de trabajo para el Proyecto RECILIÓN se estableció en ocho paquetes de trabajo. De los ocho paquetes de trabajo tres de ellos son horizontales; gestión-coordinación, difusión y, transferencia y promoción de los resultados. Los cinco paquetes restantes son técnicos y en función del objeto de éste fueron desarrollados por AIDIMME, ITE o en estrecha colaboración.

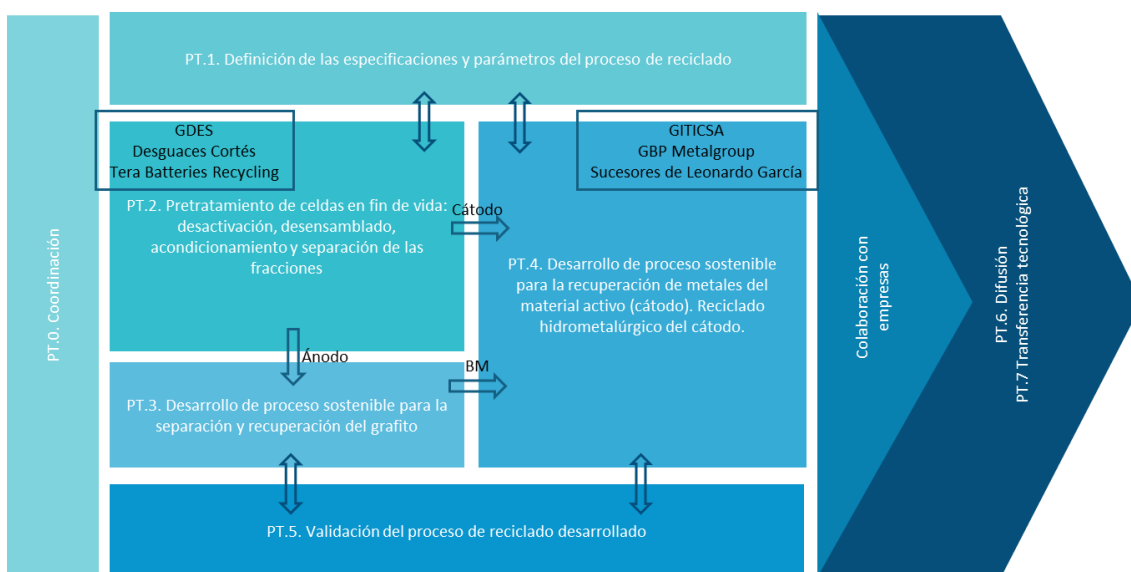


Figura 1. refleja la metodología de trabajo a seguir y estructura del proyecto RECILION. Contempla cinco paquetes de trabajo de tipo técnico: PT.1, PT.2, PT.3, PT.4 y PT.5

- En PT1 se centra en la definición de la química, el tipo de celda, las especificaciones y los parámetros del proceso de reciclado, priorizando la viabilidad técnica, económica y ambiental. Las empresas colaboran en la identificación y selección de los residuos de interés para testeo.
- En PT2 se centra en el desarrollo del proceso de pretratamiento de las celdas al final de su vida útil, que incluye desactivación, desensamblado, acondicionamiento y separación de componentes.
- En PT3 se centra en crear un proceso de recuperación y reciclado del grafito y otros componentes no activos de los electrodos anódicos.
- En PT4 se desarrolla un proceso de extracción, recuperación y reciclado de los metales contenidos en el material activo del cátodo, primero con materiales comerciales modelo y luego con los cátodos reales suministrados por empresas

colaboradoras para su testado.

- En PT5 se validan los procesos de reciclado desarrollados en el PT3 y PT4, incluyendo el testeo electroquímico de los materiales recuperados. Por último, se revalorizan los metales extraídos mediante la reformulación de un nuevo material catódico.

A continuación, se detallan los paquetes técnicos del proyecto RECILION, especificando el centro responsable de su desarrollo (individual o conjunto).

2.1 Paquete de trabajo 1: Definición de las especificaciones y parámetros del proceso de reciclado. (ITE_AIDIMME)

El objeto del paquete de trabajo era la definición de las bases de trabajo, especificaciones y parámetros de proceso para el reciclado de baterías de iones de litio, en concreto para la recuperación de grafito del ánodo y metales presentes en el material catódico. La línea base de trabajo se fue definida para trabajar con celdas tipo pouch y química NMC. Las tareas realizadas en el marco del PT1 y recogidas en los entregables E1.1 y E1.2 fueron:

Tarea 1.1. Determinación de especificaciones y parámetros del proceso de recuperación de grafito del ánodo

Durante esta tarea se establecieron las bases técnicas necesarias para diseñar el proceso de recuperación de grafito procedente del ánodo. En primer lugar, se llevó a cabo una revisión del estado del arte y de las tecnologías disponibles para la separación y purificación del grafito, analizando sus limitaciones y su impacto ambiental, con el fin de seleccionar alternativas más sostenibles y compatibles con los objetivos del proyecto (E1.1).

A partir de este análisis se identificaron las alternativas de mayor interés para el proyecto y se definieron los criterios para seleccionar tecnologías viables en etapas posteriores. Entre los parámetros definidos en esta fase se encuentran las condiciones preliminares de operación (temperatura, tiempo de reacción, tipo de reactivo, relación sólido/líquido o presión en el caso de fluidos supercríticos) así como los requisitos de seguridad y sostenibilidad asociados al uso de disolventes o tratamientos térmicos. Esta información permitió establecer una primera matriz comparativa de rutas potenciales, que posteriormente fue utilizada para priorizar las tecnologías que se evaluarían experimentalmente en PT3.

Tabla 1. Rutas de recuperación consideradas y parámetros preliminares definidos en T1.1. ITE

Tecnología	Finalidad principal	Parámetros definidos en T1,1
Disolventes sostenibles (DES, Cyrene, TEP, etc.)	Eliminación selectiva del binder	Tipo de disolvente, temperatura de operación, tiempo de reacción, proporción sólido/disolvente, agitación y flujo de disolvente, secado posterior
Fluidos supercríticos	Eliminación de orgánicos y deslaminación	Tipo de fluido, presión y temperatura, tiempo de exposición, uso de co-solventes, número de ciclos, tasa de flujo de fluido, recirculación del fluido
Tratamientos térmicos (incluyendo sales fundidas)	Eliminación del polímero y limpieza del grafito	Tipo de sales fundidas, ventana de temperatura, tiempo de residencia, condiciones de calentamiento, proporción sal/electrodo, atmósfera del proceso

Paralelamente, se recopilaron las especificaciones asociadas a los componentes del ánodo y a los factores que condicionan su procesado, incluyendo la naturaleza del aglutinante, la presencia de electrolito y los requerimientos de limpieza y secado previos al tratamiento. Esta información permitió establecer una primera definición de las especificaciones de entrada al proceso, identificando elementos clave que afectan a la eficiencia de separación y a la calidad del grafito resultante (E1.1, secc. 3.4.2).

Finalmente, se fijaron los criterios que se emplearían posteriormente para evaluar la eficacia de las rutas seleccionadas. Estos criterios incluyen la eficiencia de eliminación del binder, el rendimiento de recuperación de grafito, la pureza del grafito, la conservación de la estructura gráfica, la ausencia de contaminación metálica, la sostenibilidad del proceso y su potencial de escalabilidad. Los indicadores técnicos definidos en esta tarea sentaron las bases para la comparación sistemática entre procesos que se desarrolló más adelante en PT3 y PT5.

Toda la información generada en esta tarea se consolidó en el entregable **E1.1 – Especificaciones y parámetros del proceso de recuperación de grafito**.

Tarea 1.2. Determinación de especificaciones y parámetros del proceso. Material catódico.

Tarea 1.2.1. Actualización e Investigación de Desarrollos Sostenibles

Se actualizaron las referencias sobre tecnologías y procesos sostenibles contempladas en el proyecto, como los procesos hidrometalúrgicos y electrometalúrgicos, para la extracción de metales a partir de residuos de material catódico.

- **Objetivo:** Identificar requerimientos, condiciones de trabajo y parámetros de operación que han proporcionado mejores rendimientos en trabajos previos sobre diferentes formatos (lámina catódica, black mass).
- **Metodología:** Búsqueda, análisis y selección de información en fuentes bibliográficas (RSC/ Science Direct/Nature reviews) y patentes (Espacenet/Google Patents), Informes CAS.

Finalmente, se identificaron protocolos y condiciones de operación en procesos electroquímicos (material de electrodos, configuraciones, densidades de corriente) con rendimientos comparables a las lixiviaciones químicas.

Tarea 1.2.2. Objetivos Específicos para la Extracción de Metales (Li, Co, Ni, Mn)

Se priorizó la química NMC (Óxido de Litio, Níquel, Manganeso y Cobalto) debido a su posición dominante en el mercado desde 2022 (60% de participación en mercado).

En función de la presentación del material catódico (lámina y black mass), se propusieron los siguientes objetivos de extracción de metales por electro lixiviación:

Tabla 2. Eficiencia extracción metal en procesos de electro lixiviación propuestos, Tabla 2 en E1.2. AIDIMME

Tipo de material	Masa_ MA (g)	Relación S/L (g/L)	Eficiencia metal/ proceso de lixiviación (% metal i/proceso lixiviación)			
			Ni	Co	Mn	Li
Lámina	(1)	10 -20	> 80	> 80	> 60	> 90
BMC	(1)	10 -20	> 80	> 60	> 20	> 90

Tarea 1.2.3. Selección de Técnicas de Acondicionamiento, Extracción y Recuperación

El protocolo de trabajo establecido se basó en priorizar la separación semi-selectiva de metales en la secuencia de extracción. La metodología global de tratamiento contempla 3 etapas:

1. Acondicionamiento / Pretratamiento
2. Extracción de metales por Electro-lixiviación
3. Valorización y/o Recuperación de los metales extraídos

El formato de presentación del material catódico es esencial para el diseño del proceso de reciclaje. Se proponen dos alternativas de acondicionamiento:

Formato del Material Catódico	Acondicionamiento / Pretratamiento
Lámina	Ultrasonidos (US) para mejorar la separación semi-selectiva
Black Mass	Tratamiento Térmico para eliminar binder favoreciendo la extracción posterior de metales

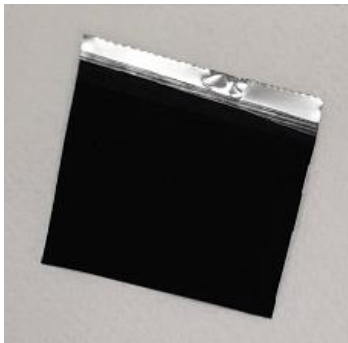


Figura 2. Lámina catódica tipo NMC

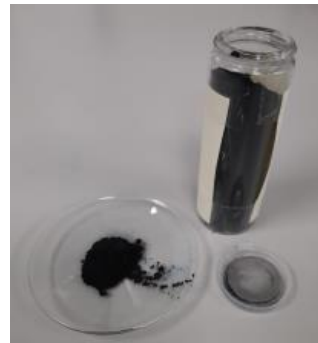


Figura 3. Black mass catódico batería tipo NMC 361

- Esquema Básico (Lámina): Inicia con Ultrasonidos (US) para separar el Al, seguido de Electro-lixiviación para extraer el Li y posteriormente el Ni, Co, Mn.
- Diagramas de Proceso: Se definieron diagramas de flujo detallados para el reciclaje, diferenciados por el formato de entrada (lámina o black mass).

Tarea 1.2.4. Diseño Básico del Proceso de Extracción y Recuperación de Metales

Se indicaron las tecnologías, equipos y condiciones operacionales en función del formato de presentación del material para el proceso de extracción y recuperación. Ver página 11, E1.2

El proceso difiere entre black mass y el de lámina en el acondicionamiento (solo requiere tratamiento térmico) y en la configuración de la celda electrolítica.

Configuración de Celda: La celda debe estar adaptada para el procesado de polvo. Se prevén dos posibilidades: celda abierta rectangular con electrodos en paralelo, o celda cilíndrica con electrodos concéntricos. La configuración idónea se determinará en ensayos de laboratorio

Conclusiones: Se definieron las etapas y especificaciones básicas para la extracción de metales presentes en el material catódico de baterías de ion litio.

Tarea 1.3. Selección de tipo de celda y química para el reciclado.

Esta tarea se centró en el **análisis y la selección** de la **celda y la química de batería más adecuadas** para el proyecto.

Se realizó una **revisión comparativa** de las tecnologías de baterías disponibles (**cilíndricas, prismáticas, pouch**) y sus químicas principales (**LFP, NMC, LCO**).

La evaluación se basó en criterios **técnicos, económicos y de sostenibilidad**, prestando especial atención a (Ver Tabla 3 y Tabla 4):






- **Potencial de reciclado** y el valor de los materiales recuperables.
- **Compatibilidad** con las técnicas de recuperación planificadas.
- **Facilidad de desensamblado** y la cantidad de material activo recuperable.
- El **contenido en metales de valor crítico** y el riesgo de subproductos.
- La **disponibilidad de residuos** de cada tipología.
- La **capacidad de suministro** de celdas por parte de las empresas colaboradoras para las etapas posteriores del proyecto.

Tabla 3. Criterios para la selección del formato de celda.

Configuración	Facilidad de desensamblaje	Contenido materiales críticos	Eficiencia de recuperación	Tamaño y volumen	Coste de producción y reciclaje	Disponibilidad y volumen de baterías EoL	Impacto ambiental
Cilíndrica							
Pouch							
Prismática							

Tabla 4. Criterios para la selección de la química de la celda.

Configuración	Facilidad separación materiales	Recuperación materiales valiosos	Impacto ambiental	Demanda futura de reciclaje y mercado de materiales recuperados	Costo de reciclaje y eficiencia económica	Aplicaciones comunes
NMC						
LFP						

LCO						
-----	-----------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------

El estudio comparativo realizado permitió **evaluar las ventajas y desventajas** de las distintas opciones de baterías, discutiendo sus implicaciones en el diseño del proceso de reciclado.

El resultado final fue la **selección de celdas tipo pouch con química NMC** debido a cuatro razones principales:

1. **Alto contenido de materiales de interés** (Níquel, Cobalto, Manganeso).
2. **Buena compatibilidad** con las rutas de tratamiento definidas en T1.1 y T1.2.
3. **Formato adecuado** para las operaciones de pretratamiento del PT2.
4. **Disponibilidad para testeo** por parte de las empresas colaboradoras.

PT2. Paquete de trabajo 2: Pretratamiento de las celdas en fin de vida: desactivación, desensamblado, acondicionamiento y separación de las fracciones. (ITE)

Tarea 2.1. Desactivación de las celdas

El objetivo de la tarea era garantizar la seguridad antes del desensamblado eliminando la energía residual.

Se evaluaron varios métodos de desactivación:

- **Descarga resistiva** → descartado por poco control térmico.
- **Inmersión en salmuera** → descartado por riesgo de corrosión y liberación de electrolito.
- **Carga activa controlada** → descartado por coste del equipo.
- **Equipos específicos de testeo de baterías** → **seleccionado** por control total y monitorización.

Protocolo final elegido fue el siguiente:

- Descarga controlada con equipo de testeo.
- Cortocircuito externo supervisado para alcanzar estado seguro (<0.5 V).
- Monitorización de tensión y temperatura en tiempo real.

Tarea 2.2. Desensamblado y apertura de las celdas

La tarea al igual que las conclusiones de esta condujeron a una rutina optimizada para el desensamblado que consiste en:

- Tras la desactivación, se cortó parcialmente la envolvente **pouch** usando herramientas cerámicas no conductoras.
- Se retira la carcasa externa para exponer la pila interna de electrodos.
- Se separaran cuidadosamente las lengüetas metálicas sin provocar cortocircuitos.
- Se realiza la inspección visual y realiza el registro fotográfico para mayor trazabilidad.



Figura 3. Apertura y retirada de la envolvente externa de la celda pouch .Ref. ITE

Tarea 2.3. Extracción, acondicionamiento de los componentes de la celda y separación de las diferentes fracciones de materiales

En esta tarea se realizó el desensamblado completo del paquete interno y separación física de las láminas de ánodo, cátodo y separador.

- Separación progresiva del separador y de las láminas de ánodo (grafito/Cu) y cátodo (NMC/Al).

Por otra parte, se obtuvieron fracciones limpias y diferenciadas y cuantificó cada componente recuperado:

Componente	Peso (g)	%
Carcasa	29,8	3,5%
Separador	51,1	6,0%
Ánodo	330,8	38,8%

Cátodo	441,1	51,7%
--------	-------	-------

Como resultado de la tarea se obtuvieron fracciones limpias y diferenciadas listas para procesos de recuperación posteriores.

PT3. Desarrollo de proceso sostenible para la separación y recuperación de grafito. (ITE).

Tarea 3.1. Separación y recuperación del grafito

En esta tarea se trabajaron tres rutas para eliminar el aglutinante PVDF del ánodo y recuperar grafito:

1. Ruta con disolvente sostenible TEP

- Ruta de referencia por sostenibilidad.
- Optimización de: temperatura, tiempo, relación sólido/líquido.
- Eliminación de PVDF: **8–32%**
- Recuperación de grafito: **≈98%**
- Estructura bien preservada.

2. Tratamiento en sales fundidas

- Permite operar a menor temperatura (160 °C vs 400 °C).
- Eliminación de PVDF: **≈55%**
- Recuperación: **≈96%**
- Genera fracción MS-SP.

3. CO₂ supercrítico

- Sin uso de disolventes adicionales.
- Eliminación de PVDF: **39–56%**

Material recuperado limitado, pero proceso validado como viable en fase preliminar.

Tarea 3.2. Caracterización fisicoquímica del grafito reciclado

Se caracterización fisicoquímica las fracciones obtenidas por TEP y sales fundidas

DRX

- Fracciones TEP: estructura gráfrica preservada ($d_{002} \approx 3,36 \text{ \AA}$; $L_c \approx 26\text{--}32 \text{ nm}$).

- MS-SP: menor orden estructural.
- MS-SC: estructura incluso más ordenada que la del grafito comercial.

Raman

- Fracciones TEP: bajo desorden ($ID/IG < 0,6$).
- MS-SP: mayor desorden.
- MS-SC: orden elevado.

Granulometría (DL)

- TEP: distribuciones estrechas ($Dv50 \approx 10-12 \mu\text{m}$).
- Sales fundidas: distribución más amplia y mayor proporción de finos.

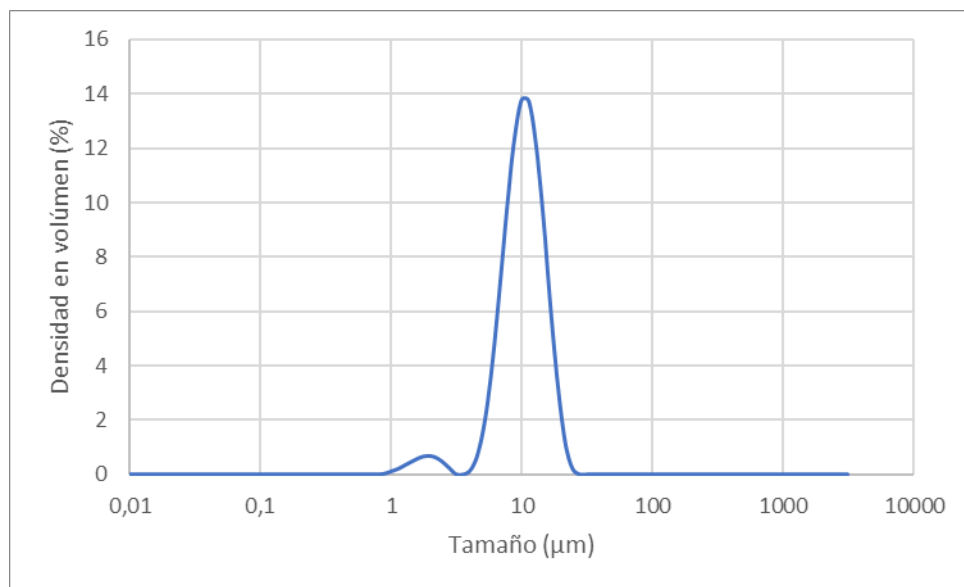


Figura 4. Distribución granulométrica representativa del grafito recuperado. Re. ITE

ICP-OES

- TEP: muy bajas impurezas, salvo algo de Cu.
- Sales fundidas: niveles más altos de Na y Al por residuos de sales.

Conclusión: todas las rutas permiten obtener grafito reciclado con características adecuadas para reutilización en ánodos, con diferencias coherentes según el tratamiento.

Tarea 3.3. Análisis de viabilidad técnica y económica de las técnicas de separación química estudiadas

En esta tarea se evaluó la viabilidad técnica y económica del proceso de eliminación del aglutinante mediante **CO₂ supercrítico** (CO₂ SC), tal como se recoge en el entregable E3.2. Partiendo de las condiciones optimizadas en T3.1, se estudió la operatividad, estabilidad y reproducibilidad del proceso a escala piloto, así como su potencial de escalabilidad industrial

Respecto a la viabilidad técnica:

- Funcionamiento estable en laboratorio (0,5 L) y piloto (5 L).
- Eliminación de PVDF: **49–59%**.
- Sin generación de efluentes líquidos.
- Incidencia menor: solidificación puntual de DMSO en el condensador.

Respecto a Viabilidad económica:

- Coste estimado: **≈8 €/kg** de material tratado.
- Escenario: planta de 500 kg/día.
- Costes críticos:
 - DMSO (25–50 €/kg) y su recuperación.
 - Energía y compresión (250–350 bar).

Conclusión: proceso técnicamente viable con potencial industrial, pero requiere optimizar eficiencia y costes del co-solvente

PT4. Desarrollo de proceso sostenible para la recuperación de metales del material activo (cátodo). Reciclado hidrometalúrgico del cátodo. (AIDIMME)

El Paquete de Trabajo 4 (PT4) tuvo como objetivo principal el diseño y desarrollo de un proceso integral de extracción y para posterior recuperación de los metales críticos (Li, Ni, Co, Mn) del material activo (cátodo) de baterías de ion-litio en fin de vida, bajo criterios de sostenibilidad (minimización de consumo energético y reducción de residuos).

Se caracterizaron los materiales de trabajo, prepararon y acondicionaron según protocolos de trabajo establecidos en PT1 y, se trabajaron atendiendo al formato de presentación del material y la optimización de condiciones, resultado de ensayos. Finalmente se evalúan los rendimientos de extracción de metales conseguidos a partir de materiales tipo NMC proporcionados por ITE y material catódico procedente del desmantelado de módulos instalados en una batería eléctrica de un automóvil eléctrico

(LCO_1). Las tareas realizadas en el marco del PT4 y recogidas en el entregable E4.1 fueron:

Tarea 4.1. Caracterización de la química del material catódico. Tracción de metales de los cátodos de baterías.

En esta tarea se caracterizó la química de los materiales catódicos seleccionados (NMC 361, 622, 811 y LCO_1). La caracterización se realizó mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X (FRX), espectrometría de emisión por plasma acoplado inductivamente (ICP) y microscopía electrónica de barrido con dispersión de energía de rayos X (SEM-EDX).

Composición Química del Material Activo (Formato Lámina)

La siguiente tabla muestra la composición de metales en porcentaje en peso del material activo (separado del colector por raspado), donde se observa la alta pureza de los metales de transición y una reducción drástica del Al respecto al material sin tratar.

Tabla 5. Caracterización del % en metales en láminas que no incluyen colector, por IICP. Tabla3 en el informe original, E4.1. El material activo se separó del colector de aluminio por raspado.

Muestra (1)	Li (%)	Mn (%)	Co (%)	Ni (%)	Al (%)	total (%)
811 NMC	5,64	2,30	6,06	38,65	0,15	52,80
622 NMC	7,11	11,85	12,34	35,70	0,98	67,98
361 NMC	6,49	29,34	8,50	20,40	4,00	68,73
LCO_1	1,99	32,85	2,57	9,47	3,37	50,25

Composición Química del Material Activo (Formato Black mass catódico)

Tabla 6. Caracterización del contenido y % en metales en BMC, por ICP. Tabla5 en el informe original, E4.1

Muestra	Li (%)	Mn (%)	Co (%)	Ni (%)	Al (%)	total (%)
361 NMC	4,96	24,12	6,67	16,54	0,35	0,01
LCO_1	2,82	41,50	2,70	9,82	0,82	0,01

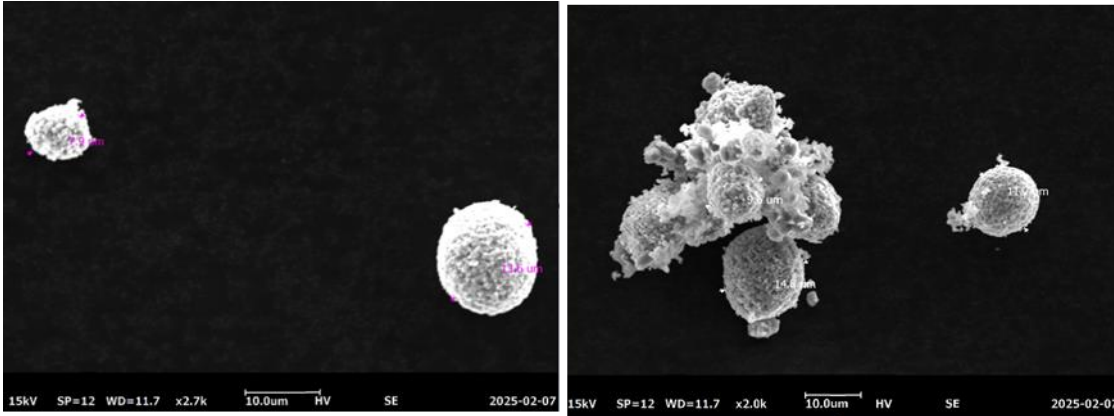


Figura 5. Imágenes por SEM_EDX de Black mass catódica NMC 361. Figura 4 en el informe originalE4.1

Tarea 4.2. Preparación y acondicionamiento del material catódico en función de la presentación del material

Se realizó la preparación y el acondicionamiento del material (aplicando tratamientos físicos y térmicos) para optimizar la eficiencia del posterior proceso de electrolixiviación.

- **Formato Lámina:** La combinación de ultrasonidos (US) y un tratamiento térmico demostró ser muy efectiva para separar el material activo del colector de aluminio (Al). El ultrasonido también fue crucial para reducir significativamente el tiempo de sonicación necesario.
- **Formato Black Mass (BMC):** Se determinó que el *black mass* (BMC 361) utilizado ya estaba casi libre de aglutinante PVDF, por lo que el pretratamiento fue menos crítico en este aspecto.



Figura 6. Esquema de tecnologías de pretratamiento aplicadas en función presentación del material. Figura 6 en el informe original, E4.1

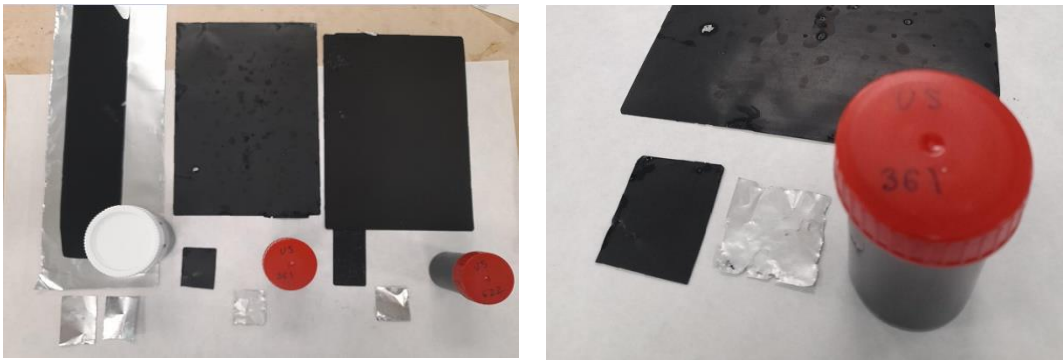


Figura 7. Imagen de las láminas de material NMC (811, 362, 622) antes y después de US

Tarea 4.3.
Electro-lixiviación de metales de los cátodos de baterías

Se desarrollaron y optimizaron protocolos de **electro-lixiviación** para conseguir una extracción **quasi selectiva** de metales críticos, utilizando soluciones salinas y ácidas, con el objetivo de minimizar el consumo de energía, reactivos y generación de residuos.

Los procesos se aplicaron en **una o dos etapas secuenciales** sobre los diferentes materiales y formatos. La configuración óptima buscaba maximizar la calidad de los lixiviados para la posterior recuperación, purificación y finalmente valorización como precursores reciclados.

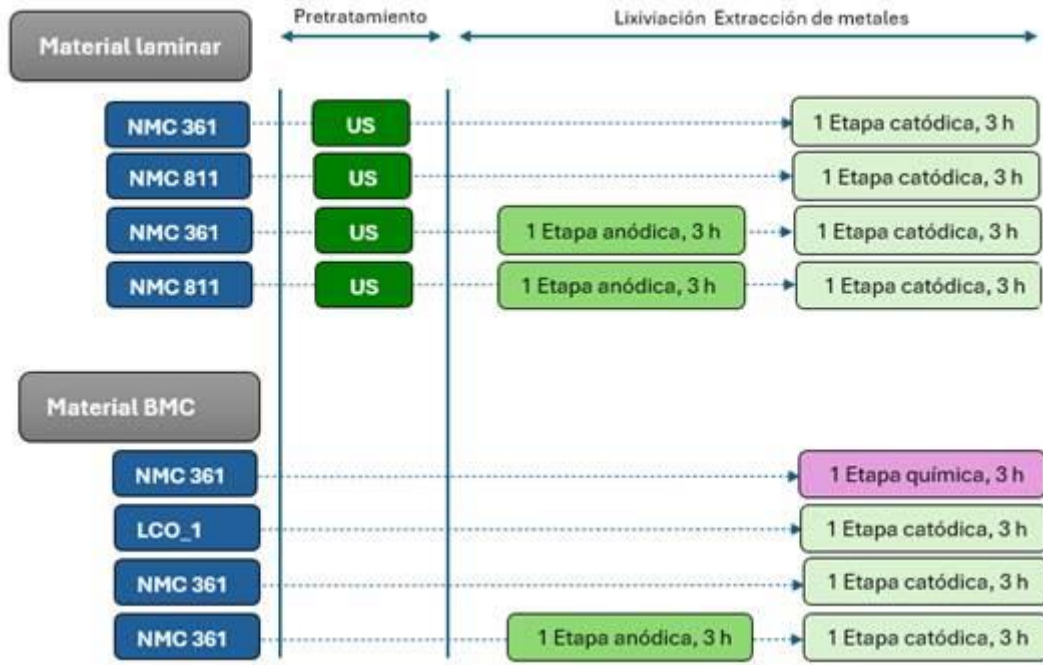


Figura 8. Esquema de proceso y secuencia para la extracción de metales del material activo en función de la presentación del material. Figura 15 en el informe original, E4.1

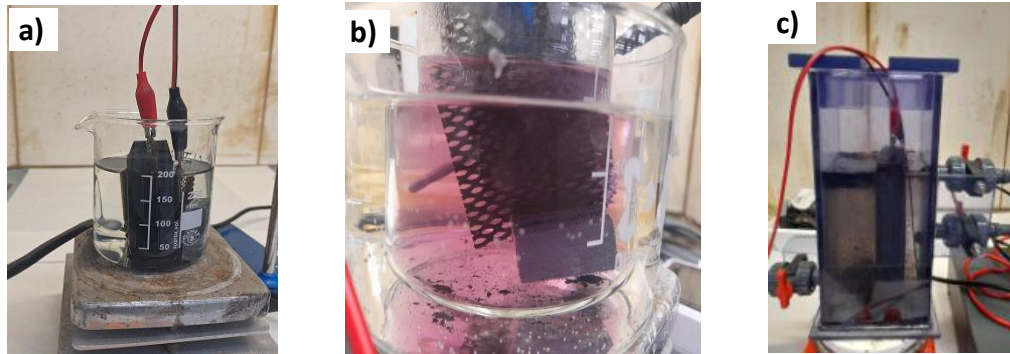


Figura 9. . Imágenes a y b) ensayo de eletrolixiviación en 2 etapas, c) ensayo electrolixiviación, escala semi V= 1 L, etapa anódica con separador membrana.

Tarea 4.4. Evaluación de los rendimientos de recuperación de metales

Se evaluaron los rendimientos de extracción alcanzados y se compararon con los objetivos propuestos en función del formato de presentación del material planteados en entregable E1.2 (Figura 29 en entregable original E.1.2).

Resumen de las Eficiencias Obtenidas en Extracción (Extracción Total %)

Tabla 7. Tabla de eficiencias adaptada de la Tabla11 en el informe original E4.1, página 39.

ENSAYO	MATERIAL	TRATAMIENTOS Y SECUENCIAS	Ni (%)	Li (%)	Co (%)	Mn (%)
4, 10, 11, 13	BMC 361	1 ETAPA, LIXIVIACIÓN QUÍMICA	44-60	98-100	45-60	35-39
34, 35	BM LCO_1	2 ETAPAS, ANÓDICA_CATÓDICA TOTAL	81-83	70-77	49-60	4-6
28 a 32	BMC 361	2 ETAPAS, ANÓDICA_CATÓDICA TOTAL	43-70	83-98	45-70	27-55
ENS 33	Lámina 361	2 ETAPAS, ANÓDICA_CATÓDICA TOTAL	69,56	92,38	50,31	51,22

Conclusiones Clave de los Rendimientos:

- **Litio (Li):** El Li mostró los mejores resultados, alcanzando consistentemente el objetivo del >90% de extracción en los procesos de **2 etapas** para el formato lámina y en la lixiviación química de *black mass*.
- **Níquel (Ni) y Cobalto (Co):** Los mejores rendimientos para Ni y Co se obtuvieron en el proceso de 2 etapas (Anódica\Catódica) para las láminas. En el *black mass*, los procesos de 1 etapa o 2 etapas resultaron efectivos, con extracciones del **43-83%** para el Ni y **45-71%** para el Co.
- **Manganeso (Mn):** El Mn se confirmó como el metal limitante en posteriores procesos de recuperación y preparación de precursores.

Finalmente, el proyecto identificó la necesidad de aplicar etapas de **concentración, precipitación y eliminación de impurezas** para acondicionar los lixiviados, buscando obtener óxidos de metales de transición y carbonato de Li como precursores reciclados para la reformulación de nuevos materiales catódicos.

PT5. Validación del proceso de reciclado desarrollado. (ITE_AIDIMME)

Tarea 5.1. Valorización del grafito reciclado y del cátodo reformulado como materiales anódico y catódico

En esta tarea se llevó a cabo la **evaluación del grafito recuperado** procedente de distintas fuentes (scrap de producción, scrap de celda y celdas en fin de vida). Para ello, se realizaron técnicas de caracterización estructural (DRX), vibracional (Raman), composición elemental (ICP-OES) y distribución de tamaño de partícula, con el fin de determinar el grado de orden, pureza y morfología del material obtenido (

Tabla 88).

La caracterización estructural se realizó mediante difracción de rayos X, observándose en todos los casos el pico característico (002) del grafito y confirmándose la conservación de la estructura laminar tras el proceso de recuperación.

Posteriormente, se realizó la identificación de defectos estructurales mediante espectroscopía Raman. Se obtuvieron las bandas D y G características, evidenciándose distintos niveles de desorden en función del origen del grafito.

Asimismo, se llevó a cabo la determinación del tamaño de partícula mediante difracción láser. Se observaron distribuciones en el rango adecuado para grafitos de ánodo y se identificaron diferencias asociadas al grado de degradación del material.

A partir de los grafitos recuperados, se prepararon los electrodos anódicos mediante slurry acuoso y se depositaron sobre colector de cobre. Tras el secado, se obtuvieron electrodos con espesores entre 47 y 54 μm y densidades dependientes del tipo de grafito recuperado.

Una vez preparados los electrodos, se ensamblaron semiceldas tipo pouch frente a litio metálico, sobre las que se realizó la evaluación electroquímica. Se midió la impedancia inicial, obteniéndose valores crecientes según el estado del grafito de origen. También se registraron las curvas de formación, destacando la eficiencia coulombica inicial de las fracciones procedentes de celda.

Finalmente, se evaluó el comportamiento bajo distintos C-rate y la ciclabilidad a C/2. Se observó que todas las fracciones recuperadas presentaron un comportamiento electroquímico funcional y reversible, confirmándose la validez del material para su reutilización en nuevas formulaciones de ánodo.

Tabla 8: Evaluación comparativa de las fracciones de grafito recuperado (propiedades fisicoquímicas y electroquímicas).

Fracción	Orden estructural (DRX)	Defectos (Raman)	Granulometría	Pureza química (ICP)	Rendimiento electroquímico	Aplicabilidad
TEP-SP	✓	✓	✓	✓	⚠	✓
TEP-SC	✓	✓	⚠	⚠	✓	✓
TEP-EoL	⚠	⚠	⚠	⚠	✓	⚠

Tarea 5.2. Validación del proceso hidrometalúrgico

La Tarea 5.2 del PT5 busca completar y validar un proceso sostenible para la recuperación de metales críticos del material catódico de baterías de ion litio.

El trabajo de AIDIMME profundizó en los procesos de acondicionamiento y recuperación selectiva (precipitación, cristalización y secado) de metales críticos (Li) y de transición (Ni, Mn, Co). La meta es la valorización de estos metales para preparar precursores reciclados, que ITE utilizará en la reformulación de material catódico y su posterior evaluación electroquímica en nuevas celdas de batería.

Este trabajo valida los procesos de reciclado electroquímico e hidrometalúrgico al comprobar la eficacia de la recuperación de metales críticos (Li, Ni, Mn, Co) de la *black mass* (NMC 361) y material activo presente en otros materiales catódicos (LCO_1).

Las principales acciones llevadas a cabo fueron:

- Diseño de equipamiento a escala de laboratorio (celdas) para aumentar la eficiencia en la extracción de metales de la *black mass* mediante electro-lixiviación.
- Diseño y aplicación de un proceso de recuperación sostenible que minimiza el consumo de energía, recursos y residuos.
- Recuperación de metales críticos en composiciones valorizables y evaluación de los rendimientos para su uso como precursores.

Tarea 5.2.1 Validación proceso hidrometalúrgico. Procesado Black mass

El objetivo de esta subtarea es el diseño de celdas para proceso de electrolixiviación black mass. Se diseñó y construyó un reactor (celdas de reacción) para mejorar la eficiencia de extracción de metales en los procesos de electro-lixiviación.

- **Fabricación y capacidades:** El proceso de diseño incluyó modelado 3D con SolidWorks y fabricación combinando tecnologías como Multi Jet Fusion (MJF) y FDM. Las celdas diseñadas tuvieron capacidades de trabajo de **150 ml y 1000 ml**.

- **Resultados:** Los ensayos realizados con este equipamiento y la *black mass* (NMC 361 y LCO_1) se presentan en el entregable del paquete PT4. Los lixiviados obtenidos fueron acondicionados en la siguiente tarea (5.2.2) para recuperar metales valorizables como precursores.

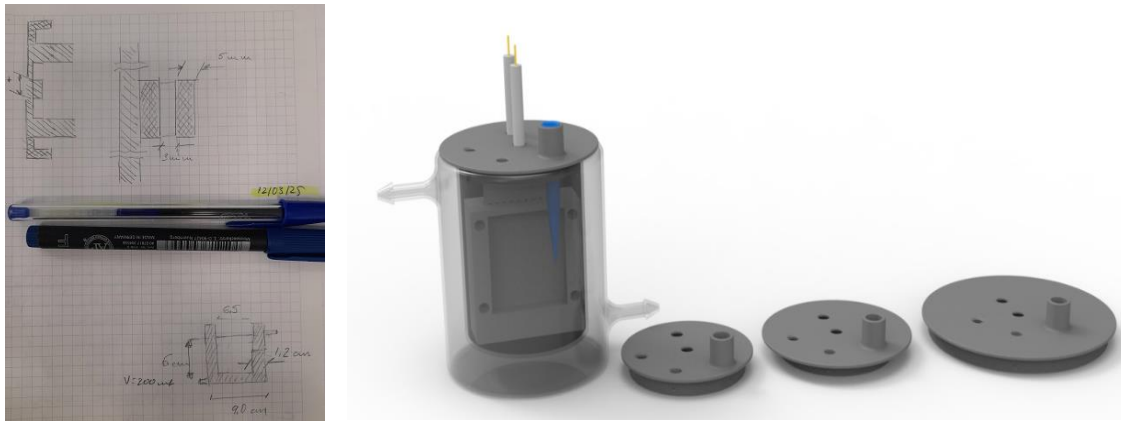


Figura 10 a) bocetos de los macos de separación/contención, b) los diseños realizados con SOLIDWORKS

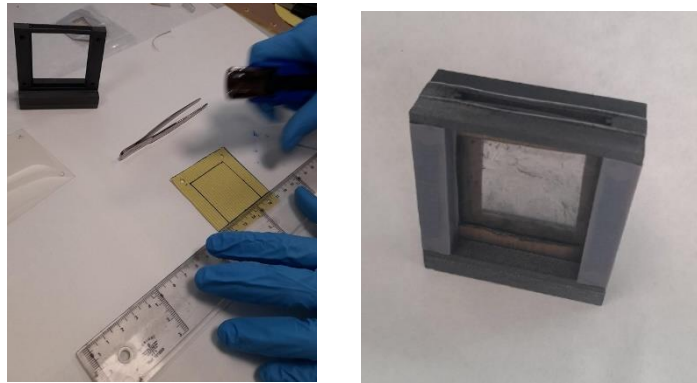


Figura 11 Montaje marco separador celda 150 ml



Figura 12. Marco y celda de electrolixiviación, capacidad 1 L fabricada en AIDIMME



Figura 13. Preparación ensayo electrolixiviación en celda 1L. imagen durante ensayo electrolixiviación en celda 1L, etapa anódica

Tarea 5.2.2. Metodología para la recuperación de metales extraídos.

El objetivo de esta tarea fue recuperar los metales de los lixiviados para usarlos como precursores en la síntesis de nuevos materiales catódicos tipo NMC.

Adaptación y acondicionamiento de las soluciones metálicas electro lixiviadas:

- Las soluciones lixiviadas inicialmente tenían concentraciones metálicas promedio de unos 4 g/L.
- Para optimizar la eficiencia de la precipitación posterior, se incrementó el contenido metálico mediante la mezcla de diferentes soluciones y un proceso de **concentración por evaporación**.
- Se prepararon cuatro muestras concentradas (LR1 a LR4), variando la concentración final de litio y metales de transición (Ni, Co, Mn).

Recuperación selectiva de los metales lixiviados (Ni, Co y Mn):

Se implementó un protocolo de **precipitación selectiva con NaOH¹** y se estableció un **esquema de precipitación en dos etapas** para garantizar la pureza:

1. **Etapla 1:** Se incrementa el pH hasta que precipitan y se eliminan las impurezas (Fe y Al).
 2. **Etapla 2:** Se incrementa el pH hasta 12 para obtener un precipitado compuesto por los metales de transición (Ni, Mn y Co).
 3. **Resultado final:** Una disolución final compuesta principalmente por Li.
- **Escalado:** Se verificó la viabilidad y reproducibilidad del proceso, escalándolo exitosamente desde 10 mL hasta 200 mL de concentrado sin diferencias aparentes en el rendimiento de los metales recuperados.
 - **Purificación** Se estudiaron diferentes tratamientos térmicos y de purificación con el fin de maximizar el rendimiento y la pureza del sólido recuperado.
 - **Uso como precursores:** Los materiales recuperados y purificados se emplearon como precursores clave en la síntesis de nuevos materiales catódicos de tipo NMC.

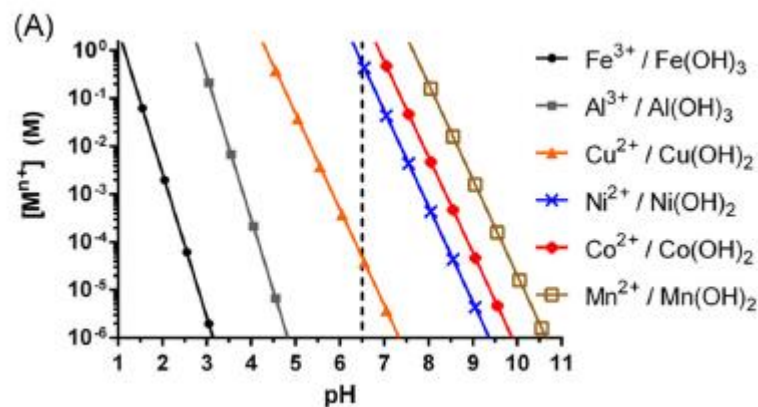


Figura 14. Solubilidad de los hidróxidos metálicos a diferentes pH

¹ T, Gourley SW, Kaliyappan K, Yu A, Chen Z. Recycling of mixed cathode lithium-ion batteries for electric vehicles: Current status and future outlook. Carbon Energy. 2020; 2: 6–43. <https://doi.org/10.1002/cey2.29>

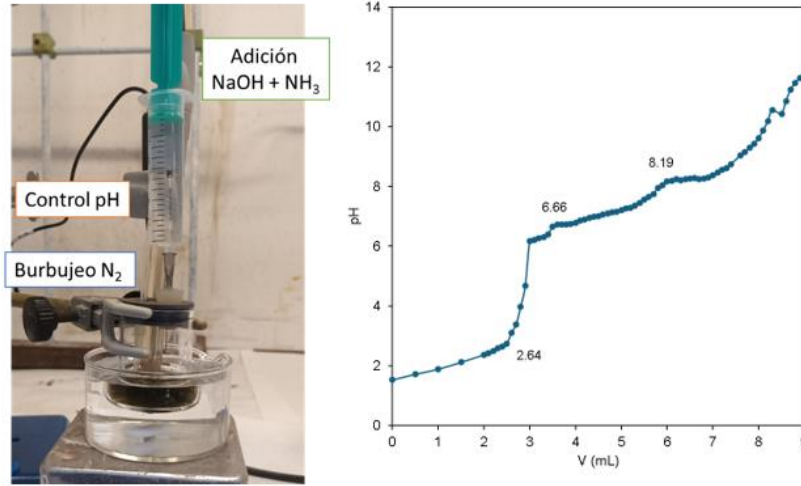


Figura 15. Imagen del diseño experimental utilizado para la precipitación de los metales y curva de pH obtenida durante la precipitación de los metales de transición. Condiciones de tratamiento: 10 mL de concentrado LR1, adición de NaOH y NH₃

Recuperación selectiva del litio lixiviado

- Tras la precipitación selectiva de los metales se optimizó un protocolo de **precipitación selectiva de Li con Na₂CO₃**.
- **Purificación:** Se estudiaron diferentes tratamientos de purificación con el fin de maximizar el rendimiento y la pureza del sólido recuperado.
- **Uso como precursor:** Los materiales recuperados y purificados se emplearon como precursores clave en la síntesis de nuevos materiales catódicos de tipo NMC.

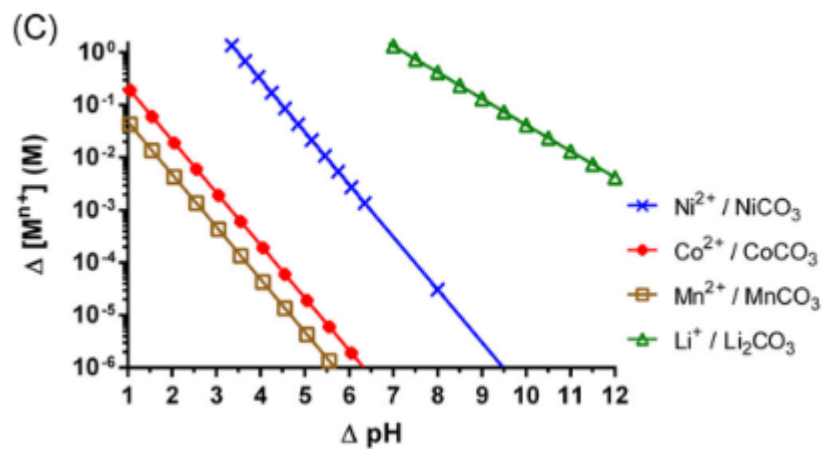


Figura 16. Dependencia de la solubilidad del Li₂CO₃ con el pH (2)

(2) T, Gourley SW, Kaliyappan K, Yu A, Chen Z. Recycling of mixed cathode lithium-ion batteries for electric vehicles: Current status and future outlook. Carbon Energy. 2020; 2: 6–43. <https://doi.org/10.1002/cey2.29>.

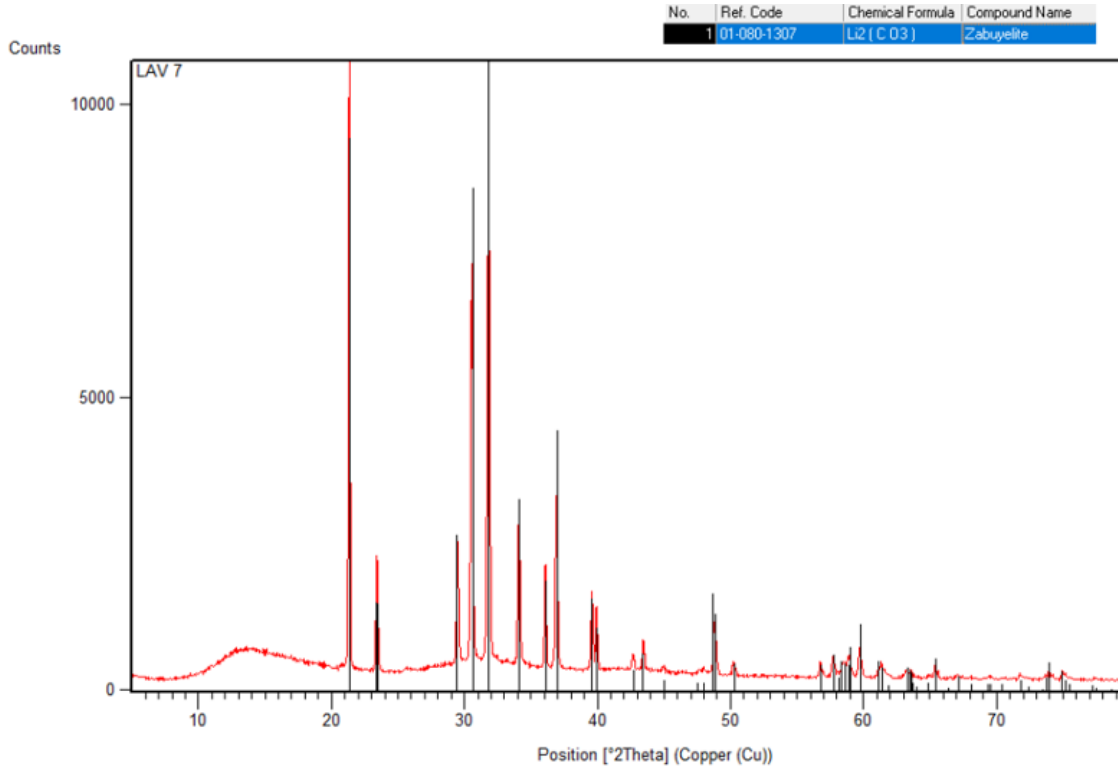


Figura 17. Difracto grama de Li precipitado con Na_2CO_3 tras el lavado

Tabla 9. Rendimientos y porcentaje de recuperación del Li utilizado como material reciclado para la fabricación de nuevos cátodos.

Material Reciclado	Concentrado	m_{Li} (g)	m_{lav} (g)	$m_{\text{teórica}}$ (g)	% Recuperado
1	LR2	18.8	2.2	4.5	49.2

Recuperación Li	
Li (%)	Li_2CO_3 (%)
16.4	88.1

Conclusiones de la Tarea 5.2.

- Se definieron las etapas y especificaciones básicas para la recuperación de metales en los lixiviados obtenidos por electro-lixiviación del material catódico.
- Se diseñó equipamiento (celdas) para el proceso de electrolixiviación del material activo en formato *black mass*.
- AIDIMME desarrolló y ensayó un **proceso integral** para la recuperación de metales críticos (Ni, Co, Mn, Li) presentes en el material catódico como precursores reciclados para la reformulación de nuevo material catódico.
- Los rendimientos de extracción del material *black mass* (trabajando con relaciones S/L hasta 100 g/L) se acercan a los objetivos propuestos para Ni y Li, mientras que el Mn se habría alcanzado y el Co se sitúa un 10% por debajo del objetivo.
- Los **rendimientos globales** de recuperación de metales, considerando las etapas de acondicionamiento, precipitación y purificación del material catódico recuperado de las baterías de ion-litio, han alcanzado valores cercanos al **80 % para los metales de transición (Ni, Co y Mn)**, con una **pureza superior al 90 %**. En cambio, para el **litio** se obtuvieron rendimientos en torno al **50 %**, con una **pureza aproximada del 88 %** en su forma salina como carbonato de litio (Li_2CO_3).

El desarrollo del trabajo realizado en la tarea 5.2 puede verse en el informe original **E5.2 Informe de validación del proceso hidrometalúrgico**.

Tarea 5.3. Valorización de metales extraídos. Reformulación de material catódico

En esta tarea se llevó a cabo la resíntesis de materiales catódicos NMC811 empleando diferentes fracciones de precursores reciclados. Se trabajó con mezclas de óxidos (REC-1), hidróxidos (REC-2) y carbonato de litio reciclado (REC-Li), ajustando la estequiometría en función de la fracción reciclada utilizada.

Para cada formulación se prepararon las mezclas sólidas, se homogenizaron y posteriormente se sometieron a calcinación con el fin de obtener la fase laminar tipo R-3m. Se obtuvieron tres cátodos resintetizado: CAT-R1, CAT-R2 y CAT-R3, con distinto grado de pureza y homogeneidad según el precursor empleado.

La caracterización estructural mediante DRX permitió determinar el grado de orden de la fase laminar sintetizada. Se observó que CAT-R2 presentó la mayor cristalinidad y el menor cation mixing, mientras que CAT-R3 mostró señales ensanchadas y desorden estructural asociado a la variabilidad del precursor.

A través del análisis por difracción láser se evaluó la distribución de tamaño de partícula. Se observaron distribuciones homogéneas en CAT-R1, bimodales compactas en CAT-R2 y más amplias y heterogéneas en CAT-R3.

La microestructura superficial se analizó mediante SEM–EDS, identificándose superficies más compactas en CAT-R2 y más irregulares y con impurezas detectables en CAT-R3.

Tras la caracterización del polvo, se prepararon electrodos catódicos mediante slurry con PVDF y se recubrieron sobre aluminio. Se obtuvieron recubrimientos con diversas densidades, evidenciando el efecto del precursor reciclado en la compactación del electrodo.

Posteriormente se ensamblaron semiceldas tipo pouch y se midieron sus resistencias internas. Se observó que CAT-R1 presentó la impedancia más baja, seguida de CAT-R2, mientras que CAT-R3 no pudo ciclarse debido a su alta resistencia inicial.

Finalmente, se realizaron ciclos de formación y ensayos C-rate. Se obtuvo la mayor eficiencia inicial (90 %) y la mejor recuperación de capacidad en CAT-R2, confirmando que el empleo de precursores reciclados de mayor pureza y estabilidad permite obtener materiales con rendimiento comparable a los comerciales.

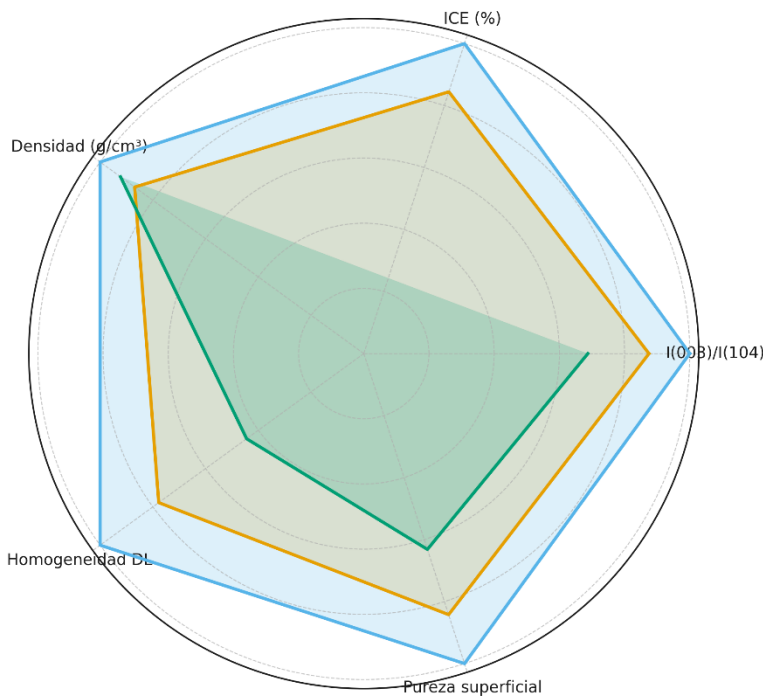


Figura 18: Representación global normalizada de las propiedades fisicoquímicas y electroquímicas de los cátodos resintetizado (CAT-R1, CAT-R2 y CAT-R3), incluyendo cristalinidad $I(003)/I(104)$, eficiencia coulombica inicial (ICE), densidad del electrodo, homogeneidad granulométrica y pureza superficial evaluada por SEM–EDS.

El desarrollo del trabajo realizado en la tarea 5.3 puede verse en el informe original **E5.3 Informe de evaluación de valorización de los metales recuperados del material catódico**.

3. VALIDACIÓN LAS EMPRESAS COLABORADORAS

Con los resultados obtenidos y las capacidades desarrolladas en el marco del proyecto RECILION se han llevado a cabo reuniones bilaterales con las empresas colaboradoras y otras entidades potencialmente interesadas, con el objetivo de presentar los avances tecnológicos y explorar su aplicación en procesos industriales relacionados con el reciclaje de baterías de ion-litio. Estas acciones han permitido transferir conocimiento científico-técnico al tejido empresarial vinculado a la gestión de residuos y la recuperación de materiales críticos, generando interés en soluciones innovadoras que contribuyen a la economía circular y a la sostenibilidad del sector energético.

EL PROYECTO CONTÓ CON 5 ENTIDADES CON POTENCIAL INTERÉS, PRESENTANDO LA IDEA DE PROYECTO Y, ANALIZANDO SUS NECESIDADES Y POSIBLE EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL PROYECTO. A CONTINUACIÓN, SE INDICAN ACCIONES REALIZADAS Y EVIDENCIAS DE LAS EMPRESAS COLABORADORAS Y/O INTERESADAS CON LAS QUE AIDIMME TRABAJÓ.

Acción de transferencia y promoción de resultados	Fecha realización	Empresas de la Comunitat Valenciana beneficiarias de la acción
Reunión individual – presentación avances	20/02/2025	GITICSA
Reunión individual – presentación avances	21/02/2025	SUCESORES DE LEONARDO GARCIA
Reunión individual – presentación avances	25/06/2025	GITICSA
Reunión individual – Entrega muestras	30/07/2025	GITICSA
Reunión individual – Acuerdo de Entrega de muestras	30/07/2025	SUCESORES DE LEONARDO GARCIA
Reunión individual – Presentación resultados	06/10/2025	José Jareño (empresa interesada no participante en el proyecto)

A CONTINUACIÓN, SE MUESTRA UNA EXPLICACIÓN MÁS DETALLADA DE LO APORTADO EN LA TABLA DE ACCIONES DE TRANSFERENCIA Y VALIDACIÓN:

GITICSA

20/02/2025

Visita a las instalaciones de AIDIMME y presentación de los avances del proyecto. La empresa confirma su participación en los paquetes de trabajo PT1 'Identificación y selección de residuos de interés para la empresa en el marco del proyecto', PT4 'Suministro de material para ser testado en el proyecto' y PT7 'Evaluación de viabilidad de implantación de los resultados obtenidos.



25/06/2025

GITICSA SERVICIOS INDUSTRIALES Y AIDIMME mantuvieron una reunión en las instalaciones de la empresa en Pol.Ind Masía de Conde. Técnicos de AIDIMME, entidad que desarrolla el proyecto en colaboración con el Instituto Tecnológico de la Energía (ITE), se desplazaron para presentar los avances alcanzados y compartir los resultados obtenidos hasta el momento en las distintas etapas del proceso de extracción y recuperación de metales contenidos en baterías de ion litio, correspondientes con los paquetes PT4 y PT5.



Durante la sesión se expusieron los progresos técnicos logrados, destacando la eficiente recuperación de metales estratégicos como litio, cobalto y níquel. La empresa muestra interés en la marcha del proyecto, la optimización de los procesos y en el análisis del potencial de valorización de los materiales recuperados.

30/07/2025

En la reunión, en las instalaciones de la empresa, se muestra una presentación del estado de las fases ya finalizadas, de las que están en curso y de las programadas. Se propone a la empresa la aportación de información de cantidades y procedencia (equipos) de los residuos que gestiona, de determinado LER, para concretar cuál es el mejor recurso para aportarlo a la investigación.

De común acuerdo, GITICSA STI aporta un residuo de batería de ion Litio procedente de ordenador para posible identificación y evaluación en el proyecto, así como los datos requeridos en la documentación suministrada por AIDIMME. También se acuerda mantener una nueva reunión para actualizar información cuando el estado del proyecto pueda aportar conclusiones sobre la consecución de los objetivos previstos, y eficiencias alcanzadas.



Imágenes trabajo con muestras de GITICSA

Sucesores de Leonardo García S.L.

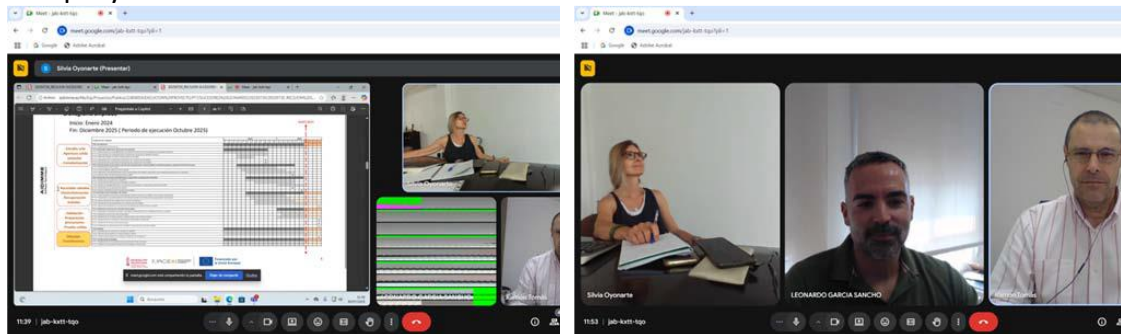
21/02/2025

Visita a las instalaciones de la empresa en Silla y presentación de los avances del proyecto. La empresa confirma su participación en los paquetes de trabajo PT1 'Identificación y selección de residuos de interés para la empresa en el marco del proyecto', PT4 'Suministro de material para ser testado en el proyecto' y PT7 'Evaluación de viabilidad de implantación de los resultados obtenidos.



30/07/2025

Sucesores de Leonardo García, S.L. y AIDIMME mantienen una reunión on line con la finalidad de actualizar la información sobre los progresos realizados hasta la fecha, así como de informar, difundir y transferir los conocimientos derivados de los avances obtenidos en el proceso de separación, extracción y recuperación de metales planteados en el proyecto RECILION.



En la reunión se realiza la presentación del estado del proyecto. Se propone a la empresa la aportación de datos sobre la naturaleza y materiales de los residuos que contienen litio que gestiona y su procedencia (equipo), para determinar cuál es el mejor recurso para aportarlo a la investigación.

De común acuerdo, Sucesores de Leonardo García, S.L. aportará un residuo de batería de ion Litio procedente de ordenador para posible identificación y evaluación en el proyecto, así como los datos requeridos en la documentación suministrada por AIDIMME. También se acuerda mantener una nueva reunión para actualizar información cuando el estado del proyecto pueda aportar conclusiones sobre la consecución de los objetivos previstos, y eficiencias alcanzadas.



Imágenes trabajo con muestras de Sucesores de Leonardo

José Jareño (empresa interesada no colaboradora)

La responsable de calidad de la empresa José Jareño S.A. y AIDIMME se reúnen en las instalaciones de la empresa, en el Puig. La empresa se encuentra en línea, por su actividad, con los objetivos del proyecto, y muestra su interés en el alcance del presente proyecto RECILION. Se trata de una empresa que apuesta por la economía circular y la gestión responsable de los residuos, disponiendo de la autorización para almacenaje de diferentes residuos entre los que se encuentran las baterías de ion Litio.



El propósito de la reunión es informar de los objetivos planteados, estado actual de desarrollo del proyecto y su liason con el proyecto CIMERAI, en el que la empresa participó como empresa colaboradora e interesada en las tecnologías y posible valorización de residuos de placas de circuitos electrónicos

La empresa no está en el listado de empresas colaboradoras en el proyecto RECILION. Se acuerda mantenerla informada de los avances y resultados del proyecto, lo que supone participar en el paquete de trabajo PT7 'Evaluación de viabilidad de implantación de los resultados obtenidos para su encajen en la actividad de la empresa'. También se informa que se trata de un proyecto subvencionado con fondos FEDER, a través del Instituto Valenciano de Competitividad Empresarial (IVACE + i).

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos suponen un avance en el desarrollo de un proceso integral y sostenible para el reciclado de baterías de ion-litio (Li-ion), validando la **viabilidad técnica y electroquímica** de la recuperación de **grafito de ánodo** y la obtención de **precursores de cátodo** de alta pureza a partir del **material activo del cátodo**.

Estos resultados abren una puerta para que en futuros estudios se continúen **analizando la optimización de los rendimientos de extracción de litio** y la **escalabilidad** de la tecnología electro-hidrometalúrgica a nivel semi-industrial, incorporando distintas químicas y formatos de batería.

Se ha de **continuar con la aplicabilidad** en la integración de estos materiales reciclados en **cadena de suministro** reales para la fabricación de nuevas celdas, cerrando el ciclo de vida de las baterías de manera eficiente.

1. Conclusiones sobre el Trabajo Realizado por AIDIMME

AIDIMME se centró en la **recuperación y valorización de los metales estratégicos del cátodo** (material activo), siendo el responsable principal del Paquete de Trabajo 4 (PT4: Reciclado hidrometalúrgico del cátodo) y un colaborador clave en el Paquete de Trabajo 5 (PT5: Validación del proceso).

Las principales conclusiones relacionadas con su labor son:

- **Proceso Integral Validado:** AIDIMME desarrolló y ensayó un **proceso integral electro-hidrometalúrgico sostenible** para la extracción y recuperación de los metales críticos (Ni, Co, Mn, Li) presentes en el material catódico (principalmente química **NMC**).
- **Recuperación como Precursores:** El trabajo se orientó a la **recuperación selectiva de metales** (mediante acondicionamiento, precipitación, cristalización y secado) para obtener **precursores reciclados**.
- **Altos Rendimientos de Metales de Transición:** Los rendimientos globales de recuperación de metales, considerando todas las etapas del proceso, alcanzaron valores cercanos al **80% para los metales de transición (Ni, Co y Mn)**, con una **pureza superior al 90%**.
- **Rendimiento del Litio:** Para el **Litio (Li)**, se obtuvieron rendimientos en torno al **50%**, alcanzando una pureza aproximada del **88%** en su forma salina como carbonato de litio ().

- **Validación de Material:** Se demostró que el uso de precursores reciclados, una vez reformulados en nuevo material catódico (CAT-R2), ofrece un **rendimiento electroquímico comparable al de los materiales comerciales**, confirmando la viabilidad del proceso.

Respecto al proceso aplicado al Material Catódico

El proceso desarrollado por AIDIMME para el material catódico (centrado en la química NMC) priorizó la **separación semi-selectiva de metales** y se estructuró en tres etapas principales:

1. **Acondicionamiento / Pretratamiento:** Esta etapa se adaptó al formato del material catódico:
 - Para **lámina catódica**, se utilizó la aplicación de **ultrasonidos (US)** para mejorar la separación semi-selectiva.
 - Para la **black mass (BM)**, se propuso un **tratamiento térmico** para eliminar el aglutinante (*binder*) y facilitar la extracción posterior de los metales.
2. **Extracción de Metales:** Se empleó la técnica de **Electro-lixiviación** como método principal para extraer metales críticos (Li, Co, Ni, Mn).
3. **Valorización y/o Recuperación:** Los lixiviados obtenidos fueron tratados mediante procesos de **precipitación, cristalización y secado** para recuperar los metales críticos en composiciones valorizables, listos para la **reformulación de precursores catódicos**.

La validación de este proceso se realizó con *black mass* (NMC 361), donde los rendimientos de extracción se acercaron a los objetivos propuestos para Níquel (Ni) y Litio (Li), el Manganeseo (Mn) fue alcanzado, y el Cobalto (Co) se situó ligeramente por debajo del objetivo.

AIDIMME

Instituto Tecnológico

Domicilio fiscal —

C/ Benjamín Franklin 13. (Parque Tecnológico)
46980 Paterna. Valencia (España)
Tlf. 961 366 070 | Fax 961 366 185

Domicilio social —

Leonardo Da Vinci, 38 (Parque Tecnológico)
46980 Paterna. Valencia (España)
Tlf. 961 318 559 - Fax 960 915 446

aidimme@aidimme.es
www.aidimme.es