

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**RECUPERACIÓN DE METALES NO
FÉRRICOS EN LA FRACCIÓN FINA DE LA
ESCORIA DE INCINERACIÓN: ESTUDIO
PRELIMINAR**

**(Recovery of non-ferrous metals of the fine
bottom ash: Preliminary Assesment)**

Para acceder al Título de

Graduado en Ingeniería Química

Autor: Eduardo Frank Huingo Chuquihuanga

El presente Trabajo Fin de Grado se enmarca dentro del convenio de colaboración de Tratamiento Integral de Residuos de Cantabria S.L.U. y el Departamento de Ingenierías Química y Biomolecular de la Universidad de Cantabria para del estudio de viabilidad técnica-económica para la Recuperación de Metales no férricos de la escoria de incineración generada durante la Valorización energética de residuos. Dicha colaboración se encuentra apoyada económicamente por el programa de Fomento de la Transferencia Tecnológica de SODERCAN (ref. TF16-XX-002 SODERCAN/FEDER).

La ejecución de este Trabajo se ha desarrollado durante unas prácticas de carácter extra-curricular en Tratamiento Integral de Residuos de Cantabria S.L.U.

Agradecimientos

A mi familia por su infinito cariño y apoyo constante en este largo camino. A mi padre por todo. A mi prima por su incondicionalidad de madre. Y a los que están un poco más lejos.

A mis tutores en la ejecución de este Trabajo Fin de Grado. Al profesor Ángel Irabien por su enseñanza y dirección tanto en este trabajo como durante mis prácticas en la Consejería de Medio Ambiente y en Tircantabria S.L.U. A Isabel García, por su dirección en la ejecución de este trabajo, su infinita ayuda y cercanía.

A Tircantabria S.L.U. por permitirme formar parte de este proyecto desde sus instalaciones durante nueve meses. A Diego Ansótegui por acogerme en su departamento y por darme constantemente la oportunidad de aprender implicándose en la enseñanza y por darme la oportunidad de emprender mi desarrollo profesional. A Jesús Gómez por su permanente interés en instruirme y su compañerismo. A todo el equipo.

A todos mis amigos, compañeros de piso y demás personas que me han acompañado, y a los que lo siguen haciendo, durante toda esta primera etapa.

1. Introducción.....	7
1.1. Antecedentes.....	7
1.2. Gestión de residuos	9
1.3. Valorización Energética y potencial recuperación de materiales	14
1.4. Objetivos y Antecedentes	16
1.5. Descripción de la Planta de Tratamiento Integral de Residuos de Cantabria	17
1.6. Generación de escorias de incineración en TIRCANTABRIA	27
1.7. Plan de Toma de muestras del rechazo de escoria fina.....	29
1.8. Contenido de metales no férricos en la fracción fina de escorias de rechazo de TIRCANTABRIA	31
1.9. Tecnologías de recuperación de metales no férricos de la fracción fina de rechazo de la escoria de incineración	35
1.10. Evaluación de la viabilidad técnica	45
2. Conclusiones	51
3. Bibliografía.....	53
4. Anexos	56

Listado de figuras y tablas

Listado de figuras

Figura 1. Jerarquía de producción y gestión de Residuos.

Figura 2. Modelo de Economía Circular.

Figura 3. Principales operaciones de tratamiento de residuos.

Figura 4. Operaciones de tratamiento de residuos en España.

Figura 5. Modelo Integrado de Gestión de Residuos.

Figura 6. Diagrama de bloques de la Planta de Tratamiento Integral de Residuos de Cantabria.

Figura 7. Diagrama de Bloques de la Planta de Valorización Energética.

Figura 8. Diagrama de bloques de la Planta de Valorización de Escorias.

Figura 9 Flujo de entrada frente al flujo tratado en la Planta de Valorización de Escorias durante los meses del año 2016.

Figura 10. Destino de flujos de salida de la Planta de Valorización de Escorias.

Figura 11. Metales no férricos de interés.

Figura 12. Cuarteo y recogida de muestra de laboratorio.

Figura 13. Composición de metales no férricos en los meses de invierno.

Figura 14. Separador inductivo Eddy Current.

Figura 15. Hidrociclón y Separador Jig.

Figura 16. Esquema MDS, separación en fracción pesada y ligera (Muchová, 2010).

Figura 17. Separador LIBS.

Figura 18. Diagrama de XRT (Gundupalli et al., 2017).

Listado de tablas

Tabla 1. Cuantificación de los flujos de escorias en el 2016

Tabla 2. Distribución másica de las escorias generadas en el 2016.

Tabla 3. Contenido estimado de metales no férricos de interés para el año 2016

Tabla 4. Contenido anual de metales en las escorias finas de TIRCANTABRIA.

Tabla 5. Tecnologías para la separación de metales de escorias de incineración.

Tabla 6. Principales características de funcionamiento de las tecnologías estudiadas.

Tabla 7. Tecnologías con mayor grado de desarrollo para la recuperación de metales no férrico.

Tabla 8. Datos obtenidos en la Planta de Sluiskil, Holanda.

Tabla 9. Cantidad de metal no férrico que se recupera con el método ADR de la fracción 0-6mm de TIRCANTABRIA.

Tabla 10. Contenido de metales no férricos en la fracción 0-6mm de Tircantabria.

Tabla 11. Datos de recuperación de metales en la planta piloto de AEB.

Tabla 12. Estimación de recuperación de metales no férricos según separación húmeda de AEB aplicado al flujo de TIRCANTABRIA.

Tabla 13. Datos de recuperación de metales no férricos según método MDS.

Tabla 14. Estimación de recuperación de metales no férricos según método MDS aplicado al flujo de TIRCANTABRIA.

Tabla 15. Estimación de recuperación de metales no férricos de TIRCANTABRIA según tecnologías más desarrolladas.

1. Introducción

1.1. Antecedentes

La política actual de la Comunidad Europea se centra en la adopción de un nuevo modelo de crecimiento económico basado en el uso eficiente de los recursos y la reducción del impacto sobre el medioambiente y la salud. Este nuevo enfoque está cimentado en el principio de jerarquía en la producción y gestión de residuos, identificando así las mejores estrategias de gestión y transformando a la Unión Europea en una “sociedad del reciclado” y contribuyendo a la lucha contra el cambio climático (Ley 22/2011).

En este marco, se prioriza la estrategia de prevención de generación de residuos como la mejor vía para su gestión, seguida de la preparación para la reutilización, el reciclado, y otras formas de valorización incluida la energética (Unión Europea 2008), y por el último la eliminación (Figura 1).



Figura 1. Jerarquía de producción y gestión de Residuos.

De esta forma se pretende sustituir el modelo lineal actual que no asume que los recursos son limitados, que no valora su accesibilidad y no distingue su naturaleza en su eliminación como residuos, por un modelo de economía circular (Figura 2). De este modo, los recursos que contienen los residuos son recuperados y reintroducidos al proceso productivo para la obtención de nuevos productos (PEMAR, 2016), disociando

así el crecimiento económico de la generación de residuos, evitando la pérdida de materiales valiosos y la degradación del medio ambiente.

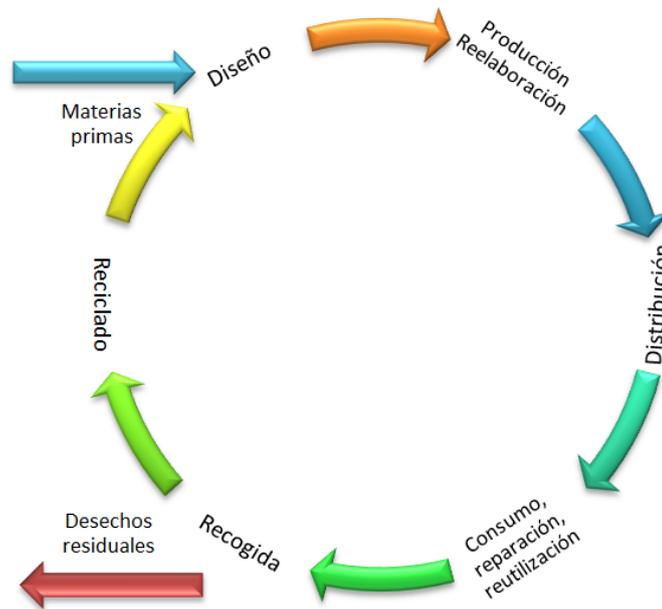


Figura 2. Modelo de Economía Circular.

Asimismo, la Hoja de Ruta hacia una Europa eficiente en el uso de los recursos (Unión Europea, 2011), apuesta por conducir a Europa hacia una economía competitiva respetuosa con “las restricciones de recursos y límites del planeta”. Este documento plantea la gestión de los residuos como un componente central y propone el manejo de los residuos como recursos con la finalidad de estimular el “reciclado de alta calidad”.

En este sentido, se considera necesaria la búsqueda y el desarrollo de nuevos procesos para la recuperación de materiales secundarios presentes en los diferentes flujos de residuos y el impulso de los mercados de subproductos (i.e. sustancias generadas en un proceso cuyo objetivo principal no era la producción de dicha sustancia, Ley 21/2011).

La adopción de esta política en el marco autonómico se recoge en el Plan de Residuos de Cantabria 2017-2023, entre cuyas actuaciones se contempla el desarrollo de mercados específicos de productos recuperados a partir de residuos (Gobierno de Cantabria, 2017).

1.2. Gestión de residuos

La ley estatal de residuos, en transposición de la Directiva Europea 98/2008/CE, define la actividad de gestión de residuos como la recogida, el transporte y el tratamiento de residuos, su vigilancia y el mantenimiento posterior al cese de operaciones en el caso de los vertederos (Ley 22/2011).

De este conjunto de actividades, la recogida y el transporte de residuos representan la fase más costosa, pudiendo ser enviados directamente a los centros de tratamiento o a plantas de transferencia donde se compactan, almacenan temporalmente y se cargan en camiones de mayor capacidad y adecuados para el transporte a los puntos de tratamiento definidos (André, 2006).

Po otro lado, se limita el flujo de residuos municipales a los residuos generados en los hogares como consecuencia de las actividades domésticas y los residuos de naturaleza y composición similares a los residuos domésticos.

En Europa, la generación de residuos municipales no representa una fracción mayoritaria dentro del total de residuos. En el año 2012, se generaron 2.515 millones de toneladas de residuos, de los cuales 213,4 millones de toneladas correspondieron al sector doméstico, esto supuso sólo un 8,5% del total.

Por su parte, según la Oficina de estadística de la Comisión Europea, en España la contribución a la generación de residuos del sector doméstico es un poco mayor. De las 118,6 millones de toneladas generadas en el 2012, el 17,9% correspondió al generado en los hogares, es decir, 21,2 millones de toneladas.

Sin embargo, pese a no ser un flujo mayoritario dentro de la generación total de residuos, el aumento de la tasa de generación y su complejidad han hecho que la gestión de residuos municipales se haya convertido en un campo de estudio cada vez más recurrente.

La prácticas de recolección sin clasificar y posterior eliminación en vertederos no controlados están dando paso a sistemas integrados más sostenibles, que pretenden proporcionar un equilibrio entre las estrategias de prevención, técnicas de tratamiento

para el reciclaje de materiales, procesos biológicos y térmicos con recuperación energética (Arena, 2012).

1.2.1. Tratamiento de residuos

El tratamiento de residuos es la fase en la que, tras ser recogido y transportado, este se somete a una o a un conjunto de operaciones para conseguir su valorización, en forma de recuperación de materiales o energía, o en su defecto la eliminación (Ley 22/2011).

A pesar de los avances que se han ido desarrollando en el tratamiento de residuos, todavía casi la mitad de los residuos generados finalizan su vida en los vertederos. En el 2012, de los 2.306 millones de toneladas de residuos tratados, 1.112 millones fueron destinados a la eliminación en vertederos o arrojados al mar (Eurostat, 2015).

En la actualidad, existen cuatro operaciones habituales de tratamiento de residuos municipales (Figura 3), pudiendo realizarse de forma complementaria entre sí (Comisión europea, 2011): reciclaje, compostaje/digestión, relleno sanitario, incineración (con y sin recuperación de energía).

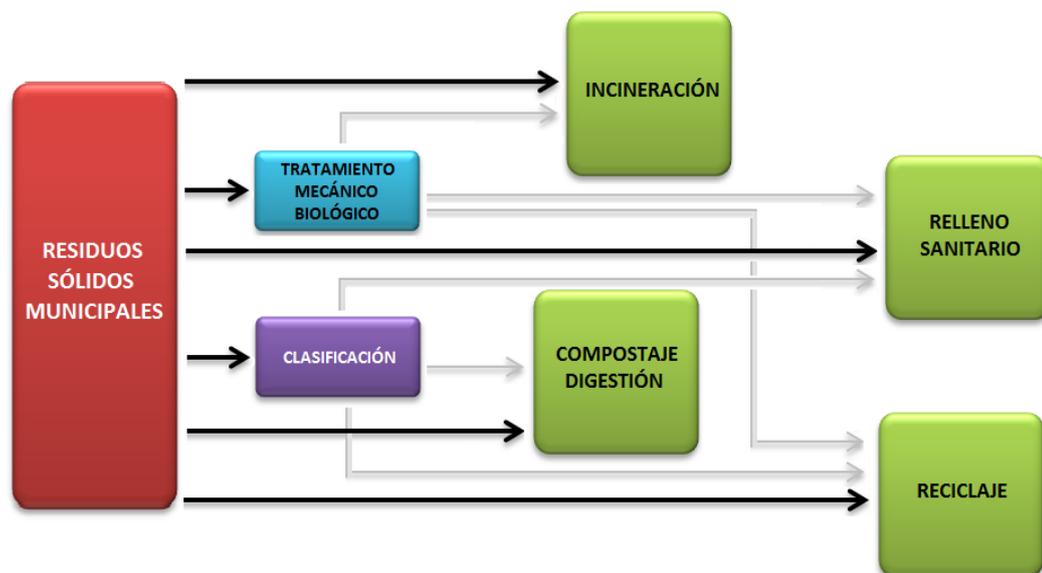


Figura 3. Principales operaciones de tratamiento de residuos (Comisión Europea, 2016).

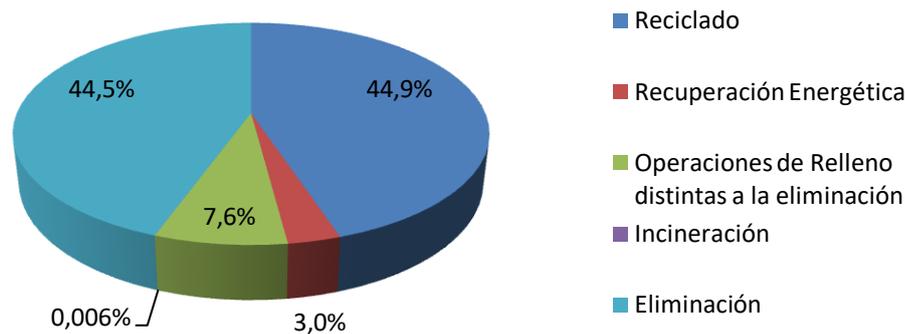


Figura 4. Operaciones de tratamiento de residuos en España (Eurostat, 2015).

En España, de las 108,48 millones de toneladas tratadas, 48,26 millones fueron eliminadas, cifra que representa un impactante 44,5% del total. Por su parte, 48,75 millones fueron destinados a operaciones de reciclaje, 3,28 millones fueron sometidos a procesos térmicos de los cuales 7 mil toneladas fueron incineradas sin recuperación de energía (Eurostat, 2015). Los porcentajes asociados a estas cifras se recogen en la figura 4.

El tratamiento de reciclaje se define como la operación de recuperación donde los materiales de desecho son reconvertidos en productos, materiales o sustancias, ya sea para el propósito original o de otro tipo. Es importante señalar que el tratamiento de compostaje queda incluido dentro de las operaciones de reciclaje, sin embargo, la valorización energética, las operaciones para la obtención de materiales con finalidad de combustible o para el depósito en vertedero no computan como tal.

El tratamiento de compostaje o digestión se define como el tratamiento aerobio o anaerobio que se aplica a los residuos biodegradables, produciendo compost, donde el producto que se obtiene podrá utilizarse para el tratamiento de tierras, en beneficio de la agricultura y mejora de suelos (Comisión Europea, 2016). Por su parte, el relleno sanitario o depósito en vertedero se define como el depósito de residuos en el interior o sobre la superficie de una zona habilitada. A su vez, la incineración de residuos municipales se define como “la oxidación de las materias combustibles contenidas en el residuo, generando gases de combustión que contienen la mayoría de la energía de combustión disponible en forma de calor” (MTD, 2011). Este tratamiento puede ser ejecutado con o sin recuperación de energía, para el primer caso, el flujo podrá ser

incinerado directamente o tras pasar por un proceso de pre tratamiento en el que se recupera material para ser empleado como combustible secundario (Comisión Europea, 2016). Asimismo, se considerará operación de valorización energética siempre que sea producida con un nivel de eficiencia energética que sea igual o superior al valor que establece la normativa estatal vigente (Ley 22/2011).

1.2.2. Marco legal

Normativa Europea:

La Directiva 2008/98/CE, conocida como “Directiva Marco de Residuos”, representa el marco legal comunitario para la gestión de los residuos. Establece una orden de jerarquía en las estrategias de gestión, con el objetivo de asegurar la protección del medio ambiente y la salud humana, que deberá ser adoptada por los estados miembros. Para su ejecución establece la obligación de la consecución de una serie de objetivos en materia de reutilización, reciclado y valorización.

Asimismo, establece la definición de subproducto y define los criterios específicos del fin de la condición de residuo, pudiendo alcanzar disociarse de dicha condición las sustancias con uso normal para finalidades específicas siempre que no implique impactos sobre el medio ambiente o la salud. Enfatiza la aplicación de estos criterios para los áridos, el papel, el metal, los neumáticos y textiles. (Unión Europea, 2008).

Por su parte, la Directiva 1999/31/EC, relativa al vertido de residuos, representa el marco jurídico de la eliminación en vertedero. Establece los criterios de aceptación de los residuos inertes basados en su identificación y clasificación. Además, exige a los Estados Miembros la reducción progresiva del vertido de residuos municipales biodegradables, estableciendo que para el año 2016 el flujo total de residuos biodegradables represente el 35% del vertido en 1995 (Unión Europea, 1999).

Por otro lado la Decisión de la Comisión, de 18 de diciembre de 2014, como parte de la correcta gestión de los residuos en el marco comunitario establece la Lista Europea de Residuos, la cual codifica mediante seis dígitos los distintos flujos de residuos clasificándolos según la actividad en la que han sido generados (Unión Europea, 2014).

De este modo, la legislación europea recomienda la recuperación de recursos de los residuos pero es importante señalar que no existe una normativa específica de escorias a nivel europeo. Sólo la Decisión de la Comisión 2001/118/EC define que las escorias de incineración deberán ser clasificadas como residuos (Unión Europea, 2001).

Normativa Estatal:

La transposición de las Directivas 2008/98/CE, Directiva Marco de Residuos, y 1999/31/EC, relativa al vertido de residuos, en el ordenamiento jurídico español se lleva a cabo a través de la Ley 22/2011 de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.

En este se establece que el Ministerio competente en materia de Medio Ambiente, elaborará, el Plan estatal marco de gestión de residuos que recogerá la estrategia general de la política de residuos. De esta forma, en noviembre del 2015 se aprobó el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022 que representa el principal instrumento de planificación a nivel estatal.

El objetivo del citado plan es orientar la política de residuos en España en los próximos años, impulsando las medidas necesarias para mejorar las deficiencias detectadas y que promueva las actuaciones que proporcionan un mejor resultado ambiental, asegurando que España cumple con los objetivos legales (PEMAR, 2016).

Asimismo, con la finalidad de alcanzar un elevado grado de protección del medio ambiente, el Real Decreto 815/2013, representa el reglamento de prevención y control integrados de la contaminación, estableciendo las disposiciones para evitar y reducir la contaminación de instalaciones de incineración y coincineración de residuos (RD 815/2013).

Normativa Autonómica:

La Ley 22/2011, establece que “las C.C.A.A. serán las encargadas de la elaboración de los programas autonómicos de prevención de residuos, además de la autorización, vigilancia, inspección y sanción de las actividades de producción y gestión de residuos”. En cumplimiento de esta ley, el Decreto 14/2017 de 23 de marzo aprobó el Plan de

Residuos de la Comunidad Autónoma de Cantabria para el periodo 2017-2023, derogando así los Planes Sectoriales de Residuos de Cantabria 2010-2014 que se encontraban prorrogados. De esta forma, el nuevo Plan de Residuos se plantea como “un instrumento que dé continuidad a los anteriores planes sectoriales y dote a Cantabria de herramientas eficaces para el cumplimiento con los objetivos establecidos en la legislación vigente y en el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos” (Gobierno de Cantabria, 2017).

1.3. Valorización Energética y potencial recuperación de materiales

Durante el año 2015, en España se generaron 20,15 millones de toneladas de residuos municipales, un 12% de estos fueron sometidos a Valorización energética. (Eurostat, 2015). En el 2014, en la Planta de Tratamiento Integral de Residuos de Cantabria, se valorizaron 120.000 t de combustible derivado de residuos municipales, lo que supuso un 54% del total de residuos tratados, produciendo 90 millones de kWh (Gobierno de Cantabria, 2017).

Este tratamiento extrae el potencial energético contenido en el flujo de residuos no reciclables que forman el rechazo del proceso de las operaciones de recuperación de material previas, reduciendo la masa de los residuos municipales entre un 70-80%, y su volumen en un 90%. Derivado de este proceso se obtienen tres flujos: las escorias de fondo (en adelante escorias), las cenizas volantes y el gas de combustión (Muchová et al, 2006).

Las escorias constituyen el material total o parcialmente quemado que se descarga de las parrillas del horno tras su paso por la cámara de combustión a temperaturas superiores a los 850°C. Por otro lado, las cenizas volantes están formadas por las partículas, cuyo tamaño de es inferior a 250 µm, que son arrastradas por la corriente de gases de combustión hacia el exterior de la cámara de combustión (CEDEX, 2007). Del total de los residuos que entran al proceso de incineración, aproximadamente entre el 20-30% en peso se recogerá en forma de escorias, a diferencia de las cenizas volantes cuyas cantidades son mucho menores. Por otro lado, los gases de combustión, encargados de realizar el intercambio energético, están formados por

vapor de agua, CO, CO₂, HCl, HF, HBr, SO₂, COV, PCDD/F, PCB y compuestos de metales pesados (MTD, 2011).

Las escorias de incineración de residuos municipales poseen un alto potencial para la recuperación de materiales secundarios con valor añadido. Contienen esencialmente una fracción mineral, inquemados y metales férricos y no férricos. La fracción mineral (85-90%) constituye el componente mayoritario y puede ser incorporada como material de construcción o de relleno (Gisbertz et al., 2013). Los materiales adicionales presentes en las escorias son los metales, que pueden estar presentes en forma metálica libre, a menudo unidos a otros componentes, o en forma mineral. De acuerdo a la literatura, los metales férricos y no férricos se encuentran presentes en las escorias en un porcentaje del 7-15% y 1-2%, respectivamente (Grosso et al., 2011). Mientras que las piezas metálicas de gran tamaño, generalmente metales férricos, son recuperadas con valores de eficiencia típica en torno al 80 %, la recuperación de metales no férricos varía considerablemente de unas plantas a otras y presenta un grado de implementación menor.

Los metales no férricos que se concentran en las escorias de incineración son principalmente Al, Cu, Cr, Ni, mientras que en las cenizas volantes y los residuos de tratamiento de limpieza de gases se encuentra Pb y Zn (MTD, 2011).

1.3.1. Metales no férricos

Las características de los metales no férricos representan, en la mayoría de los casos, una ventaja respecto de los derivados del hierro. Sin embargo, su creciente demanda debido al incesante aumento en la diversificación de aplicaciones no garantiza su suministro a largo plazo. Por otro lado, su obtención es más cara debido a la baja concentración de algunos de estos metales en sus menas, a la elevada energía consumida en los procesos de obtención y a su particular demanda, que exige su producción en pequeñas cantidades y las tecnologías para su recuperación presentan un menor grado de desarrollo con respecto a la de materiales férricos.

Ejemplo de esto es el reciclaje del cobre, cuya energía supone el 25% de la energía requerida para transformar el mineral de cobre en metal. En el año 2004, el 34% de la demanda mundial de cobre se satisfizo mediante el reciclado de objetos viejos de

cobre. Pese a ello, el sector dedicado al reciclaje de metales es relativamente pequeño en el contexto de la industria española, aunque es un valor al alza. Así, según los datos del Instituto Nacional de Estadística del 2007, este generó un valor añadido bruto de 239,7 millones de euros, el 0,17% del producido por el total de industria en el mismo año de referencia.

Los metales no férricos se pueden clasificar de diversas formas, una de ellas se basa en su densidad, pudiendo ser pesados (Cu, Pb, Sn, Zn, Ni, Cr, W, Hg) o ligeros (Al, Ti). Los metales no férricos de mayor aplicación industrial son el cobre, aluminio, plomo, estaño y zinc. Mientras que otros, como el mercurio y wolframio se aplican en actividades más específicas (Ministerio de Industria, Energía y Turismo, 2010).

Entre las aplicaciones más comunes del aluminio se encuentra la fabricación de latas para bebidas de consumo, carrocerías de vehículos. Por su parte, el cobre, debido a su elevada conductividad de calor y electricidad, se emplea en la fabricación de recipientes empleados en la industria como calderas o, debido a su alta ductilidad, en la fabricación de cables de media y alta tensión. Por otro lado, entre los metales no férricos que se emplean para recubrimientos se encuentran el cromo, níquel y zinc. Asimismo, el wolframio se emplea en los filamentos de las bombillas.

Las aleaciones de estos metales también presentan diversas aplicaciones. Las dos aleaciones principales del cobre se encuentran aplicadas en la industria de forma masiva como latón (Cu-Zn) y bronce (Cu-Sn). Por su parte, la aleación Cu-Cd-Sn se aplica en líneas telefónicas, y como conductor de líneas de ferrocarriles eléctricos, la aleación Cu-Cd se emplea en el transporte de alta velocidad debido a su resistencia a la abrasión (Ministerio de Industria, Energía y Turismo, 2010).

1.4. Objetivos y Antecedentes

En el marco del nuevo enfoque de economía circular previamente descrito, surge un especial interés en el estudio de la viabilidad de recuperación de los metales no férricos contenidos en la escoria fina de Tircantabria. Para la consecución de dicho objetivo se fijan los siguientes apartados:

- Elaboración de un Plan de recogida de muestras que permita el posterior análisis de composición de metales de interés y caracterización que desarrolla el Departamento de Ingenierías Química y Biomolecular de la Universidad de Cantabria.
- Cuantificación de los metales no férricos potencialmente recuperables presentes en la producción anual de la Planta de Valorización de Escorias.
- Estudio de la viabilidad técnica para la recuperación de los metales de interés. Para ello se hará una búsqueda bibliográfica de las tecnologías y los procesos que permitan la recuperación de los metales no férricos de interés, se describirán y clasificarán. Asimismo, se realizará una estimación de la cantidad recuperable según dichas técnicas.

En cuanto a los Trabajos Fin de Grado que se han desarrollado en la Universidad de Cantabria, pese a que son muchos los que se centran en el campo de los residuos, se citan principalmente 3 como antecedentes: Cubillas-Preciados (2013) por su estudio de Impacto de Ciclo de Vida (EICV) de las alternativas de tratamiento de escorias y cenizas de una planta incineradora de Residuos Sólidos Urbanos, y Alonso-Gutiérrez (2015) por su trabajo de Valorización de cenizas volantes y cenizas de fondo procedentes de la incineración de Residuos Sólidos Urbanos. Por su parte, Ajo-Navarro (2016) se centra en realizar un análisis de la gestión actual de los residuos domésticos en Cantabria.

La principal aportación de este trabajo, en comparación con los tres estudios previamente citados, es que trabaja con un flujo existente de las instalaciones de TIRCANTABRIA, permitiendo emplear cifras reales de generación y evaluar las alternativas más adecuadas para la recuperación de los metales de interés contenidos en el flujo de estudio.

1.5. Descripción de la Planta de Tratamiento Integral de Residuos de Cantabria

Un modelo de tratamiento integral de residuos combina las distintas operaciones de las que se dispone para alcanzar un mayor grado de eficiencia en la recuperación de recursos (figura 5). Tiene su origen durante la fase de recogida y transporte, distinguiendo por un lado las fracciones correspondientes a la recogida selectiva, que

son tratados como residuos clasificados, y por otro el flujo mezcla, que es conducido hacia un proceso previo de clasificación para la posterior recuperación de materiales.

Un claro ejemplo de la integración del proceso se encuentra en la operación de recuperación energética, la cual suministra energía a los tratamientos previos para su funcionamiento, y a su vez envía material recuperable en forma de escorias de incineración, como es el caso de los metales férricos y no férricos. Por su parte, el depósito en vertedero, pese a ser considerada operación de eliminación, realiza de forma secundaria el aprovechamiento energético para enviar energía a la red (Ley 22/2011).

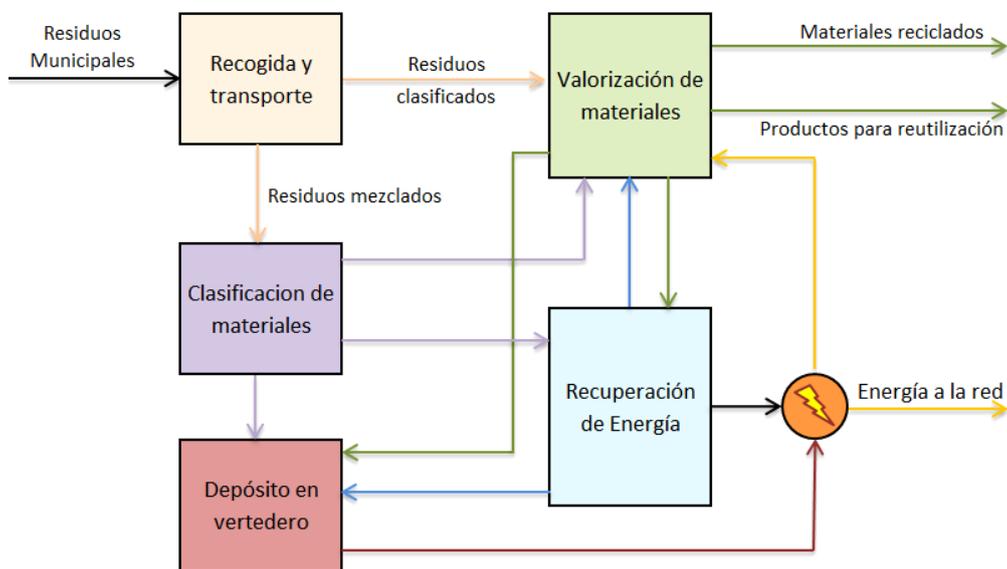


Figura 5. Modelo Integrado de Gestión de Residuos.

En Cantabria, el centro encargado del tratamiento de los residuos municipales es la Planta de Tratamiento Integral de Residuos de Cantabria, ubicado en el municipio de Meruelo. En sus instalaciones se realizan operaciones que permiten la recuperación de múltiples productos, se consigue un compost de calidad, y de la fracción restante se obtiene un aprovechamiento energético que permite autoabastecer la totalidad de la instalación y vender a la red. De esta forma el tratamiento que se realiza supone el ahorro de energía, la conservación de los recursos naturales y la protección del medio ambiente.

En la figura 6 se representa un diagrama de bloques del tratamiento que se realiza en la Planta de Tratamiento Integral de Residuos de Cantabria, donde se identifican los flujos según su código en la Lista Europea de Residuos (Código LER).

1.5.1. Planta de Reciclaje, Compostaje y Afino

El flujo de residuos municipales llega a la Planta de Tratamiento Integral de Residuos proveniente de alguna de las siete Estaciones de Transferencia distribuidas en la región (E.T. de Islares, E.T. de El Mazo, E.T. de Selaya, E.T. de Ramales de la Victoria, E.T. de Cabezón de Liébana, E.T. de Villacantid y E.T. de Cabezón de la Sal), o directamente de los municipios.

El primer punto al que se comete el flujo de entrada es el de control en báscula para cuantificar las toneladas que se reciben e identificar cada camión que ingresa en las instalaciones, el cual deberá portar un Documento de Identificación de traslado de residuos, identificando el origen, el destino y la identificación mediante código LER del residuo que transporta, en cumplimiento del Real Decreto 180/2015 de Traslados de Residuos en el Interior del Territorio. Posteriormente, el residuo es dirigido al foso de descarga, desde donde se alimenta a las líneas de entrada a la Planta de Reciclaje (Figura 6).

La primera clasificación a la que se somete el flujo de residuos es la de triaje manual de los componentes voluminosos. A continuación, el flujo se dirige hacia las cribas rotativas (en adelante trómeles) para realizar el primer cribado. En los trómeles, se produce la separación del flujo en dos corrientes: el pasante, que posee un alto contenido en materia orgánica, y el rechazo, con una mayor proporción de inertes y materiales potencialmente reciclables. El flujo pasante es dirigido hacia una cabina de triaje manual donde se retira el vidrio que contiene, después se conduce hacia un separador magnético para recuperar el material férrico contenido y posteriormente por un separador de inducción Eddy Current que selecciona los metales no férricos y los deposita en otro contenedor.

Tras estas etapas, el flujo es conducido hacia los parques de fermentación. La planta cuenta con dos sistemas separados, para tratar así dos flujos diferenciados, uno

procedente de la recogida selectiva de la fracción orgánica de los residuos municipales y el otro para tratar la fracción mezcla.

Las máquinas volteadoras proporcionan el aireado necesario para la fermentación del contenido orgánico presente. Este proceso tiene una duración de 8 semanas. Los gases que el proceso de fermentación genera son aspirados por la parte superior y son conducidos al biofiltro, y estos a su vez serán conducidos a la caldera de la Planta de Valorización Energética para suministrar el aire necesario para la combustión en el interior de la caldera, optimizando así al máximo el proceso, reduciendo los olores y el impacto sobre el medioambiente.

Tras haberse completado el periodo de fermentación, la fracción orgánica se conducirá a la zona de Afino, donde será depurada mediante operaciones de cribado (se eliminan los tamaños superiores a 12-15mm), y sometida a un equipo de separación densimétrica en la que se aparta el compost (fracción ligera) de los elementos pesados (vidrio, cerámica e inertes) que son enviados a vertedero.

Volviendo a la separación realizada en los trómeles de la Planta de Reciclaje, el rechazo que los atraviesa y el pasante del separador inductivo serán conducidos a las cabinas de triaje manual para la recuperación de materiales, donde se seleccionarán los componentes potencialmente comercializables (bricks, papel-cartón, plástico y vidrio). Dichos materiales se depositarán en los muros de almacenamiento (trojes) y a través de un sistema de cintas se transportarán a la Prensa multiproducto, donde se compactarán y embalarán los materiales recuperados.

El resto del flujo no seleccionado se denominará Combustible Derivado de Residuo (CDR), cambiando su codificación de 20 03 01 a 19 12 10 según la lista europea de residuos. Será transportado al foso de alimentación de la Planta de Valorización Energética.

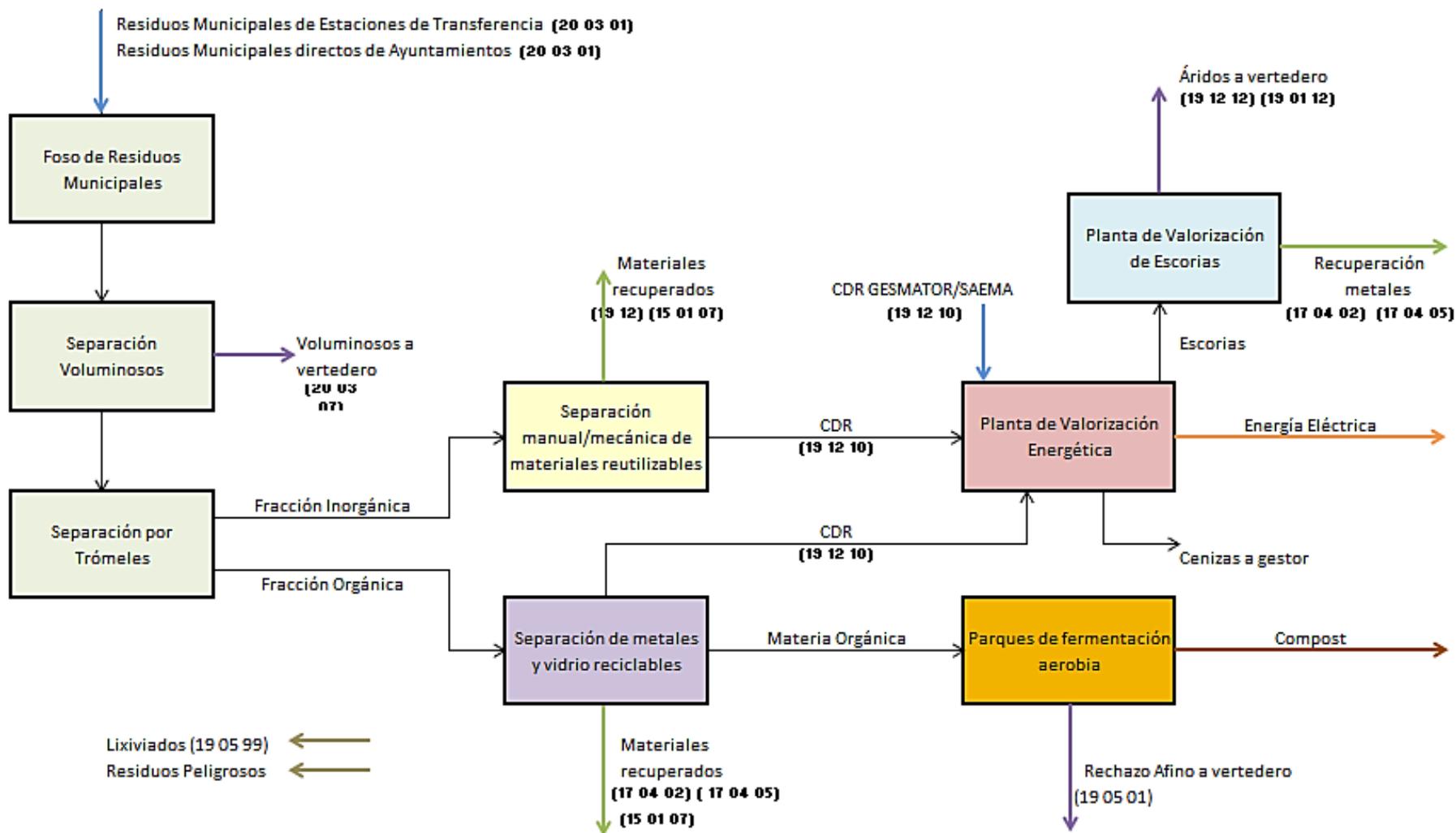


Figura 6. Diagrama de bloques de la Planta de Tratamiento Integral de Residuos de Cantabria.

1.5.2. Planta de Valorización Energética

La Planta de Valorización Energética representa el centro con la mayor tecnología del Complejo, donde se aprovecha energéticamente las fracciones no susceptibles de valorización material bajo los criterios de eficiencia técnica, económica y ambiental. Esto reduce el flujo de residuo destinado a eliminación en vertedero. En la figura 7 se muestra el diagrama de bloques con los flujos de entrada y salida de la Planta de Valorización Energética.

El Combustible Derivado de Residuo (CDR) que se emplea en el proceso de incineración es depositado en el foso. Este flujo proviene del material no recuperado de la Planta de Reciclaje, Compostaje y Afino, y de los Centros de Recuperación y Reciclaje de SAEMA (Amica) y de Gesmator (El Mazo). El paso del CDR por el horno de parrilla de rodillos se divide en cuatro etapas: Secado, gasificación, combustión y postcombustión.

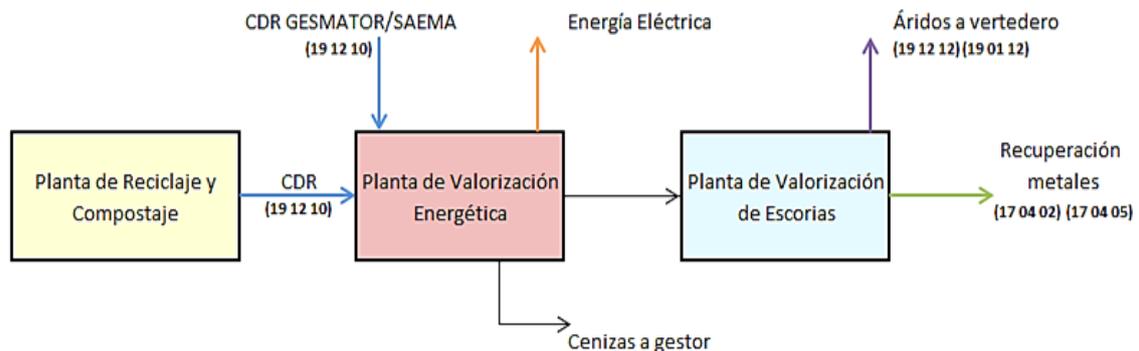


Figura 7. Diagrama de Bloques de la Planta de Valorización Energética.

La fase de secado empieza cuando el CDR es introducido en el horno, la temperatura de las paredes y la inyección del aire proveniente de los biofiltros de la nave de fermentación (aire primario), actúan sobre el flujo haciéndole perder humedad. Posteriormente se produce la gasificación, que supone la destilación de los hidrocarburos más volátiles de los residuos debido a las altas temperaturas, que mezclados con el aire empiezan a combustionar a 250°C. Al avanzar en la parrilla de rodillos, la temperatura del residuo alcanza la de ignición del carbono (750°C) combustionando y formándose calor, llama y gases. El residuo deberá permanecer en esta fase hasta su combustión completa. Finalmente se produce la postcombustión,

donde los gases producidos combustionan totalmente debido al aporte de oxígeno con la inyección de aire desde la parte superior (aire secundario). El aporte necesario de oxígeno asegura una combustión con concentración de CO dentro del rango permitido de la legislación vigente, reduciendo el contenido de dioxinas e inquemados.

Para el cumplimiento de la exigencia de tiempo de permanencia de más de 2 segundos a una temperatura superior a 850°C se controlarán las velocidades y sentidos de giro de los rodillos, asimismo, se cuenta con el apoyo de dos quemadores auxiliares automáticos que garantizan la correcta temperatura del interior del horno. Se hará especial uso de estos durante las fases de parada y arranque de la caldera para modificar la temperatura de forma controlada a fin de proteger las propiedades de los elementos de su interior, tuberías y la capa de recubrimiento refractario de las paredes de la caldera. Finalmente, al finalizar su paso por los rodillos, el flujo de inquemados de CDR se deposita en el escoriador, se enfría con agua y se conduce al troje, donde es almacenado hasta ser transportado a la Planta de Valorización de Escorias.

Asimismo, para combatir la acidez presente en forma de óxidos de nitrógeno (NOx), provocada por los plásticos contenidos en el CDR, se utiliza un sistema de reducción no catalítica, en la que el agente reductor es una solución de urea al 40%, que será pulverizado desde lo alto de la cámara de combustión.

El flujo de gases y cenizas volantes asciende por la cámara vertical de la caldera y realiza el intercambio energético con el agua que fluye en el sistema de tuberías de la cámara horizontal. Los gases y cenizas que superan el sistema de tuberías se dirigirán a la zona de tratamiento de gases de escape (140°C). En la zona de tratamiento de gases son sometidos a un sistema semi-seco en un Reactor Circoclean, donde se neutralizan los gases contaminantes HCl, SO₂, SO₃ y HF utilizando hidróxido cálcico (Ca(OH)₂). Asimismo, para la captación de dioxinas y furanos, metales pesados y compuestos orgánicos volátiles, se emplea Carbón Activo debido a su elevada superficie específica. Por último, el flujo de gases será conducido hacia un sistema de Filtro de mangas que captará las partículas y el polvo en suspensión.

Es importante destacar que la instalación de tratamiento de gases cuenta con un Sistema Automático de Medición de Emisiones a la atmósfera (SMEC) que mide en

continuo los parámetros contaminantes y muestra dichos valores en la sala de control del proceso que permite su seguimiento y control del impacto sobre el medio.

Por otro lado, para realizar el intercambio energético del calor generado, se emplea un sistema de agua que será conducido por todo el sistema de tuberías para convertirlo en vapor sobrecalentado de la forma más óptima y conducirlo a la turbina.

El agua es desmineralizada con la finalidad de acondicionarla para su uso en la caldera de alta presión (circuito agua-vapor), así como en el sistema de refrigeración de la Planta de Recuperación Energética. El tratamiento consta de tres etapas principales: pretratamiento, osmosis inversa e intercambio iónico.

El agua es transportada hasta el desgasificador donde se someten a un intercambio energético, abandonándolo a aproximadamente 130°C, después será conducido al calderín y posteriormente al bloque de tuberías del interior de la caldera, el vapor de agua saldrá de la caldera en forma de vapor vivo a aproximadamente 420°C hacia la turbina, donde la expansión del vapor permitirá la generación de energía (Tircantabria, 2016).

1.5.3. Planta de Valorización de Escorias

TIRCANTABRIA, en busca de la optimización de su proceso de recuperación de recursos, en el 2014 comenzó la construcción de una planta anexa dentro del complejo de Meruelo para la recuperación de metales de la escoria de incineración, finalizándola en junio del 2015. El diagrama de bloques de esta planta se muestra en la figura 8.

El proceso de recuperación de metales del flujo de escorias de incineración se inicia cuando este es recogido del almacén troje de la Planta de Valorización Energética. Las escorias son descargadas en la nave de maduración, donde permanecen 2 semanas. Esta etapa supone su estabilización y pérdida de humedad, necesaria para el correcto funcionamiento de las operaciones posteriores.

Una vez finalizada la maduración, la escoria se deposita en un precribador de tamaño de paso de 150mm para eliminar los materiales voluminosos. A continuación, las escorias serán conducidas hacia un alimentador vibrante que hará de pulmón y dosificador del proceso.

A continuación, las escorias se hacen pasar por una criba rotativa con luz de malla de 35 mm dividiéndolas en dos flujos, la fracción fina (0-35 mm) y la gruesa (>35 mm). Los metales de estos flujos serán recuperados en tres procesos: Tratamiento de fracción fina 1ª, Tratamiento de fracción fina 2ª etapa y Tratamiento de fracción gruesa.

La primera etapa de recuperación de la fracción fina empieza sometiendo a separación magnética la fracción 0-35 mm. El flujo no recuperado será conducido a un alimentador vibrante para posteriormente ser descargados en un separador de metales no férricos tipo Eddy Current que se encargará de su captación, predominando el aluminio.

La fracción no seleccionada será conducida a la segunda etapa de recuperación de la fracción fina. Para lograr una mayor eficacia en el proceso de recuperación, este flujo será depositado sobre una criba vibrante de tamaño de paso de 22 mm, fracción fina (0—22 mm) será conducida sobre un separador magnético que captará los metales férricos, el producto restante será transportado hacia un dosificador que alimenta a un separador de metales no férricos. El producto de rechazo se descarga sobre una cinta juntándose con el rechazo de la fracción 22-35 mm. Esta mezcla constituirá las escorias valorizables objeto de este estudio.

Por su parte, el tratamiento de la fracción gruesa consistirá en someter al flujo a un separador magnético para la captación de los metales férricos y posteriormente a un separador de metales no férricos. La fracción no seleccionada será depositada sobre una cinta y dirigida a un cabina de triaje manual donde se recuperarán motores eléctricos y acero inoxidable (Tircantabria, 2016).

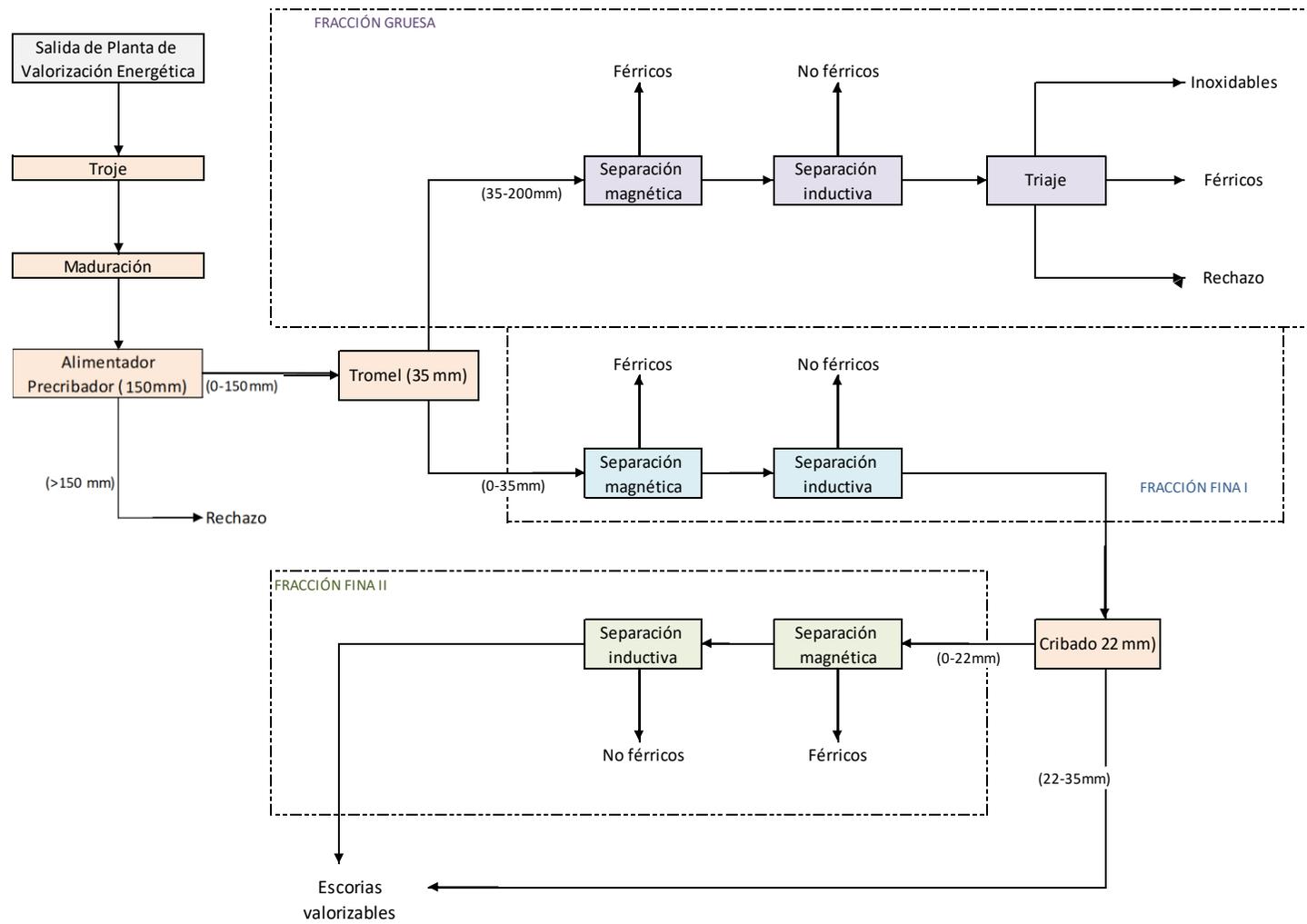


Figura 8. Diagrama de bloques de la Planta de Valorización de Escorias.

1.6. Generación de escorias de incineración en TIRCANTABRIA

Con el objetivo de conocer la cantidad potencial de metales no férricos que se puede recuperar de las escorias que se generan en TIRCANTABRIA, un paso importante es cuantificar su tasa de generación. Para realizar dicha evaluación se estudiarán los datos de producción mensual registrados durante el año 2016, es decir, durante el segundo año de la puesta en marcha de la planta (Anexo 1).

En el año 2016, un total de 20.603,63 t de escorias procedentes de la planta de incineración fueron enviadas a la Planta de Valorización de Escorias. Sin embargo, el flujo tratado fue de 19.335,49 t. La diferencia de dichas cifras se debe a dos razones: Por un lado, la maduración de 2 semanas a la que se someten las escorias antes de ser tratadas hace que se produzca un desfase temporal que interfiere entre los datos de distintos meses, y por otro lado, la propia maduración provoca pérdida de humedad que se refleja en las cifras totales.

En la figura 9 se representan las cifras mensuales de las cantidades enviadas a la planta, las tratadas y las del flujo de rechazo 0-35 mm. Se observa que el mínimo de producción corresponde al mes de febrero, esto se debe a la parada programada de mantenimiento de la Planta de Valorización Energética, que tuvo lugar entre el 31 de enero y el 14 de febrero. Dicho acontecimiento influye directamente, ya que la generación de escorias se detiene.

Del mismo modo, el pico máximo de escorias tratadas que se observa en enero corresponde a que durante dicho mes la planta opera a máximo rendimiento para liberar la nave de maduración y colaborar con las labores de mantenimiento.

Asimismo, al valorar el cómputo anual de las cifras del 2016 se extrae que la cantidad de material recuperado supuso el 14,61% de las 19.335,49 t tratadas (Anexo 1). Dicha cifra se distribuye en la venta de las distintas fracciones de metales férricos y no férricos recuperados y de los motores y acero inoxidable seleccionados en las cabinas de triaje manual. La distribución de la venta de los materiales recuperados y los destinos del resto de flujos se muestran en la figura 10.

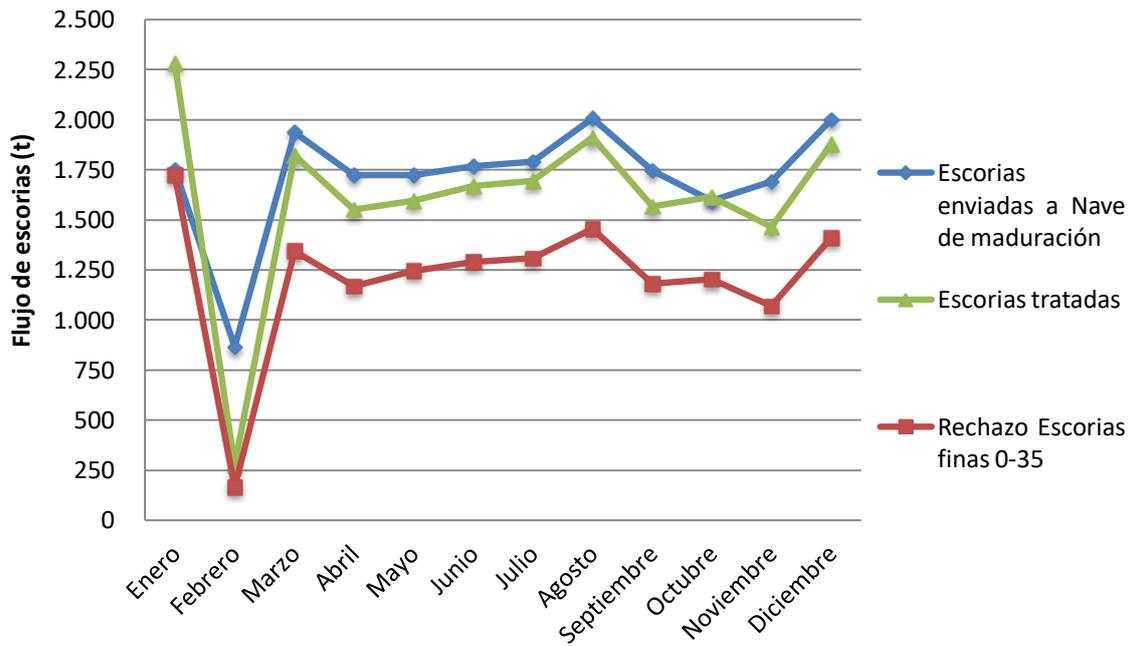


Figura 9 Flujo de entrada frente al flujo tratado en la Planta de Valorización de Escorias durante los meses del año 2016.

Por su parte, el rechazo de escorias 0-35 mm supuso el 75,34% del flujo tratado. La magnitud de dicha cifra (14.567,22 t), y su destino de eliminación en vertedero, reafirma la necesidad de ser analizada.

Después de conocer la generación anual de escorias y los distintos flujos de salida, el siguiente paso será cuantificar el flujo de la fracción fina 0-14 mm, cuyo potencial de recuperación de materiales es objeto de este estudio y actualmente es destinado a vertedero.



Figura 10. Destino de flujos de salida de la Planta de Valorización de Escorias.

1.7. Plan de Toma de muestras del rechazo de escoria fina

El siguiente paso en el estudio de la viabilidad de la recuperación de los metales no férricos presentes en la fracción fina de las escorias de incineración generadas por TIRCANTABRIA, es planificar un programa de recogida de muestras que permita su caracterización en cuanto a granulometría y composición con la finalidad de conocer la distribución de los metales en las distintas fracciones.

La elaboración de dicho plan de muestreo se realizó según la norma UNE-EN 14899:2007 "Caracterización de residuos. Toma de muestras de residuos. Esquema para la preparación y aplicación de un plan de muestreo". El desarrollo completo se recoge en el anexo 4. Plan de toma de muestras de la fracción fina de escorias.

Se estableció como población global del sistema el rechazo de escorias de tamaño 0-35 mm generado durante 10 meses. Debido a la variabilidad temporal y climatológica propia de la región, se fijó la toma de una muestra diaria de lunes a sábado durante la cuarta semana de cada uno de los 10 meses pactados, distribuyendo la recogida de muestras en el tiempo de forma homogénea. Para la evaluación del

error de muestreo, en la primera toma de muestra para laboratorio se analizaron las dos muestras finales tras los cuarteos.

Para la elección de los metales de estudio, estos se clasificaron según el interés que representan, pudiendo ser de carácter ambiental, económico o de ambos (Figura 11). Se estableció que aquellos con interés económico y ambiental que se encuentren con una concentración mayor de 10 mg/kg serían objeto de este estudio, eligiéndose el Cr, Cu, Ni, Pb, Sb, Sn, W y Zr.

As	Ag	Zr	Yb	 Interés económico y > 10 mg/kg  Interés económico y > 10 mg/kg  Preocupación ambiental
Ba	Bi	Co	Zn	
Cd	Ga	Se	Pr	
Cr	Ge	Sr	Y	
Cu	In	V	Nb	
Hg	Pd	Ce	Hf	
Ni	Ta	Nd	Rb	
Pb	Te	Eu	Sc	
Sb	Mo	Tb	Au	
Sn	W	Dy	La	

Figura 11. Metales no férricos de interés.

Asimismo, siguiendo la citada norma, se calculó el tamaño de la muestra de acuerdo a la ecuación 1 del anexo 3. La masa resultante fue de 71501,01 g, redondeando, se estableció dicha cifra en 80 kg.

Durante las recogidas de muestra para laboratorio, se realiza un tamizado in situ para segregar la fracción de interés del resto de la muestra, para ello se emplea una mesa de cribado de luz de malla 14 mm. A partir de esta nueva muestra, que se estimó que sería un 70% de los 80kg iniciales, es decir, 56kg, se deberán realizar sucesivos cuarteos para la obtención de la muestra de laboratorio.

Para la realización del cuarteo se siguió la norma UNE-EN-932-1 de métodos de muestreo en ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Se realizan 4 operaciones de cuarteo obteniéndose al final una muestra de 5 kg destinada al laboratorio del Departamento de Ingenierías Química y Biomolecular, para su preparación y posterior análisis. Para asegurar que la muestra semanal es superior a los 80 kg calculados, se estableció que se recogerían 20 kg/día durante la semana de toma de muestras.

En la figura 12 se muestra una imagen de la toma de muestra in situ. La ejecución completa de la toma de muestras y técnica de cuarteo se recoge en el anexo 5. Informe de toma de muestras.



Figura 12. Cuarteo y recogida de muestra de laboratorio.

1.8. Contenido de metales no férricos en la fracción fina de escorias de rechazo de TIRCANTABRIA

Las muestras enviadas al laboratorio del Departamento de Ingenierías Química y Biomolecular de la Universidad de Cantabria son sometidas a un conjunto de operaciones de secado, tamizado a las distintas fracciones de interés, y molienda para finalmente ser analizados mediante Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente. Los resultados de dichos análisis han sido proporcionados por el equipo que ha trabajado en dicho laboratorio.

Las concentraciones de metales no férricos para las tres fracciones analizadas obtenidos durante los meses de invierno se recogen en la figura 13. En el anexo 2 se detallan los datos de cada muestreo.

Los resultados de los análisis de las muestras indican que las concentraciones mayores corresponden al cobre, plomo y cromo, siendo el cobre el metal no férrico de mayor presencia en las fracciones 0-2 mm y 2-6 mm durante los tres meses, cediendo este lugar al plomo en la fracción 6-14 mm. La concentración máxima de cobre corresponde a la fracción 2-6 mm con un valor medio de 4.757,5 mg/kg. Asimismo, se

observa que a medida que se analiza la fracción más fina, la concentración de estaño aumenta. Únicamente el cromo y el níquel en la fracción 2-6 mm y el wolframio y plomo en la fracción 6-14 mm tienen una diferencia entre meses superior al 50% a lo largo del invierno.

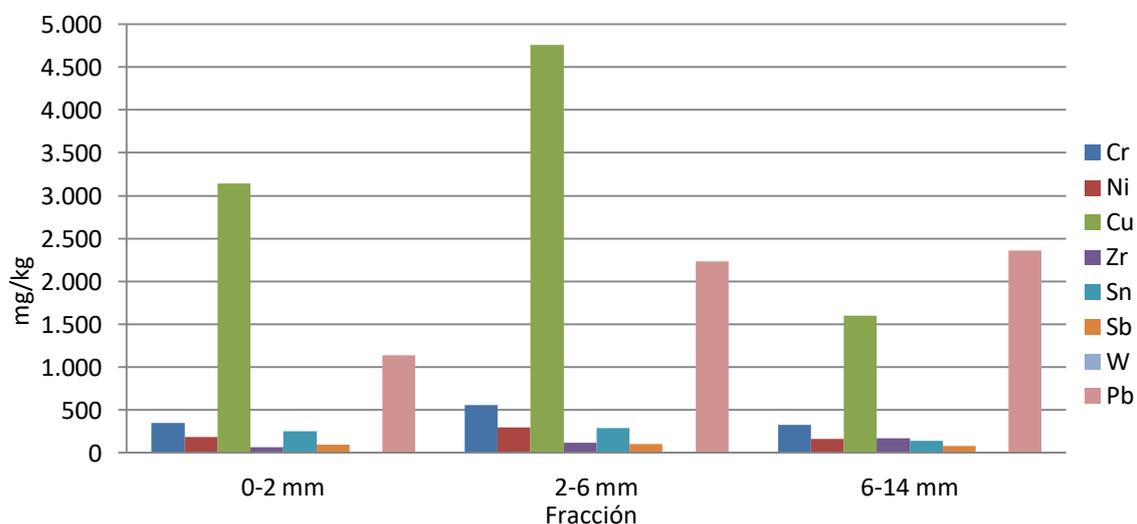


Figura 13. Composición de metales no férricos en los meses de invierno.

Una vez conocidas las cantidades de escorias generadas durante el año 2016 y los resultados de los análisis de laboratorio, el siguiente paso consistirá en evaluar la cantidad anual de metales no férricos contenidos en la fracción fina.

Tabla 1. Cuantificación de los flujos de escorias en el 2016.

Flujos de Escorias	TOTAL
Escorias a nave de maduración	20.603,63 t
Escorias tratadas	19.335,49 t
Rechazo escorias finas 0-35 mm	14.567,22 t
Rechazo escorias gruesas 35-150 mm	1.943,06 t
Inoxidable escorias	64,26 t
Motores eléctricos	8,94 t
Ferrico escorias >22 mm	2.130,52 t
Ferrico escorias 0-22 mm	138,34 t
Aluminio escorias 0-35 mm	365,59 t
Aluminio escorias >35 mm	117,56 t

Durante las tareas de toma de muestra se registró que de la fracción fina 0-35 mm, un 90% correspondía a la fracción 0-14 mm. Empleando los datos del año 2016 (Tabla 1), se observa que la generación anual de rechazo de escorias de la fracción 0-35 mm se cifró en 14.567,22 t. Haciendo uso del porcentaje obtenido durante la campaña de muestreo, 13.110,49 t correspondieron a la fracción 0-14 mm.

Por otro lado, para cuantificar la distribución media de masas en las tres fracciones de interés (<2 mm, 2-6 mm, 6-14 mm) se utilizarán las fracciones másicas calculadas durante los análisis, tras el paso de la muestra por la criba vibratoria (Tabla 2).

Tabla 2. Distribución másica de las escorias generadas en el 2016.

Fracción	Fracción media Laboratorio	Distribución de aplicada al año 2016 (t)
6-14 mm	0,40	5.237,90
2-6 mm	0,26	3.436,88
<2 mm	0,34	4.435,70

Los resultados muestran que el flujo mayoritario es el que corresponde a la fracción 6-14 mm, con 5.237,90 t/año, esta cifra representa el 27% del flujo de escorias que fueron tratados en la Planta de Valorización de Escorias de TIRCANTABRIA.

Una vez conocida la distribución de masa en las tres fracciones de interés, la siguiente etapa será cuantificar los metales no férricos presentes en dichos subsistemas. De esta forma se conocerá la cantidad anual de estos metales contenida en cada una de ellas.

En la tabla 3 se recoge el contenido estimado de metales no férricos en las diferentes fracciones de interés utilizando los datos de generación de escorias de la tabla 1, las fracciones másicas de la tabla 2 y los valores de concentración del anexo 2.

Tabla 3. Contenido estimado de metales no férricos de interés para el año 2016:

Fracción	Masa estimada (t)	Metal	Masa anual estimada (kg)
0-2 mm	4.435,70	Cr	1.542,74
		Ni	831,25
		Cu	13.948,95
		Zr	298,97
		Sn	1.133,77
		Sb	426,27
		W	38,59
		Pb	5.040,29
2-6 mm	3.436,88	Cr	1.909,53
		Ni	1.026,94
		Cu	16.350,97
		Zr	396,62
		Sn	991,88
		Sb	369,46
		W	19,93
		Pb	7.687,62
6-14 mm	5.237,90	Cr	1.696,56
		Ni	850,11
		Cu	8.379,08
		Zr	908,25
		Sn	755,31
		Sb	417,46
		W	26,19
		Pb	12.360,93

La extrapolación de los datos obtenidos en laboratorio a los datos de generación anual de escorias, muestra el significativo contenido de metales no férricos en las tres fracciones de interés que, aunque se tratan de bajas concentraciones, corresponden a un flujo anual importante.

De dichos datos resaltan las 16,35 toneladas anuales de cobre presentes en la fracción 2-6 mm, las 12,36 t de plomo en la fracción 6-14 mm o la 1,9 t de cromo en la fracción 2-6 mm. Para señalar la cantidad anual de metales no férricos presente en la fracción 0-14mm estos se han agrupado en la tabla 4.

Tabla 4. Contenido anual de metales en las escorias finas de TIRCANTABRIA.

Metal de interés	t/año
Cr	5,15
Ni	2,71
Cu	38,68
Zr	1,60
Sn	2,88
Sb	1,21
W	0,08
Pb	25,09

Las 38,7 t de cobre y las 25,1 t de plomo que señalan los datos del contenido de metales no férricos presentes en la fracción fina de las escorias de rechazo demuestran una enorme cantidad de metales potencialmente recuperables.

En este sentido, una vez conocido el elevado contenido de metales no férricos en la fracción fina del flujo de escorias que sale de la Planta de Valorización Energética de TIRCANTABRIA, la siguiente etapa para evaluar la viabilidad de la recuperación consiste en analizar las tecnologías disponibles en el panorama actual y su grado de recuperación de metales.

1.9. Tecnologías de recuperación de metales no férricos de la fracción fina de rechazo de la escoria de incineración

Las técnicas de recuperación de materiales contenidos en el flujo de residuos se pueden clasificar de diferentes formas: Una de ellas lo hace en función de si la clasificación es directa o indirecta. La separación directa se basa en las propiedades de los materiales, como su magnetismo, o su conductividad eléctrica y densidad aplicando un campo magnético como el caso del separador Eddy Current. Por su parte, la separación indirecta emplea sensores para detectar la presencia de materiales reciclables mediante un sistema automatizado. Estas técnicas se recogen en la tabla 5 (Gundupalli et al., 2017).

Tabla 5. Tecnologías para la separación de metales de escorias de incineración.

Materiales	Clasificación directa										C. indirecta			
	Trituradora magnética	Tambor magnético	Separador magnético de polea	Separador magnético sobre cinta	Separador Eddy Current	Separador magnético por densidades	Separador triboelectrostático	Hidrociclón	Equipo Jig	Unidad ADR	Tecnología AEB	Separador LIBS	Separación por rayos X	Separación óptica
Metales férricos	✓	✓	✓	✓					✓					
Metales no férricos					✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Asimismo, las diferentes técnicas de recuperación de metales no férricos se pueden clasificar en función de las condiciones en las que operan, pudiendo tratarse de separación seca o separación húmeda, siendo la separación seca la más habitual en la mayoría de países como Alemania, Francia o Dinamarca. Sin embargo, presenta dificultades al separar los metales no-férricos de la fracción 0-2mm (Muchová and Rem, 2007).

Para el caso particular de la recuperación de metales de la escoria de incineración, la técnica más empleada para la separación de los férricos se basa en sus propiedades magnéticas, empleando habitualmente imanes, captando el hierro y acero principalmente. Por otro lado, la recuperación de metales no férricos exige un sistema más complejo. A continuación se describen las tecnologías disponibles para su recuperación.

1.9.1. Separación directa

Separador Eddy Current:

Se trata de un equipo de separación directa en seco, aplicado para cualquier tamaño de partícula, alcanzando su mayor eficacia en tamaños superiores a los 15 mm. Su funcionamiento se basa en la presencia de un campo magnético multipolo que rota a una elevada velocidad en la misma dirección que la cinta transportadora. El material se desplaza a corta distancia del rotor que se encuentra en rotación, como consecuencia, las partículas metálicas no férricas contenidas en el flujo generan un campo magnético con una polaridad opuesta a la del imán, siendo repelidas y separadas del resto del material. La capacidad de separación se ajustará en función de la velocidad de rotación del rotor y de la distancia de éste a la cinta (Figura 14).

Esta técnica de separación es la más extendida. Sin embargo, en la actualidad, la eficiencia de estos procesos en la fracción < 5 mm es todavía muy baja, perdiendo el 90% de su contenido (Gizbert et al., 2013). Asimismo, este equipo también se emplea como complemento de otras tecnologías de recuperación (Gundupalli et al., 2017).

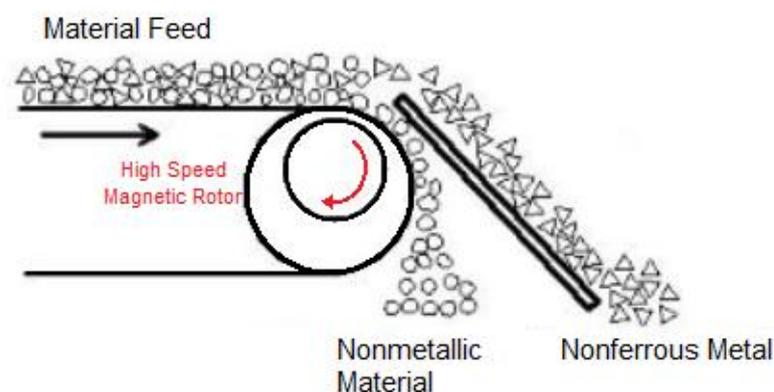


Figura 14. Separador inductivo Eddy Current.

Tratamiento Wet Eddy Current:

Como se ha mencionado antes, los equipos convencionales Eddy Current, o de corrientes de Foucault, no son capaces de recuperar los metales no férricos de las fracciones finas. Una alternativa a esta tecnología se con el separador Wet Eddy Current (WECS) desarrollado por Peter Rem y su equipo (Rem et al, 2000).

El flujo de escorias, cuyo tamaño de partícula se encuentra entre 2 y 6 mm, es humedecido para conseguir su adherencia a la cinta que lo transporta. En estas condiciones, al conducirlo hacia un equipo de separación inductiva, que a diferencia del equipo Eddy Current convencional, la bobina gira en sentido contrario al desplazamiento de la cinta (Muchová, 2010). Sólo las partículas no férricas serán capaces de superar dicha adherencia con una trayectoria lo suficientemente grande como para hacer viable la separación (Settimo et al, 2004), alcanzando un funcionamiento óptimo para partículas de diámetro superior a 5mm. Sin embargo, hasta la fecha no está expandida a nivel industrial.

Separador triboelectrostático:

Este equipo de separación directa, que opera en condiciones secas, basa su funcionamiento en la triboelectricidad, fenómeno de electrificación por fricción o contacto. Este fenómeno físico se desarrolla dentro de una cámara en el que los cuerpos que componen el flujo se friccionan y cargan con diferentes polaridades para a continuación conducirlo hacia un equipo con un campo eléctrico que los separará formando trayectorias en función de la cantidad de carga acumulada (Gundupalli et al., 2017). Se trata de una tecnología aplicada principalmente a los plásticos, incipiente en la separación de metales no férricos.

Hidrociclón:

La separación en el interior de un hidrociclón se basa en el efecto centrífugo en condiciones húmedas, extrayendo la fracción más fina, pudiendo establecer el punto de corte en micras. El flujo líquido ingresa por una entrada tangencial situada en la parte superior, cerca a la tapa, generando una rotación alrededor del eje longitudinal del hidrociclón, formándose un torbellino donde la mayor parte del flujo se mueve hacia afuera y hacia abajo. Parte de este flujo descendente, que transporta la mayor parte de sólidos suspendidos, sale por el orificio inferior situado en el fondo del hidrociclón. Producto de esa descarga se genera un espiral interior que hace que una parte del flujo ascienda hasta salir por el orificio de rebose situado en la tapa (Figura 15). Para ajustar la separación se regulará la aceleración del cuerpo y su geometría (Muchová 2010). Es importante señalar que este equipo no es capaz de aislar los

metales no férricos del flujo, pero supone una unidad apta para retirar el elevado contenido de humedad presente.

Separador Jig:

El principio de separación de este equipo se basa en la concentración por gravedad. El flujo líquido se introduce en un lecho perforado, se agita para inducir corrientes verticales, elevando así las partículas sólidas. Se obtendrán dos corrientes: una ascendente y una descendente. Las partículas con mayor densidad se instalarán en el fondo, segregando así el flujo de entrada en dos corrientes: fracción pesada y ligera (Gundupalli et al., 2017) (Figura 15).

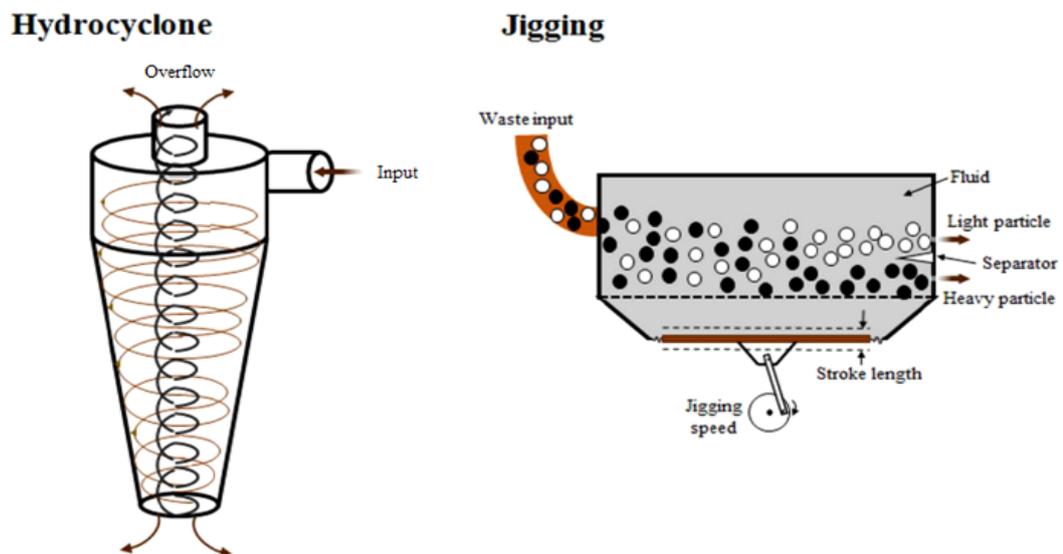


Figura 15. Hidrociclón y Separador Jig.

Separador Magnético por Densidades (MDS)

El Separador Magnético por densidades (MDS) desarrollado por la empresa holandesa Lquisort B.V. se centra en la disgregación en húmedo de los metales no férricos en dos flujos: los metales pesados y los ligeros, consiguiendo una recuperación de entre el 74 y el 96% de plomo, cobre y zinc en la ligera y un 88% del oro de la fracción pesada (Muchová et al, 2009).

Se basa en la utilización de un líquido ferrofluido constituido por nanopartículas magnéticas de óxido de hierro con un tamaño de 10-20 nm, como medio de separación (Böni, 2013). Este tipo de líquido tiene una densidad similar a la del agua,

pero en presencia de un campo magnético, la fuerza que actúa sobre el líquido es la suma de la fuerza de gravedad y la magnética. De esta forma, modificando el campo magnético se consigue modificar la densidad aparente del líquido y separar el material en dos o más fracciones en función de su densidad (Muchová, 2010).

El líquido magnético y el flujo a separar circulan sobre una cinta transportadora que se mueve en sentido contrario, debajo de la cual se sitúa un imán que es el encargado de modificar la densidad del líquido, consiguiendo que la fracción pesada se hunda y la ligera sea arrastrada por la cinta (Muchová 2010) (Figura 16). Tras recuperar las partículas, el ferrofluido puede ser reutilizado (Böni, 2013). Asimismo, para la separación del flujo de interés en múltiples fracciones se implementó un sistema que consistía en aportarlo a una altura determinada y debido a que la densidad aparente del líquido magnético varía exponencialmente con la posición vertical (Muchová, 2009), las partículas flotan a una altura correspondiente a su densidad específica. De este modo, conduciendo el flujo hacia una salida con diferentes alturas se consigue la separación de las distintas fracciones.

El sistema consume aproximadamente 100L de ferrofluido por 100 t de material pudiendo ser recirculado. Cada línea tiene una capacidad aproximada de 2,5 t/h (Liquisort, 2015).

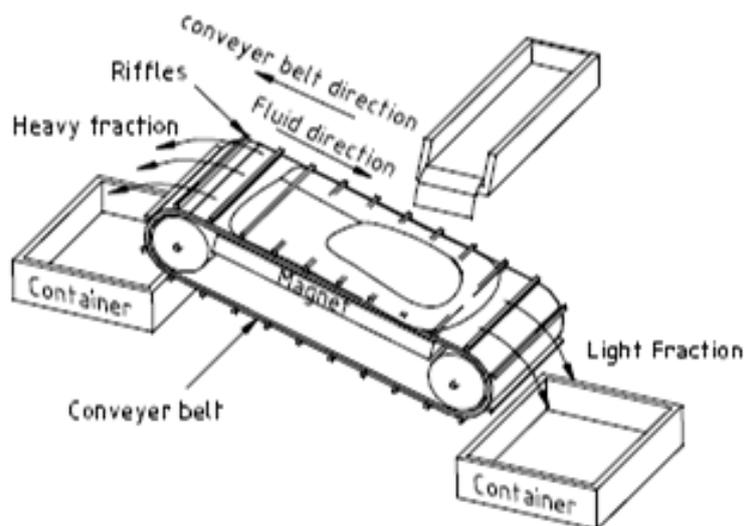


Figura 16. Esquema MDS, separación en fracción pesada y ligera (Muchová, 2010).

Advanced Dry Recovery (ADR):

Una de las tecnologías que se encuentra en fase de comercialización es el de la empresa INASHCHO. Su unidad de clasificación denominada Advanced Dry Recovery (ADR) gestiona más de 4 millones de toneladas de residuos de ceniza por año en más de veinte instalaciones de tratamiento de cenizas en todo el mundo (De Vries, 2009).

200

Esta tecnología incide en uno de los principales problemas en la recuperación de metales de la fracción fina por corrientes de Foucault: La clasificación y separación de la fracción de 0-14 mm y su elevada humedad asociada a los finos (0-2 mm) (De Vries, 9). Se basa en un procedimiento mecánico sin secado previo. Consiste en emplear energía cinética para romper los enlaces de puente de hidrógeno que se forman por la humedad entre las partículas finas. Establece un punto de corte ajustable de entre 1 y 4mm, apartando así hasta un 70% de los finos y la humedad que implican (De Vries, 2009).

Tras pasar por la unidad ADR, el flujo podrá tratarse utilizando separadores inductivos convencionales de corriente de Foucault, incrementando así el rendimiento de estos, y por ende, la recuperación de metales no férricos, principalmente. Asimismo, el flujo de rechazo producido posee características interesantes para la producción de cemento (Pan et al, 2008).

Tecnología AEB:

En el complejo de incineración de residuos municipales Afval Energie Bedrijf (AEB), Amsterdam se realiza un proceso en el que muchos de los equipos de recuperación de metales no férricos se encuentran integrados. Dicho proceso se realiza en húmedo, clasifica las escorias en distintas fracciones (0-2 mm, 2-6 mm. 6-20 mm y 20-40 mm) y posteriormente aplica tratamientos distintos a cada fracción (Hu, 2009).

El flujo de escorias 0-40 mm se pasa por una criba vibratoria en húmedo, con una luz de malla de 20 mm. El flujo pasante se vuelve a cribar en húmedo con una luz de malla de 2 mm. La fracción 0-2 mm será conducida hacia un hidrociclón, donde la separación se basa en el efecto centrífugo creado en el interior de su cuerpo

(Muchová, 2010). Con un punto de corte, establecido en 0,1 mm, se extraen el flujo de lodo. La fracción 0,1-2 mm, se introduce en un equipo jig de concentración gravimétrica mediante corrientes de agua (Alarcón, 2015), separando con esto los metales pesados, la fracción orgánica y la arena.

Por su parte, la fracción 2-20 mm se pasa por un cribado de 6mm, el flujo 6-20 mm es dirigido hacia un equipo que retira la fracción orgánica por inyección de aire (windsifter), y luego hacia un separador magnético y un separador Eddy Current (Muchová, 2011). La fracción 2-6 mm se somete a un separador cinético por gravedad, que basa su separación en la diferencia de densidad, obteniendo tres productos: metales pesados férricos y no férricos, aluminio y agregado, y fracción orgánica. Posteriormente, el primer flujo es sometido a un separador Eddy Current disgregando el material no férrico del férrico. El flujo del agregado y el aluminio sufre el mismo tratamiento, recuperando el aluminio. Por otro lado, el flujo de material orgánico separado puede volver a ser incinerado o enviado a relleno sanitario (Muchová, 2011).

1.9.2. Tecnologías de recuperación indirecta

Espectroscopía de ruptura por láser (LIBS):

Se trata de un método de separación indirecta en condiciones secas desarrollado en Los Alamos National Laboratory en colaboración con el grupo Metallgesellschaft. Esta técnica utiliza un pulso láser de alta potencia que proporciona información de la espectrometría para el análisis de aleaciones metálicas, plásticos y desechos de madera tratados. El sistema LIBS se compone de un láser de granito de aluminio dopado con neodimio (Nd:YAG), un espectrómetro y una unidad de procesamiento para el análisis de datos. El láser incide sobre las partículas no férricas, generando ablación (arranca o vaporiza el material de la superficie), la radiación emitida por la ablación es capturada por el espectrómetro CDC, para a continuación, mediante lectura de las curvas características de emisión atómica, realizar un análisis de los residuos. Posteriormente, el sistema mecánico clasifica los materiales identificados. El principal inconveniente al que se enfrenta esta tecnología es a que la contaminación de la superficie de las partículas le lleva a cometer errores durante la lectura (Gundupalli et al., 2017) (Figura 17).

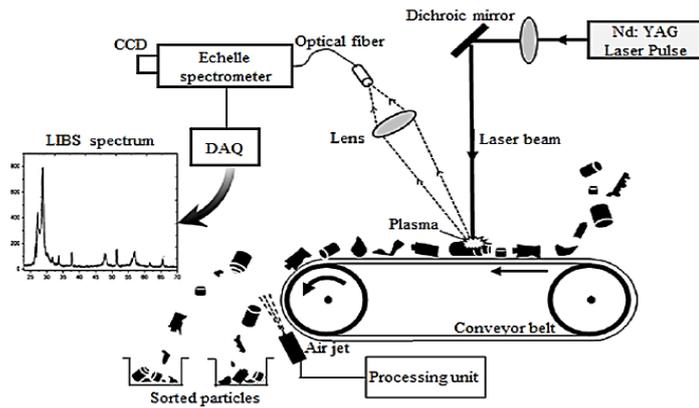


Figura 17. Separador LIBS.

Separación por rayos XRT:

Este método nuevo de separación indirecta en condiciones secas fue desarrollado a escala de laboratorio en el año 2013 en Alemania. Gisbertz et al desarrollaron un tratamiento de separación de metales no férricos de las escorias de incineración, que combina la separación de un equipo Eddy Current con un sensor dual de transmisión de rayos X (XRT). Este tratamiento permite la separación de metales ligeros y los pesados obteniendo un grado de recuperación de entre 29-75%, sin embargo está limitado a partículas de tamaño superior a 10 mm (Gisbertz et al, 2013).

El flujo es depositado es depositado sobre una cinta transportadora donde es radiado. Puesto que la capacidad de absorción de rayos X de un cuerpo depende, entre otros factores, de su densidad. El flujo se clasificará en función de la radiación absorbida y será separado mediante la eyección por aire comprimido (Steiner Global, 2015), apartando la fracción pesada (cobre, latón, y otros metales pesados) del flujo de fracción ligera (Gisbertz, 2013) (Figura 18).

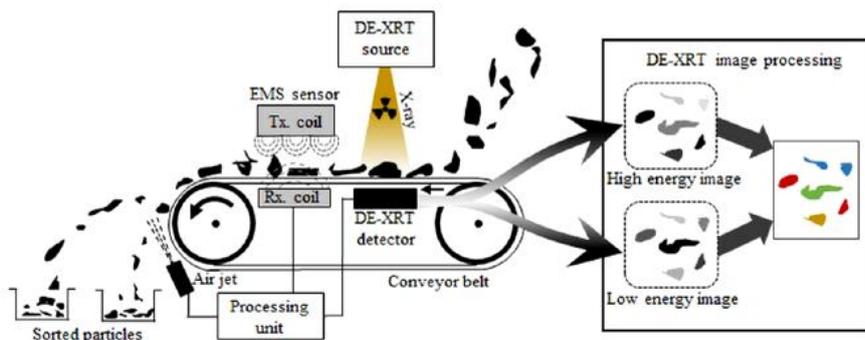


Figura 18. Diagrama de XRT (Gundupalli et al., 2017).

Separación óptica:

Se trata de otra técnica indirecta de separación de metales en seco. Basa su funcionamiento en las características de los materiales como el color, forma, y tamaño. Para la recuperación de metales emplea una cámara compuesta por sensores de color e inducción para medir la conductividad eléctrica del cobre, latón, zinc, aluminio y acero inoxidable. Los colores rojos se asocian a cobre y latón mientras que los azules indican acero inoxidable y aluminio. Esta tecnología presenta el inconveniente de que su funcionamiento no es estable ante la heterogeneidad en las formas de las partículas, propia de la naturaleza de los residuos.

Las características de las tecnologías estudiadas se recogen en la tabla 6. Donde se muestran las condiciones en las que trabajan, la fase de desarrollo en la que se encuentran y el rango de tamaño de partículas sobre el cual trabajan.

Tabla 6. Principales características de funcionamiento de las tecnologías estudiadas.

Tecnología	Fracción	Condición de funcionamiento	Directo / indirecto	Fase de comercialización
Separador Eddy Current	> 5 mm	Seco	Directo	Comercializada
Separador Wet Eddy Current	> 5 mm	Húmedo	Directo	Comercializada
Separador triboelectrostático	-	Seco	Directo	Comercializada
Hidrociclón	> 50 μ m	Húmedo	Directo	Comercializada
Separador Jig	-	Seco	Directo	Comercializada
Separador Magnético por Densidades (MDS)	> 1 -2 mm	Húmedo	Directo	Comercializada
Advanced Dry Recovery (ADR):	>2 mm	Seco	Directo	Comercializada
Tecnología AEB:	> 100 μ m	Húmedo	Directo	Piloto
Espectroscopía de ruptura por láser (LIBS):	> 10 mm	Seco	Indirecto	Laboratorio
Separación por rayos XRT	> 10 mm	Seco	Indirecto	Laboratorio
Separación óptica	-	Seco	Indirecto	Laboratorio

1.10. Evaluación de la viabilidad técnica

Para realizar una estimación de las cantidades de metales no férricos de interés que se podrían recuperar en el flujo fino de la fracción de rechazo de la Planta de Valorización de Escorias existente (Figura 8), se han analizado las tecnologías que trabajan para el rango de tamaño de partículas que se estudia en este trabajo, a continuación se ha examinado el grado de desarrollo en el que se encuentran, las principales ventajas y desventajas de dichas tecnologías, eligiéndose la unidad Advanced Dry Recovery (ADR), la tecnología AEB y el Separador Magnético por Densidades (MDS). Estas tecnologías, sus características, ventajas e inconvenientes, se recogen en la tabla 7.

No obstante, es importante señalar que debido a la escasez de datos disponibles, se ha asumido que las separaciones tendrían la misma eficacia que en los casos de estudio que se detallan a continuación, a pesar de las diferencias en composición y características de los flujos que se tratan. Asimismo, este análisis deberá ser considerado como una evaluación técnica como primera aproximación, la cual deberá ser acompañada de una evaluación económica antes de ser puesta en marcha.

Tecnología Ash Dry Recovery (ADR)

Los datos recogidos en la tabla 8 se obtuvieron de un estudio realizado en la planta de Sluiskil, Holanda. Se trataron 200 toneladas de escorias de fondo, con un tamaño de partícula de 0-8mm. El cual fue sometido al tratamiento de Ash Dry Recovery (ADR) obteniendo tres fracciones, una fina, una gruesa y una muy fina de rechazo 0-2mm, para luego conducir a las dos primeras a un separador inductivo Eddy Current, obteniendo dos flujos de recuperación.

Tabla 7. Tecnologías con mayor grado de desarrollo para la recuperación de metales no férrico.

	Unidad ADR	Tecnología AEB	Separador Magnético de Densidades (MDS)
Fase de la tecnología	Comercializada	Planta piloto	Comercializada
Proceso de Tratamiento	Cribado en seco Separación en unidad ADR Windsifter Sep. magnético/ inductivo	Cribado húmedo Hidroclón, Jig Windsifter Separador magnético/inductivo	Separador magnético por densidades Separador magnético/inductivo Secado
Fracción de tratamiento	>2 mm	> 100 μ m	> 1 -2 mm
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Compatible con equipos convencionales de recuperación. • Apto para escorias con humedad típica. • La recuperación de Al en la fracción de 2-8 mm de las escorias pasa del 37% al 89%. 	<ul style="list-style-type: none"> • Separación en distintas fracciones según su densidad. • Elevado grado de recuperación en la fracción fina superior a 2 mm. • Capacidad de recuperar metales preciosos (Ag, Au) 	<ul style="list-style-type: none"> • Separación en dos fracciones concentradas en metales, con potencial de aumentar dicho espectro. Flujos aptos para fundiciones. • Capacidad de recuperar cobre, plomo y metales preciosos (Au, Ag).
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Se desaprovecha un flujo importante de metales no férricos presentes en los finos a costa de optimizar la recuperación de la fracción 2-8mm. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere la gestión del residuo líquido generado al finalizar su vida útil. • Requiere secado de los materiales recuperados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere la gestión de residuo del ferrofluido. • Requiere secado de los materiales recuperados.
Referencias	De Vries 2009. Pan et al, 2008. Inashco, 2017.	Hu, 2009. Alarcón, 2015. Muchová, 2011.	Muchová et al, 2009. Böni, 2013. Muchová, 2010.

Tabla 8. Datos obtenidos en la Planta de Sluiskil, Holanda.

Escorias de Incineración	Fracción gruesa	Fracción fina	Fracción ultrafina
% del Flujo	2,47%	2,73%	94,80%
% de metal no férrico presente en la fracción recuperada	28,39%	5,60%	Se desecha

Para aplicar dichos niveles de recuperación de metales no férricos al flujo de TIRCANTABRIA se deberá determinar el flujo de muestra. Debido a las fracciones elegidas para el análisis en laboratorio, se elegirá la fracción 0-6 mm puesto que es la que más se asemeja al estudio realizado en la Universidad de Delft. Para el desarrollo se utilizarán los flujos 0-2 mm (ultrafina) (4.435,70 t) y 2-6 mm (3.436,88 t) estimados en la tabla 2, sumados formarán las 7.872,58 t de flujo 0-6mm de entrada. Los datos del estudio solo permiten estimar el flujo recuperado tras su paso por la unidad ADR y el separador inductivo, obteniendo un total de 194,45 t de flujo no férrico de la fracción gruesa y 214,92 t de la fracción fina. Los datos se recogen en la tabla 9.

Tabla 9. Cantidad de metal no férrico que se recupera con el método ADR de la fracción 0-6mm de TIRCANTABRIA.

Escorias de Incineración	NF Fracción gruesa	NF Fracción fina	NF ultrafina	Flujo total (0-6mm)
Flujo (t)	194,45 t	214,92 t	7.463,20 t	7.872,58 t
Contenido potencial de Metales No férricos (t)	55,20 t	12,03t	Se desecha	67,24 t

De esta forma se han estimado dos flujos de recuperación, el no férrico de la fracción gruesa (194,45 t) y el de la fracción fina (214,92 t). Empleando las concentraciones del artículo de De Vries (2009) se estima un contenido total de metales no férricos de 67,20 t. Considerando que un separador Eddy current convencional recupera un 60 % Al, 25 % otros metales (Cr, Ni, Cu), 15 % residuo (MTD, 2011), se estima una recuperación máxima de 16,80 t/año de metales no férricos distintos del aluminio.

Tabla 10. Contenido de metales no férricos en la fracción 0-6mm de Tircantabria.

Elemento	metales recuperables (t)
Cr	3,45
Ni	1,85
Cu	30,30
Total	35,61

Por otro lado, según los datos recogidos durante el año 2016, el contenido de Cu, Cr, Ni en la fracción 0-6mm es de 35,61 t (tabla 10). Obteniendo un grado de recuperación del 47,17%. De esta forma se ve que pese a poseer un 89% de separación tras el ADR (De Vries, 2009), el porcentaje total de recuperación es bajo debido al desaprovechamiento de la fracción 0-2 mm.

Tecnología AEB

Los índices de recuperación de este tratamiento para la fracción 0-20 mm de escorias de incineración fueron investigados por Muchová (2006). Los resultados se recogen en la tabla 11.

Tabla 11. Datos de recuperación de metales en la planta piloto de AEB.

Escorias de incineración	Fracción 6-20 mm	Fracción 2-6 mm	Fracción <2 mm
Recuperación de metales no férricos	77%	81%	40%

Utilizando los datos de generación anual de rechazo de escorias finas de incineración de TIRCANTABRIA, se podrá estimar la cantidad de metales no férricos recuperados. Dichos datos se recogen en la tabla 12. Además, se deberá tener en cuenta que las fracciones analizadas en el desarrollo de este proyecto fueron la 0-2mm, 2-6mm y 6-14mm, por tanto, se deberá considerar que el rango de la fracción más gruesa no coincide con el del análisis de Muchová.

Para calcular la cantidad total de material no férrico presente en las tres fracciones de interés se utilizan los datos recogidos en la tabla 3.

Tabla 12. Estimación de recuperación de metales no férricos según separación húmeda de AEB aplicado al flujo de TIRCANTABRIA.

Escorias de Incineración	Fracción 6-14 mm	Fracción 2-6 mm	Fracción <2 mm	Flujo total (0-20 mm)
Contenido de metales no férricos flujo TIRCANTABRIA	23,26 t	28,75 t	25,39 t	77,41 t
Cantidad potencial de metales no férricos recuperados	17,91 t (76,7%)	23,29 t (81%)	10,16 t (40%)	51,36 t 66,3%)

Según los datos obtenidos tras aplicar esta técnica, el tratamiento húmedo de AEB recuperaría aproximadamente 51,36 t/año de metales no férricos. Los resultados del análisis de laboratorio indican que el contenido total de metales no férricos en la fracción 0-14mm es de 77,41 t/año. Esto supone un grado de recuperación del 66% de los metales no férricos en esa fracción.

Tecnología LiqueSort

Muchová et al (2009) realizaron un análisis del Método de Separación Magnética (MDS) desarrollado por LiqueSort con el objetivo de estudiar la recuperación de metales preciosos de la escoria de incineración de residuos municipales. Se analizó el grado de recuperación en la fracción 2-6mm de una muestra de escorias generadas en las plantas de Amsterdam y de Ludwigshafen.

Para ello se estableció la separación magnética por densidades en tres fracciones: vidrio/piedra, cobre/zinc (fracción ligera) y metales preciosos (fracción pesada). Los resultados para los componentes de interés de las fracciones de pesada y ligera recuperados se recogen en la tabla 13.

Tabla 13. Datos de recuperación de metales no férricos según método MDS.

Compuesto	Fracción ligera del MDS	Fracción pesada del MDS
Zinc	96%	4%
Cobre	94%	6%
Plomo	74%	26%

De los porcentajes de recuperación se observa que se consiguió recuperar hasta el 88% del oro conduciéndolo en la fracción pesada, así mismo, se observó que un 96% del cobre fue recuperado por la fracción ligera.

Tabla 14. Estimación de recuperación de metales no férricos según método MDS aplicado al flujo de TIRCANTABRIA.

Escorias de incineración	Fracción ligera del MDS	Fracción pesada del MDS	Flujo total
Cantidad potencial de Cobre recuperado	36,36 t	2,32 t	38,68 t
Cantidad potencial de Plomo recuperado	9,42 t	3,31 t	12,73 t

Aplicando estos valores a las cifras de producción anual de Tircantabria para estimar la recuperación del plomo y cobre. Se obtiene que aproximadamente 36 t de cobre que podrán ser recuperadas en la fracción ligera junto con el zinc (Tabla 14).

Es importante señalar que en el estudio de Muchová et al (2009) se han conseguido tres fracciones, más no la recuperación de cada elemento por separado. La segregación en dichas fracciones se estableció en base a su potencial comercialización. Donde la fracción cobre-zinc puede ser vendida a fundiciones de latón o cobre debido a que se encuentra en una concentración superior a la requerida para estas actividades. Asimismo, se concluye que las futuras líneas de investigación deberán centrarse en la separación magnética por densidades aplicado al flujo 0-2 mm (Muchová et al, 2009). En la tabla 15 se recoge una comparación en paralelo de las cantidades estimadas de recuperación.

Tabla 15. Estimación de recuperación de metales no férricos de TIRCANTABRIA según tecnologías más desarrolladas.

Flujo	Tecnología MDS	Tecnología ADR (2-6 mm)		Tecnología AEB		
	2-6 mm	Fracción fina	Fracción gruesa	<2 mm	2 - 6 mm	6 - 14 mm
Metales no férricos	36,36 t Cu 9,42 t Pb	3,01 t mezcla NF	13,80 t mezcla NF	10,16 t Mezcla NF	23,29 t Mezcla NF	17,91 t Mezcla NF
% Recuperación	94% Cu	47,17%		66,00%		

2. Conclusiones

El análisis de la recuperación de los metales no férricos presentes en la fracción fina del rechazo de la Planta de Valorización de Escorias de Tircantabria representa un avance más en la implantación de la economía circular a nivel local, donde se opta por gestionar los residuos como recursos y se busca reintegrar a la cadena productiva un flujo destinado a eliminación.

La naturaleza heterogénea de los residuos municipales, y por ende de las escorias de incineración, exige un periodo largo de muestreo para su correcta caracterización y análisis. Tras valorar los correspondientes a los meses de invierno se ha identificado que el flujo de rechazo de escorias finas 0-14 mm tiene un contenido de humedad medio de 15,1%, valor por debajo de la media de este tipo de flujo según la bibliografía consultada. A su vez, se ha observado que en esta fracción el diámetro medio de partícula es de 2,1 mm y que la fracción con mayor contenido de metales no férricos de interés, corresponde a la 2-6 mm. Encontrándose elevadas concentraciones de cobre, plomo y cromo. (3,68 g/kg, 2,83 g/kg y 0,516 g/kg respectivamente).

Pese a representar bajas concentraciones, al extrapolar dichos valores al flujo anual, estos adquieren unas cifras importantes. Se estima un contenido anual de 77,4 t de los metales no férricos analizados en el flujo de rechazo de la planta. De estos, 38,7 t corresponderían al cobre.

Con el objetivo de estudiar la viabilidad de la recuperación de estos metales, se han analizado las tecnologías que desarrollan dicha separación así como los procesos que incluyen dichas tecnologías en la actualidad, tanto las que se encuentran en fase de pruebas como las que ya se comercializan. Clasificándose en dos categorías, los que realizan la separación directa y los que lo hacen de manera indirecta, pudiendo trabajar en condiciones secas o de humedad.

El estudio de las tecnologías de separación directa se concluye que el separador inductivo Eddy Current convencional, pese a ser la técnica más extendida, no es eficaz para partículas de pequeños diámetros. Sin embargo, su funcionamiento se ve mejorado cuando una unidad ADR le precede, apartando este la fracción <2 mm de la línea, de esta forma el separador Eddy Current puede recuperar hasta un 89% del no férrico del flujo que le alimenta. Sin embargo, esta cifra se ve reducido a un 47,17% al evaluar la totalidad del flujo inicial.

Por su parte, los métodos de separación húmedos introducen nuevas variables como la densidad para separar el flujo en distintas fracciones o la adherencia combinada con la convencional separación inductiva. Alcanzando así porcentajes de recuperación mayores, como es el caso de la separación MDS que es capaz de recuperar hasta el 96% de plomo, cobre o zinc.

Las tecnologías de separación indirecta representan técnicas automatizadas que pretenden el aprovechamiento máximo tecnológico para la recuperación de los distintos materiales contenidos en los residuos, sin embargo, estos no se encuentran lo suficientemente desarrollados para la naturaleza propia de las escorias de incineración de residuos municipales.

Asimismo, tras el estudio, se ha revelado que la mayoría de los tratamiento existentes se limitan a recuperar el conjunto de los metales no férricos del flujo total sin proporcionar la posibilidad de diferenciarlos. En este contexto, la Separación Magnética por Densidades si proporciona la capacidad de aislar los metales no férricos y también posibilita la segregación en fracciones de concentrados. Esto significa la alternativa viable de separar metales en grupos comercializables aptos para las fundiciones, como es el caso del flujo Cu-Zn. La tecnología MDS presenta altos índices

de recuperación en la fracción más rica de estos metales y obtiene flujos con concentraciones aptas para fundiciones de cobre o latón.

Esta primera aproximación en la evaluación de alternativas deberá acompañarse de una evaluación económica antes de su puesta en marcha, así como una toma de contacto comercial para analizar en profundidad el potencial de recuperación en el flujo propio.

Asimismo, se apuesta por continuar con la investigación de este flujo para la recuperación de los metales presentes y valoración de alternativas para la reutilización del árido de rechazo, como ya se realiza en países como Suiza, Holanda o Alemania.

3. Bibliografía

AENOR. (1997). UNE-EN 932-1:1997 Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 1: Métodos de muestreo. Madrid: AENOR.

AENOR. (2003). Norma UNE-EN 13656:2003. Caracterización de residuos. Digestión con mezcla de ácido fluorhídrico (HF), ácido nítrico (HNO₃) y ácido clorhídrico (HCl), asistida con microondas, para la posterior determinación de elementos. Madrid: AENOR.

AENOR. (2007). UNE-EN 12880:2001. Caracterización de lodos. Determinación de la humedad y del contenido en materia seca. Madrid: AENOR.

AENOR. (2015). Norma UNE-EN 14899:2007. Caracterización de residuos. Toma de muestras de residuos. Esquema para la preparación y aplicación de un plan de muestreo. Madrid: AENOR.

ALARCÓN, Manuel Alejandro Ospina; RÚA, Moisés Oswaldo Bustamante. Estudio hidrodinámico de equipos de concentración gravimétrica tipo JIG. *Prospectiva*, 2015, vol. 13, no 1, p. 52-58.

ANDRÉ, Francisco J., et al. Gestión de residuos sólidos urbanos: análisis económico y políticas públicas. *Cuadernos económicos de ICE*, 2006, vol. 71, p. 71-91.

ARENA, Umberto; DI GREGORIO, Fabrizio. A waste management planning based on substance flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 2014, vol. 85, p. 54-66.

BÖNI, Maturitätsarbeit Laura. Accumulation of recovered gold from bottom ash. 2013.

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Escorias y cenizas de incineradora de residuos sólidos urbanos (RSU). Ministerio de Fomento. Diciembre 2007.

CHIMENOS, J. M., et al. Characterization of the bottom ash in municipal solid waste incinerator. *Journal of hazardous materials*, 1999, vol. 64, no 3, p. 211-222.

COMISIÓN EUROPEA. Environmental statistics and accounts; sustainable development. Guidance on municipal waste data collection. Septiembre 2016.

DE VRIES, Walter; REM, Peter; BERKHOUT, Peter. ADR: a new method for dry classification. En *Proceedings of the ISWA international conference*. 2009. p. 103-113.

ESPAÑA. Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos, de residuos y suelos contaminados. *Boletín Oficial del Estado*, de 29 de julio de 2011, núm. 181, p 85650.

ESPAÑA. Real Decreto 180/2015, de 13 de marzo, por el que se regula el traslado de residuos en el interior del territorio del Estado. *Boletín Oficial del Estado*, de 7 de abril de 2015, núm. 83, p 29388.

EUROSTAT. Comisión Europea. Estadísticas sobre residuos. [Consultado 1 de Mayo de 2017] Disponible en: <http://www.eurostat.com>.

GISBERTZ, Kilian, et al. Metallurgische Verwertbarkeit aufbereiteter NE-Metallkonzentrate aus MV-Rostaschen. *World of Metallurgy—Erzmetall*, vol. 67, no 2, p. 89-98.

GOBIERNO DE CANTABRIA. Plan de Residuos de la Comunidad Autónoma de Cantabria 2017-2023. Consejería de Universidades e Investigación, Medio Ambiente y Política Social.

GROSSO, Mario; BIGANZOLI, Laura; RIGAMONTI, Lucia. A quantitative estimate of potential aluminium recovery from incineration bottom ashes. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011, vol. 55, no 12, p. 1178-1184.

GUNDUPALLI, et al. A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling. *Waste Management*, 2017, vol. 60, p. 56-74.

HU, Bin; REM, Peter; VAN DE WINCKEL, T. Fine heavy non-ferrous and precious metals recovery in bottom ash treatment. TU Delft, 2009.

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE. Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022.

MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO. El Sector del reciclaje de metales en España. Observatorio Industrial del Sector del Metal, 2010.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO. Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos. Documento BREF. 2011.

MUCHOVÁ, L.; REM, P. C. Metal content and recovery of MSWI bottom ash in Amsterdam. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 2006, vol. 92.

MUCHOVÁ, Lenka. Wet physical separation of MSWI bottom ash. 2010.

MUCHOVA, Lenka; BAKKER, Erwin; REM, Peter. Precious metals in municipal solid waste incineration bottom ash. Water, Air, & Soil Pollution: Focus, 2009, vol. 9, no 1, p. 107-116.

PAN, Jill R., et al. Recycling MSWI bottom and fly ash as raw materials for Portland cement. Waste Management, 2008, vol. 28, no 7, p. 1113-1118.

SETTIMO, Francesca; BEVILACQUA, Paolo; REM, Peter. Eddy current separation of fine non-ferrous particles from bulk streams. Physical Separation in Science and Engineering, 2004, vol. 13, no 1, p. 15-23.

STEINER GLOBAL. (2015). <<http://www.steinertglobal.com>> [Consultado 3 junio 2017]

UNE-EN 14899:2007 "Caracterización de residuos. Toma de muestras de residuos. Esquema para la preparación y aplicación de un plan de muestreo".

UNIÓN EUROPEA. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité económico y social europeo y al Comité de las regiones. Hoja de ruta hacia una Europa eficiente en el uso de los recursos. 20 de septiembre de 2011.

UNIÓN EUROPEA. Decisión 2001/118/CE de la Comisión, de 16 de enero de 2001, por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE en lo que se refiere a la lista de residuos. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 16 de febrero de 2001 (47), 1-31.

UNIÓN EUROPEA. Decisión 2014/955/UE de la Comisión, de 18 de diciembre de 2014, por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE, sobre la lista de residuos, de conformidad con la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo Texto pertinente a efectos del EEE. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, 30 de diciembre de 2014 (370), 44-86.

UNIÓN EUROPEA. Directiva 1999/31/CE del Consejo de 26 de abril de 1999 relativa al vertido de residuos. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, de 16 de julio de 1999, núm. 182.

UNIÓN EUROPEA. Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, de 22 de noviembre de 2008, núm. 312, p 3.

4. Anexos

Anexo 1. Datos de producción anual de la Planta de Valorización de Escorias de TIRCANTABRIA

	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBR	OCTUBRE	NOVIEMBR	DICIEMBRE	TOTAL (t)
Escorias a nave de maduración (t)	1.753,11	866,72	1.937,34	1.722,68	1.723,82	1.769,04	1.791,54	2.005,78	1.745,16	1.596,20	1.692,38	1.999,86	20.603,63
Escorias tratadas (t)	2.281,55	275,00	1.820,60	1.551,68	1.596,56	1.670,44	1.694,26	1.910,16	1.569,96	1.615,75	1.467,67	1.881,86	19.335,49
Rechazo escorias finas 0-35 (t)	1.723,98	164,50	1.344,50	1.168,26	1.246,52	1.290,54	1.309,30	1.454,22	1.182,48	1.202,70	1.068,78	1.411,44	14.567,22
% escorias tratadas	0,76	0,60	0,74	0,75	0,78	0,77	0,77	0,76	0,75	0,75	0,73	0,75	75,34%
Rechazo escorias gruesas 35-150 (t)	243,16	84,98	215,48	144,42	140,54	163,12	160,54	175,22	141,84	156,52	130,88	186,36	1.943,06
% escorias tratadas	0,11	0,31	0,12	0,09	0,09	0,10	0,09	0,09	0,09	0,10	0,09	0,10	10,05%
Inoxidable escorias (t)	7,16	0,70	5,76	6,34	5,00	5,58	5,00	6,40	6,00	4,75	4,33	7,24	64,26
% escorias tratadas	0,31%	0,25%	0,32%	0,41%	0,31%	0,33%	0,30%	0,34%	0,38%	0,29%	0,30%	0,39%	0,33%
Motores eléctricos (t)									2,80	1,92	2,30	1,92	8,94
% escorias tratadas	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,18%	0,12%	0,16%	0,10%	0,05%
Ferrico escorias >22 (t)	247,82	19,32	203,82	183,04	155,72	160,68	165,46	208,42	178,10	188,88	206,16	213,10	2.130,52
% escorias tratadas	10,86%	7,03%	11,20%	11,80%	9,75%	9,62%	9,77%	10,91%	11,36%	11,70%	14,07%	11,34%	11,02%
Ferrico escorias 0-22 (t)	8,44	1,00	6,00	8,70	7,00	15,82	12,00	15,02	14,98	14,96	17,04	17,38	138,34
% escorias tratadas	0,37%	0,36%	0,33%	0,56%	0,44%	0,95%	0,71%	0,79%	0,96%	0,93%	1,16%	0,92%	0,72%
Aluminio escorias 0-35 (t)	35,63	3,50	31,64	31,18	32,28	28,38	35,96	40,94	33,76	33,24	31,18	27,90	365,59
% escorias tratadas	1,56%	1,27%	1,74%	2,01%	2,02%	1,70%	2,12%	2,14%	2,15%	2,06%	2,13%	1,48%	1,89%
Aluminio escorias >35 (t)	15,36	1,00	13,40	9,74	9,50	6,32	6,00	9,94	10,00	12,78	7,00	16,52	117,56
% escorias tratadas	0,67%	0,36%	0,74%	0,63%	0,60%	0,38%	0,35%	0,52%	0,64%	0,79%	0,48%	0,88%	0,61%

Anexo 2. Resultado de los análisis. Concentraciones de metales no férricos (mg/kg) en las distintas muestras.

Fracción	Elemento	Conc. dic (mg/kg)	Conc. enero (mg/kg)	Invierno		
				Conc. marzo (mg/kg)	Media invierno (mg/kg)	Error (%)
0-2 mm	Cr	376.3±26	308.4±35	358.6±114	347.8±35	10.1
	Ni	193.7±49	179.0±23	189.6±51	187.4±8	4.1
	Cu	2795.0±82	2567.6±540	4071.4±433	3144.7±811	25.8
	Zr	69.2±3	56.0±7	72.8±2	67.4±7	9.8
	Sn	232.9±14	228.7±70	305.2±20	255.6±43	16.8
	Sb	113.1±4	84.5±8	90.8±3	96.1±15	15.6
	W	8.8±3	5.5±1	11.8±5	8.7±3	36.1
	Pb	1492.2±43	876.8±50	1040.0±122	1136.3±319	28.1
2-6 mm	Cr	1036.0±131	313.1±26	317.6±30	555.6±416	74.9
	Ni	575.0±92	159.8±14	161.7±20	298.8±240	80.0
	Cu	3720.4±630	3690.2±564	6861.9±1246	4757.5±1822	38.3
	Zr	147.0±13	67.1±1	132.1±16	115.4±42	36.8
	Sn	331.4±1	206.7±25	327.6±68	288.6±71	24.6
	Sb	105.8±7	93.1±4	123.7±17	107.5±15	14.3
	W	8.0±4	4.5±1	5.0±1	5.8±2	31.8
	Pb	3040.1±409	1525.9±513	2144.3±496	2236.8±761	34.0
6-14 mm	Cr	326.0±1	308.9±14	336.8±3	323.9±14	4.3
	Ni	163.0±5	130.4±4	193.5±38	162.3±32	19.4
	Cu	1741.1±82	1439.2±127	1618.7±318	1599.7±152	9.5
	Zr	130.3±33	192.5±13	197.3±4	173.4±37	21.6
	Sn	146.5±11	122.8±3	163.3±22	144.2±20	14.1
	Sb	84.6±2	74.5±2	80.0±5	79.7±5	6.3
	W	7.9±1	4.3±1	2.8±0	5.0±3	52.9
	Pb	3384.6±3522	974.4±77	2720.6±324	2359.9±1245	52.8

Anexo 3. Plan de toma de muestras de la fracción fina de escorias

El siguiente paso en el estudio de la viabilidad de la recuperación de los metales no férricos presentes en la fracción fina de las escorias de incineración generadas por TIRCANTABRIA, es planificar un programa de recogida de muestras. La elaboración dicho plan de muestreo se realizó según la norma UNE-EN 14899:2007 “Caracterización de residuos. Toma de muestras de residuos. Esquema para la preparación y aplicación de un plan de muestreo”.

1. Especificación del objetivo del Programa de ensayo:

Dicho ensayo tiene como finalidad obtener muestras representativas para determinar la variabilidad en tamaño y composición de las escorias para su posterior caracterización en cuanto a su granulometría, su composición química y su mineralogía, permitiendo así conocer la distribución de los metales en las distintas fracciones, así como las fases mayoritarias presentes.

2. Desarrollar las metas técnicas del objetivo:

2.1. Definición de la población que se va a muestrear:

Se trata de la cantidad total de material del que se quiere obtener información mediante muestreo, para este caso, la población global es la fracción final del proceso de valorización de escorias de incineración producidas por TIRCANTABRIA durante 10 meses, formada por los rechazos de fracción fina (<22mm) y fracción 22-35mm. Así pues, el tamaño de partícula de esta población será de 0-35mm.

2.2. Evaluación de la variabilidad:

Este flujo se ha considerado con característica de variabilidad temporal aleatoria, propia de los residuos domésticos y asimilados y variabilidad inter-estratos debido a la variabilidad espacial entre diferentes estratos de la parva final.

Ante la variabilidad temporal se propuso la toma de muestra diaria, semanal, mensual y estacional durante 10 meses para cumplir con el objetivo global del muestreo.

Por su parte, ante la variabilidad inter-estratos se propuso la toma de muestra en continuo en distintos momentos y procurando siempre tomar la muestra lo más representativa posible.

2.3. Selección del enfoque de muestreo:

Se adopta el muestreo probabilístico puesto que se requiere un nivel cuantificable de fiabilidad en los resultados de la población a ensayar. Esto supone que la totalidad de las escorias producidas son accesibles para el muestreo.

2.4. Identificación de la escala:

La escala del ensayo es la producción anual de escorias, cifra que se estimó en 16900 t/año. Sin embargo, los datos al cierre del curso 2016 arrojaron una producción de 19.326,55 t.

2.5. Elección del parámetro estadístico requerido:

El nivel de ensayo es el de caracterización básica, requiriendo mediciones de la variabilidad y el comportamiento límite de los componentes clave para cuantificar la concentración media de metales no férricos de interés (Cr, Cu, Ni, Pb, Sb, Sn, W y Zr).

Los metales han sido clasificados según el interés que representan, pudiendo ser de interés ambiental, económico o de ambos (Figura 1). Aquellos con interés económico y ambiental que se encuentren con una concentración mayor de 10 mg/kg serán objeto de estudio.

As	Ag	Zr	Yb	■ Interés económico y > 10 mg/kg
Ba	Bi	Co	Zn	
Cd	Ga	Se	Pr	■ Interés económico y > 10 mg/kg
Cr	Ge	Sr	Y	
Cu	In	V	Nb	■ Preocupación ambiental
Hg	Pd	Ce	Hf	
Ni	Ta	Nd	Rb	
Pb	Te	Eu	Sc	
Sb	Mo	Tb	Au	
Sn	W	Dy	La	

Figura 1. Metales no férricos de interés.

3. Determinación de las instrucciones prácticas

3.1. Elección del patrón de muestreo

Se ha determinado un muestreo aleatorio simple, cada porción de la población tiene la misma probabilidad de ser seleccionada como una muestra. El muestreo se realiza a intervalos de tiempo fijados durante los 6 días de la semana que opera la planta y se ejecuta por la mañana debido a la disponibilidad de operarios.

Asimismo, la toma de muestras se realiza en el punto de muestreo señalado en el diagrama de la planta de la figura 2. La parva que se señala será formada por el rechazo de

3.2. Determinación del tamaño de la muestra

Para el cálculo del tamaño de la muestra, se utilizó la ecuación 1, formulada en la citada norma EN 14899.

Tamaño de la muestra:

$$M_{\text{sam}} = \frac{1}{6} \pi \cdot D_{95}^3 \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{1-p}{CV^2 \cdot p} \quad (\text{Ec 1})$$

M_{sam} es la masa de la muestra en g.

D_{95} es el tamaño máximo de partícula (definido como el percentil 95), en cm.

ρ es la masa específica de las partículas en el material, en g/cm³.

g es el factor de corrección para la distribución del tamaño de partícula.

CV es el coeficiente de variación deseado causado por el error fundamental.

Para el tamaño máximo de partícula de este ensayo (35mm) y considerando el material de la muestra de característica fina con amplia distribución de tamaño de partícula, pudiendo usar los valores por defecto ($\rho=2,6$ g/cm³; $g=0,25$; $p=0,02$), y $CV=0,1$. La masa resultante fue de 71501,01 g, redondeando, se estableció dicha cifra en 80 kg.

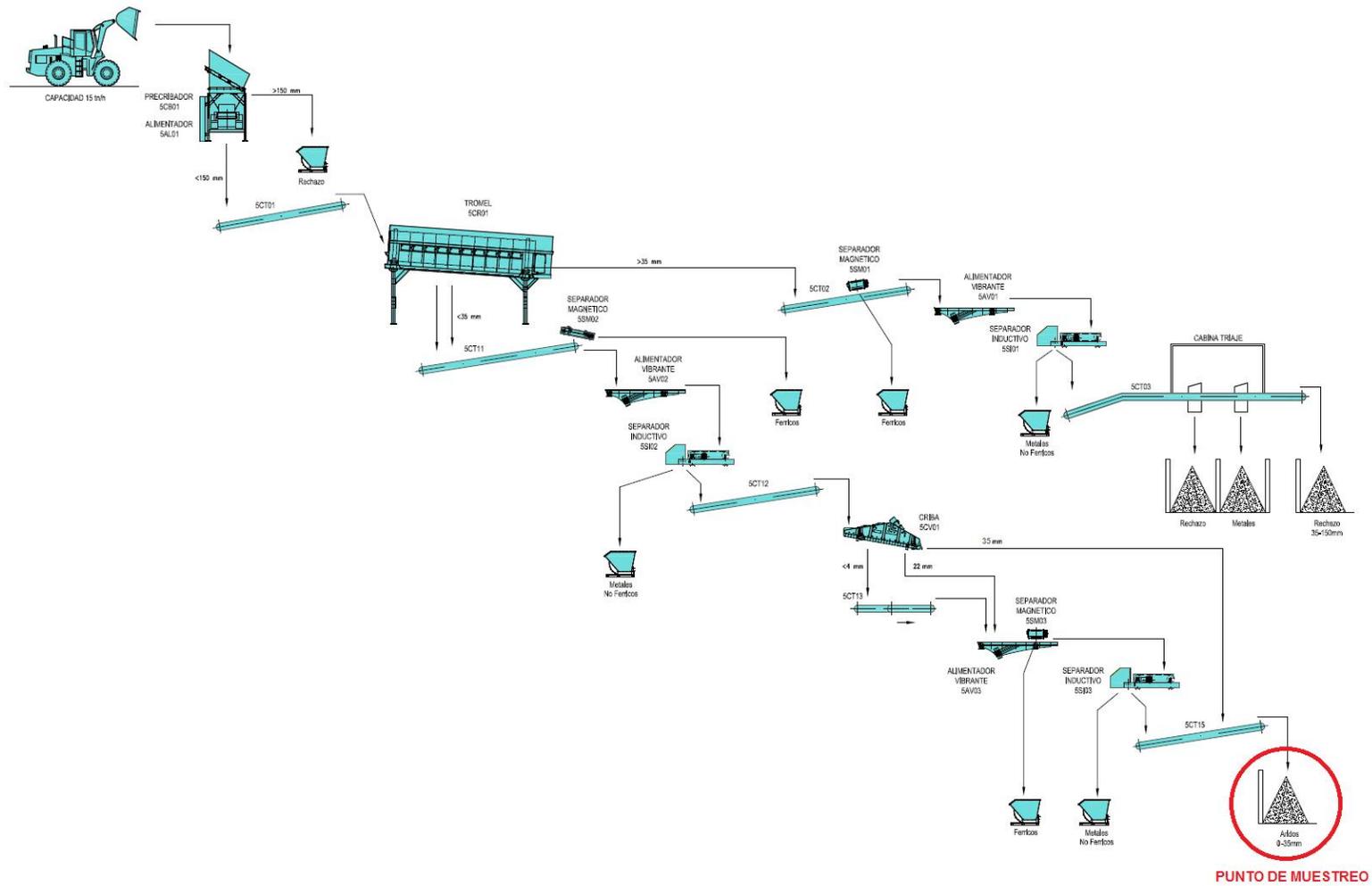


Figura 2. Punto de toma de muestras en la Planta de Valorización de Escorias.

Por tanto, se deberán tomar un total de 80kg de muestra a la semana, proveniente de distintas zonas y estratos de la parva final para asegurar su representatividad.

El siguiente paso consiste en realizar un tamizado in situ para segregar la fracción de interés 0-14 mm del resto de la muestra (Figura 3).

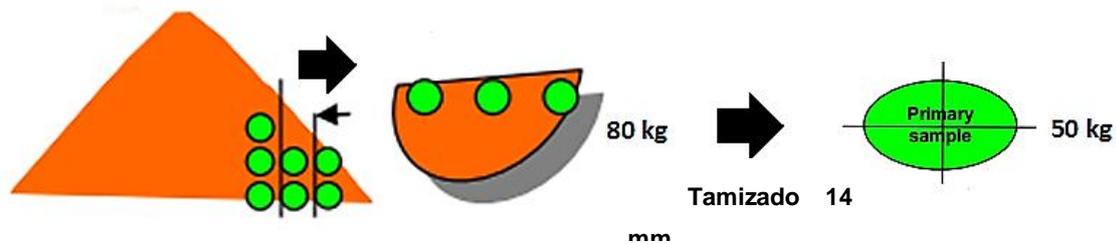


Figura 3. Obtención de la fracción de interés 0 – 14 mm

A partir de esta nueva muestra, que se estimó que sería un 70% de los 80kg iniciales, es decir, 56kg, y aproximándolo a 50 kg, se deberán realizar sucesivos cuarteos para la obtención de la muestra de laboratorio.

3.3. Definir los elementos estadísticos del Plan de muestreo

Se estableció que se tomaría una muestra diaria de lunes a sábado durante la cuarta semana de cada uno de los 10 meses pactados. De esta forma, las muestras se distribuyen en el tiempo de forma homogénea y tienen en cuenta la variabilidad estacional propia de la región.

La muestra mezclada se criba de forma manual y cuarteo el martes de la semana siguiente a cada toma de muestras (figuras 4 y 5). Es importante indicar que esta tarea se interrumpe durante el mes de febrero debido a la parada anual programada de mantenimiento. Además, para la evaluación del error de muestreo, en la primera toma de muestra para laboratorio se analizaron las dos muestras finales tras los cuarteos.

Como se ha calculado previamente, la muestra semanal deberá ser superior a los 80 kg por tanto, para asegurar dicha cifra se estableció que se recogerían 20 kg/día durante la semana de toma de muestras.

Calendario 2016

Septiembre							Octubre							Noviembre							Diciembre											
Lu	Ma	Mi	Ju	Vi	Sa	Do	Lu	Ma	Mi	Ju	Vi	Sa	Do	Lu	Ma	Mi	Ju	Vi	Sa	Do	Lu	Ma	Mi	Ju	Vi	Sa	Do					
			1	2	3	4						1	2																			
5	6	7	8	9	10	11	3	4	5	6	7	8	9	7	8	9	10	11	12	13	5	6	7	8	9	10	11					
12	13	14	15	16	17	18	10	11	12	13	14	15	16	14	15	16	17	18	19	20	12	13	14	15	16	17	18					
19	20	21	22	23	24	25	17	18	19	20	21	22	23	21	22	23	24	25	26	27	19	20	21	22	23	24	25					
26	27	28	29	30			24	25	26	27	28	29	30	28	29	30					26	27	28	29	30	31						

Figura 4. Calendario de los análisis a realizar durante el año 2016.

Calendario 2017

Enero							Febrero ☹							Marzo							Abril														
Lu	Ma	Mi	Ju	Vi	Sa	Do	Lu	Ma	Mi	Ju	Vi	Sa	Do	Lu	Ma	Mi	Ju	Vi	Sa	Do	Lu	Ma	Mi	Ju	Vi	Sa	Do								
						1							1	2	3	4	5								1	2								1	2
2	3	4	5	6	7	8	6	7	8	9	10	11	12	6	7	8	9	10	11	12	3	4	5	6	7	8	9								
9	10	11	12	13	14	15	13	14	15	16	17	18	19	13	14	15	16	17	18	19	10	11	12	13	14	15	16								
16	17	18	19	20	21	22	20	21	22	23	24	25	26	20	21	22	23	24	25	26	17	18	19	20	21	22	23								
23	24	25	26	27	28	29	27	28						27	28	29	30	31			24	25	26	27	28	29	30								
30	31																																		

Mayo							Junio							Julio							Agosto																
Lu	Ma	Mi	Ju	Vi	Sa	Do	Lu	Ma	Mi	Ju	Vi	Sa	Do	Lu	Ma	Mi	Ju	Vi	Sa	Do	Lu	Ma	Mi	Ju	Vi	Sa	Do										
						1						1	2	3	4								1	2								1	2	3	4	5	6
8	9	10	11	12	13	14	5	6	7	8	9	10	11	3	4	5	6	7	8	9	7	8	9	10	11	12	13										
15	16	17	18	19	20	21	12	13	14	15	16	17	18	10	11	12	13	14	15	16	14	15	16	17	18	19	20										
22	23	24	25	26	27	28	19	20	21	22	23	24	25	17	18	19	20	21	22	23	21	22	23	24	25	26	27										
29	30	31					26	27	28	29	30			24	25	26	27	28	29	30	31	28	29	30	31												

Septiembre							Octubre							Noviembre							Diciembre																
Lu	Ma	Mi	Ju	Vi	Sa	Do	Lu	Ma	Mi	Ju	Vi	Sa	Do	Lu	Ma	Mi	Ju	Vi	Sa	Do	Lu	Ma	Mi	Ju	Vi	Sa	Do										
						1	2	3							1								1	2	3	4	5								1	2	3
4	5	6	7	8	9	10	2	3	4	5	6	7	8	6	7	8	9	10	11	12	4	5	6	7	8	9	10										
11	12	13	14	15	16	17	9	10	11	12	13	14	15	13	14	15	16	17	18	19	11	12	13	14	15	16	17										
18	19	20	21	22	23	24	16	17	18	19	20	21	22	20	21	22	23	24	25	26	18	19	20	21	22	23	24										
25	26	27	28	29	30		23	24	25	26	27	28	29	27	28	29	30				25	26	27	28	29	30	31										

Figura 5. Calendario de los análisis a realizar durante el año 2017.

Por su parte, el número de análisis requerido será:

- El primer mes se tomarán 2 muestras/mes:
 $1 \text{ meses} * 2 \text{ muestra/mes} * 3 \text{ fracciones/muestra} * 2 \text{ análisis/fracción} = 12 \text{ análisis}$
- El resto de meses se tomará 1 muestra/mes:
 $9 \text{ meses} * 1 \text{ muestra/mes} * 3 \text{ fracciones/muestra} * 2 \text{ análisis/fracción} = 54 \text{ análisis}$
- Evaluación del error de cuarteo: $2 \text{ sub-muestras/fracción} * 3 \text{ fracciones} = 6 \text{ análisis}$
- Total: $12 + 54 + 6 = \boxed{772 \text{ análisis}}$

4. Técnica de cuarteo

Para realizar esta operación se seguirá la norma UNE-EN-932-1 de métodos de muestreo en ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos.

Tras haber pasado la muestra bruta que se ha recogido a lo largo de los seis días de la semana (120 kg) por la criba de 14mm, se recoge la nueva muestra sobre la superficie de trabajo, y se mezcla cuidadosamente, dándole la forma de un montón cónico, y removiéndola con la pala para formar un nuevo cono.

Para formar los conos, se deberá depositar cada palada sobre el vértice del nuevo cono, de manera que las partículas rueden sobre las pendientes de manera uniforme y bien distribuida, y que la mezcla de los diferentes tamaños sea adecuada. Se deberá repetir esta operación tres veces.

A continuación, tras haber realizado la operación anterior tres veces, se deberá aplastar el cono hundiendo la pala de manera repetida y en posición vertical en su vértice, a fin de formar un montón aplastado de espesor y diámetro uniforme (Figura 6).

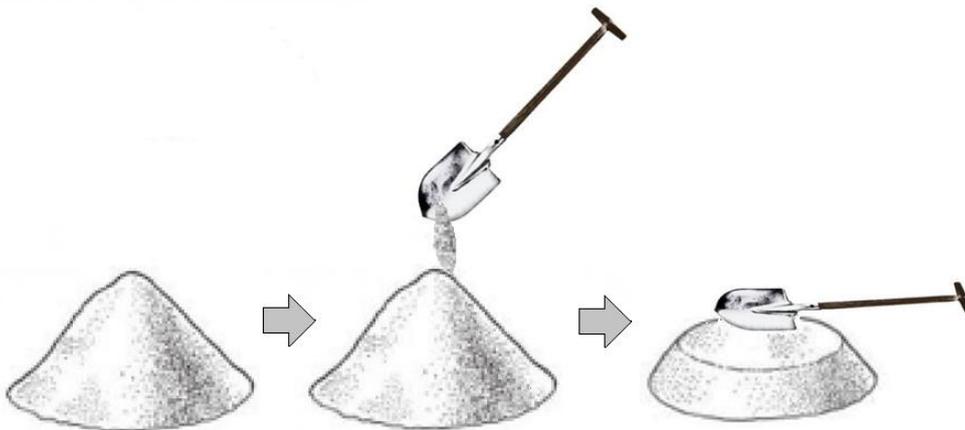


Figura 6. Mezclado y aplastado de muestra.

El siguiente paso consiste en realizar el cuarteo al montón que se ha aplastado y distribuido uniformemente sobre la superficie, siguiendo dos ejes que se corten en ángulos rectos. Eliminar dos cuartos opuestos y volver a formar un montón con el resto, con ayuda de la pala. Este nuevo montón tendrá una masa aproximada de 80 kg. (Figura 7).

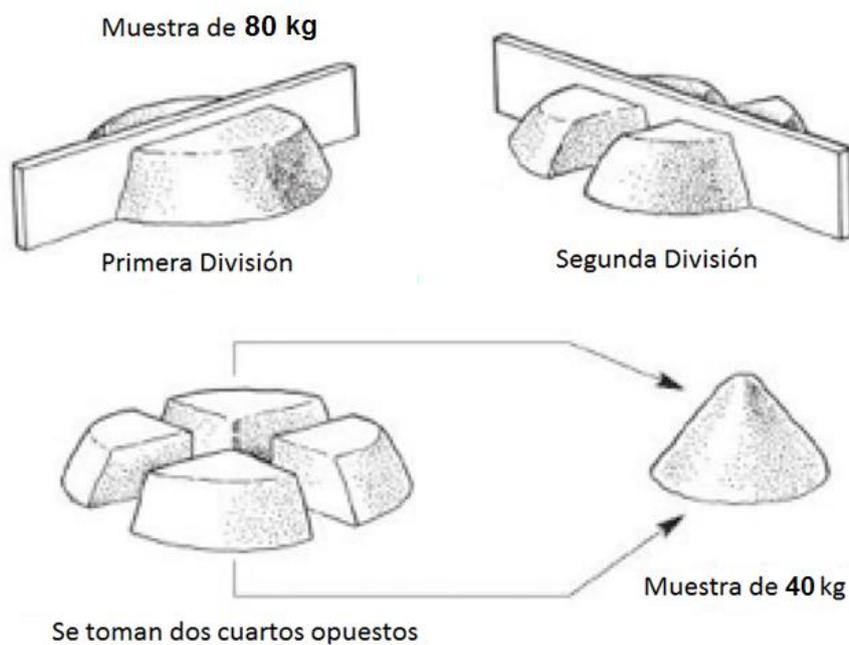


Figura 7. Proceso de cuarteo

Esta operación se repetirá al completo tres veces más, obteniendo una nueva muestra de 40kg, 20kg, 10kg y finalmente dos de 5kg. Tomándose siempre dos cuartos opuestos tras el cuarteo.

Esta nueva muestra será llevada al laboratorio del Departamento de Ingenierías Química y Biomolecular, para su preparación y posterior análisis.

La ejecución de la técnica de cuarteo in situ se recoge en el anexo 3. Informe de toma de muestras.

Anexo 4. Informe de Toma de muestras

Durante la semana del lunes 19 al sábado 24 de diciembre, se han recogido diariamente 20 kg de escorias procedentes de los áridos (rechazo de fracción 0-35 mm). Los 120 kg totales se han almacenado en una bolsa en un área cubierta de la planta de escorias.

Los 120 kg se han pasado por una mesa de cribado de luz de malla de 14mm cuyo rechazo ha sido de 12 kg (10%), se ha contado con un material de plástico en el suelo para evitar la contaminación de la muestra.



Figura 1. Muestra bruta pasando por la mesa de cribado 14 mm.

Siguiendo la norma UNE-EN-932-1 de métodos de muestreo en ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos, se ha distribuido toda la muestra resultante por el plástico, se ha formado un cono y se ha aplanado homogeneizando la muestra, formando una capa de igual espesor.



Figura 2. Distribución de la muestra cribada sobre la superficie.



Figura 3. Resultado de la distribución sobre la superficie.

A continuación, se ha realizado el primer cuarteo (masa total aproximada: 100 kg):



Figura 4. Primer cuarteo.

Se han desechado dos cuartos opuestas. Los otros dos cuartos se han vuelto a mezclar, homogeneizar y distribuir sobre la superficie para, a continuación, volver a cuartear.

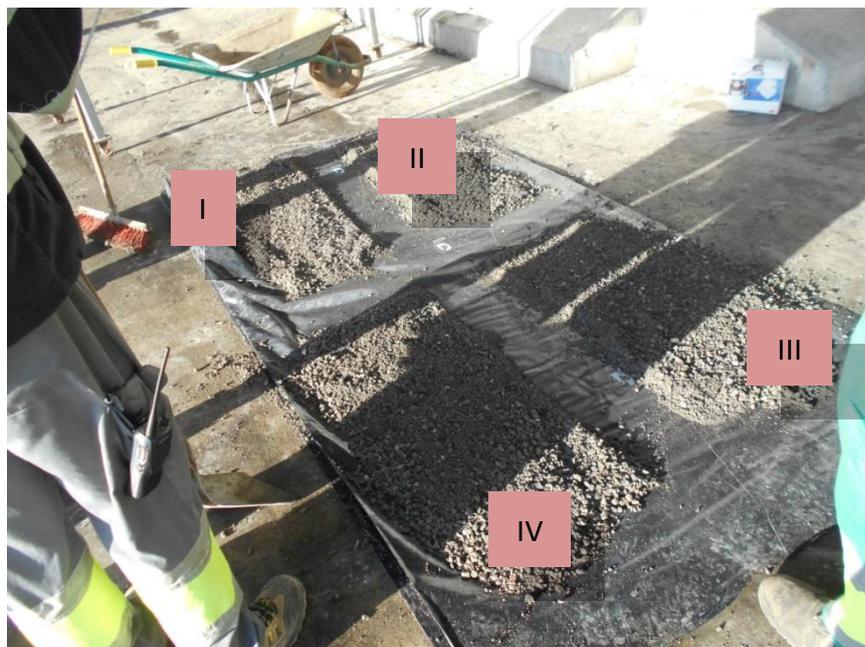


Figura 5. Segundo cuarteo

A partir de esta nueva muestra, se han tomado dos cuartos opuestos (II y IV) y se han agrupado y mezclado a la izquierda de la superficie, formando la nueva muestra A. Los otros dos cuartos opuestos (I y III) se han agrupado y mezclado a la derecha, formando B:



Figura 6. Mezcla de cuartos opuestos.

A continuación, se han cuarteado las dos nuevas muestras A y B (masa aproximada de cada una de ellas: 25 kg):



Figura 7. Tercer cuarteo.



Figura 8. Resultado del tercer cuarteo, A y B cuarteados.

De la muestra A se han desechado dos cuartos opuestos, los otros dos cuartos se han vuelto a mezclar, obteniendo una nueva muestra (C) de una masa aproximada de 12,5 kg que a continuación ha vuelto a ser cuarteada.



Figura 9. Dos cuartos opuestos de A mezclándose tras desechar los otros dos.



Figura 10. Cuarteo de la nueva muestra C, obtenida a partir de A.

De los cuatro cuartos obtenidos de C se han tomado dos opuestos, y se han colocado en una bolsa, se ha etiquetado como muestra 1 y se ha pesado con una báscula. Masa de muestra 1: 6570 g.



Figura 11. Dos cuartos opuestos de C son guardados en una bolsa. Muestra 1.

Con la muestra B se ha operado igual, se han eliminado dos cuartos opuestos y se ha cuarteado la nueva muestra obtenida (D) a partir de los cuartos opuestos que han permanecido:



Figura 12. Eliminación de dos cuartos opuestos de B.



Figura 13. Cuarteo de la nueva muestra D, obtenida a partir de dos cuartos opuestos de B.

Al igual que lo realizado con la muestra C, se han tomado dos cuartos opuestos de la muestra D y se han almacenado en una bolsa, se ha etiquetado como muestra 2 y se ha pesado. Masa de muestra 2: 7159 g.



Figura 14. Dos cuartos opuestos de muestra D se guardan en bolsa. Muestra 2.

El personal de la Universidad de Cantabria ha recogido las muestras descritas en la tabla 1, para llevarlas a laboratorio con la finalidad de realizar los análisis establecidos.

Tabla 1. Muestras enviadas a la Universidad.

Nº Muestra	Masa (kg)
Muestra 1	6,570
Muestra 2	7,159