

METODOLOGÍA PARA LA CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS EN CENTRALES NUCLEARES



IRENE NUÑO RODRÍGUEZ
Ingeniera de Proyectos del Departamento
Mecánico
EMPRESARIOS AGRUPADOS - GHESA



JESÚS GARCÍA VARGAS
Responsable Actividades Preparatorias
del Desmantelamiento
CENTRALES NUCLEARES ALMARAZ
TRILLO (CNAT)

INTRODUCCIÓN

La clausura definitiva de las centrales nucleares representa uno de los desafíos técnicos y ambientales más complejos de la industria energética. Si bien la gestión de los residuos radiactivos ha sido tradicionalmente uno de los focos principales de los problemas relacionados con las centrales nucleares, los residuos peligrosos de naturaleza química, industrial y tecnológica también representan un desafío significativo. Estos residuos, generados a lo largo de la vida útil de la instalación y durante las actividades preparatorias del desmantelamiento, pueden presentar riesgos relevantes para la salud humana, la seguridad operativa y el medio ambiente si no se tratan y gestionan de una manera adecuada.

En el contexto del cierre programado de las centrales nucleares en España, y en particular de la Central Nuclear de Almaraz, surge la necesidad de desarrollar metodologías sistemáticas que permitan identificar, clasificar, caracterizar y cuantificar los residuos peligrosos presentes en la instalación. La elaboración de un inventario detallado de estos residuos constituye una herramienta esencial para la planificación de las actividades de desmontaje, la gestión ambiental y el cumplimiento de la normativa vigente.

Este artículo presenta una metodología estructurada que permite identificar e inventariar todos los componentes y materiales actualmente instalados en la Central cuya retirada suponga la generación de residuos peligrosos. La metodología combina el análisis normativo, la revisión de documentación técnica de la instalación y la explotación de inventarios físicos de componentes, con el objetivo de generar un inventario completo, trazable y reproducible de residuos peligrosos. La necesidad de inventariar este tipo de residuos surge como una de las actividades fundamentales para la elaboración del plan de reducción y eliminación de riesgos contemplados dentro de las actividades

preparatorias de desmantelamiento y se realiza en el marco de los acuerdos específicos suscritos por CNAT y ENRESA para la realización de las actividades preparatorias para el desmantelamiento de la Central Nuclear de Almaraz.

MARCO NORMATIVO Y DEFINICIÓN DE RESIDUO PELIGROSO

Se entiende por residuo peligroso cualquier material que presenta una o más características que puedan suponer un riesgo significativo para la salud humana o el entorno natural. Estas características incluyen toxicidad, inflamabilidad, corrosividad o potencial infeccioso.

La clasificación y gestión de estos residuos se encuentra regulada a nivel europeo y nacional mediante un conjunto de disposiciones legales que establecen criterios de identificación, códigos de clasificación y requisitos de gestión.

- A nivel europeo aplica la Decisión 2014/955/UE de la comisión de 18 de diciembre de 2014 [1]. Esta directiva establece la Lista Europea de Residuos, una clasificación armonizada y revisada periódicamente. Cada residuo recibe un código LER de seis cifras, según su origen y composición. La lista incluye 842 tipos de residuos, divididos en 20 capítulos y 111 subcapítulos. La Lista Europea de Residuos reconoce dos tipos de códigos:
 - Códigos no peligrosos absolutos: no será necesario llevar a cabo ninguna evaluación posterior del residuo.
 - Códigos peligrosos absolutos: no será necesario llevar a cabo ninguna evaluación posterior del residuo, pero debe determinarse su peligrosidad para su adecuado etiquetado. Estos residuos se representan con un código de seis cifras seguido de un asterisco.

- En el ámbito nacional, se aplica el Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos [2]: este decreto introduce códigos específicos y sufijos adicionales para residuos procedentes de equipos eléctricos y electrónicos (RAEE), así como disposiciones complementarias para pilas, acumuladores y baterías. Asimismo, la normativa nacional en materia de residuos tóxicos y peligrosos establece códigos de identificación adicionales para la caracterización de los residuos, incluyendo parámetros relativos a su origen, estado físico, composición y técnicas de gestión.

CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS

Los residuos peligrosos deben caracterizarse para su correcta identificación, control y gestión con lo que se les asigna un código de identificación establecido de acuerdo con diversas normativas [3], [4] y [5]. Este código está formado por letras y números (**Figura 1**).

- La letra Q indica la razón por la que el residuo debe ser gestionado, con valores del 1 al 16.
- Las letras D y R representan las técnicas de gestión: D para eliminación y R para recuperación.
- Las letras L, P, S y G describen el estado físico del residuo (líquido, lodo, sólido o gaseoso).
- La letra C identifica los componentes que confieren peligrosidad.
- El código HP clasifica el tipo de peligrosidad (riesgos físicos, para la salud o el medio ambiente).
- Los códigos A y B refieren a residuos generados en acti-

vidades energéticas y de servicios generales, respectivamente.

Además, se emplean pictogramas para representar visualmente los riesgos, de acuerdo con el sistema GHS (Sistema Globalmente Armonizado), que estandariza la clasificación y etiquetado de sustancias químicas peligrosas a nivel internacional.

A continuación, se presenta a modo ilustrativo la caracterización de un tipo específico de residuo peligroso.

- Tipo de RP: Aceite que contiene PCB (bifenilos policlorados)
- Código de Identificación
 - Q12: Materia contaminada (por ejemplo: aceite contaminado con PCB, etcétera).
 - D15: Almacenamiento previo a cualquiera de las operaciones enumeradas entre D1 y D14 (con exclusión del almacenamiento temporal previo a la recogida en el lugar de producción).
 - L10: Sustancias que contengan PCB y/o PCT (policlorotrifenilos) (dieléctricas, etcétera).
 - C32: PCB y/o PCT.
 - HP6/14: Toxicidad aguda / Ecotóxico.
 - A173 (2): Producción de energía.
 - B00019: Servicios generales.
- Característica de peligrosidad: Toxicidad aguda / Ecotóxico.
- Pictograma: Calavera y tibias cruzadas GHS06 / Medio Ambiente GHS09.

HP6: TOXICIDAD AGUDA / CALAVERA Y TIBIAS CRUZADAS GHS06

ACEITE QUE CONTIENE PCB **SOLO**

CÓDIGO LER	CÓDIGO DE IDENTIFICACIÓN DEL RESIDUO
130301*	Q12 / D15 / L10 / C32 / HP6 / HP14 / A173(2) / B00019
FECHA ENVASADO	TITULAR DEL RESIDUO

HP14: ECOTÓXICO / MEDIO AMBIENTE GHS09

130301*

13 (familia o fuente que genera el residuo): Residuos de aceites y de combustibles líquidos (excepto los aceites comestibles y los de los capítulos 05, 12 y 19)

03 (subfamilia o naturaleza o composición del residuo): Residuos de aceites de aislamiento y transmisión de calor

01 (descripción código LER): Aceites minerales no clorados de motor, de transmisión mecánica y lubricantes

• Q12: Materia contaminada (por ejemplo: aceite contaminado con PCB, etcétera).

• D15: Almacenamiento previo a cualquiera de las operaciones enumeradas entre D1 y D14 (con exclusión del almacenamiento temporal previo a la recogida en el lugar de producción)

• L10: Sustancias que contengan PCB y/o PCT (policlorotrifenilos) (dieléctricas, etcétera).

• C32: PCB y/o PCT.

• HP6/14: Toxicidad aguda / Ecotóxico.

• A173 (2): Producción de energía.

• B00019: Servicios generales.

ATENZIONE CONTIENE PCB

Figura 1. Ejemplo de etiquetado de residuo peligroso.

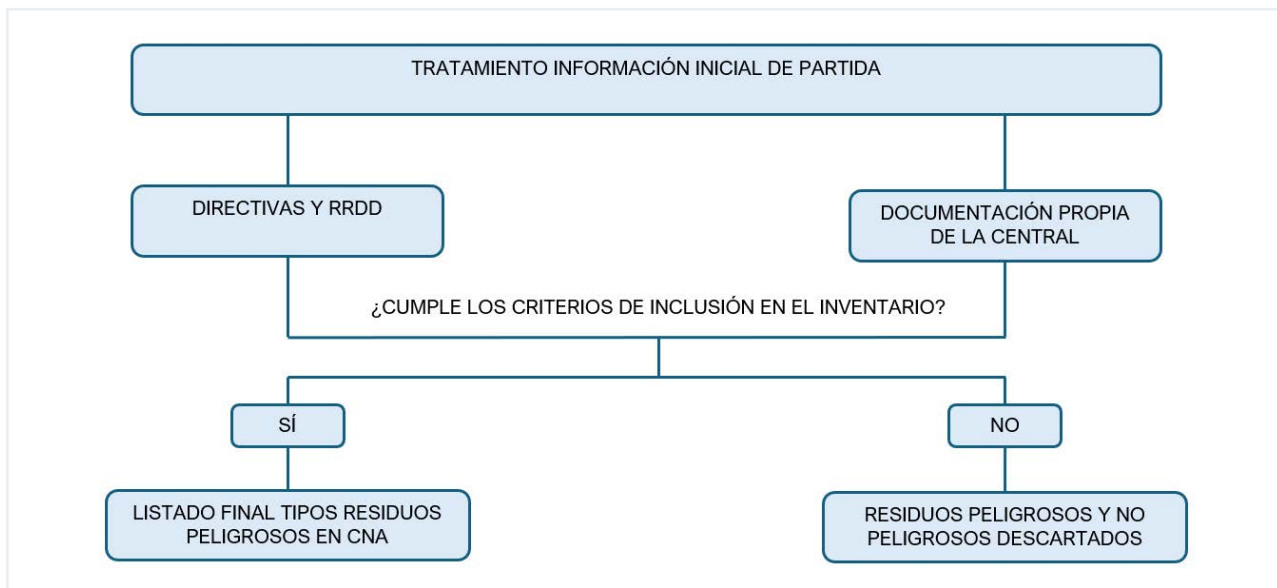


Figura 2. Esquema para la elaboración del listado de residuos peligrosos.

FUENTES DE INFORMACIÓN Y DATOS DE PARTIDA

La metodología propuesta se fundamenta en la integración de múltiples fuentes de información técnica y documental de la instalación, con el objetivo de identificar de manera exhaustiva los residuos peligrosos potenciales. Entre las principales fuentes utilizadas se incluyen:

- Procedimientos internos de gestión, recogida y almacenamiento de residuos de la central nuclear.
- Bases de datos históricas de residuos peligrosos gestionados en la instalación durante los últimos años de operación.
- Estudios del sistema de Protección Contra Incendios (PCI) que identifican materiales combustibles y sustancias peligrosas.
- Estudios de habitabilidad de la sala de control de la Central frente a descargas accidentales de productos químicos tóxicos.

La combinación de estas fuentes permite generar un listado preliminar de residuos peligrosos potenciales y establecer criterios para su identificación, localización y cuantificación de los mismos.

El proceso de análisis de la información, de acuerdo con lo indicado anteriormente se muestra en la **Figura 2**.

METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS

La metodología desarrollada se estructura en una serie de etapas secuenciales que permiten la elaboración y cumplimiento de los campos del inventario:

Identificación de tipos de residuos peligrosos

La primera etapa consiste en la identificación de los tipos

de residuos peligrosos presentes o potencialmente presentes en la instalación. Esta identificación se realiza mediante la revisión de la normativa aplicable y de la documentación técnica de la central, permitiendo establecer un listado inicial de sustancias, materiales y equipos susceptibles de generar residuos peligrosos durante su retirada.

Asociación a componentes de origen

Cada tipo de residuo peligroso identificado se asocia a su componente de origen dentro de la instalación. Los componentes considerados incluyen, entre otros, bombas, transformadores, filtros, tanques, tuberías, equipos eléctricos, sistemas de climatización, baterías, luminarias y materiales de construcción. Esta asociación permite establecer la trazabilidad entre el residuo y el equipo o sistema que lo genera. Esta etapa se ha hecho a través del Inventario Físico de Componentes de la Central Nuclear de Almaraz que es una actividad que entra dentro de las actividades preparatorias del desmantelamiento de la Central Nuclear de Almaraz y tiene como objetivo recoger la información de los componentes y estructuras de la central, en cuanto a ubicación, material, volumen, superficie y peso principalmente.

Ubicación de los residuos peligrosos

Una vez identificados los componentes de origen, se procede a su localización utilizando de nuevo el Inventario Físico de Componentes. Asimismo, en algunos casos específicos resulta necesario efectuar una visita *in situ* a la planta para confirmar la ubicación o el estado de ciertos residuos peligrosos.

Caracterización de los residuos

La caracterización de los residuos incluye la asignación del código LER correspondiente, la descripción normativa del residuo, la identificación de las características de peligrosidad y la asignación de pictogramas GHS. Este proceso se basa en la normativa vigente y en la composición conocida de los materiales y sustancias presentes en la instalación.

Cuantificación de los residuos

La cuantificación de los residuos constituye una etapa clave de la metodología. Para cada tipo de residuo peligroso se establecen criterios de estimación basados en parámetros geométricos y operativos, tales como volumen de tanques y tuberías, masa de equipos, superficie de materiales de construcción o datos técnicos proporcionados por manuales de los fabricantes. En algunos casos, se utilizan datos históricos de gestión de residuos para estimar cantidades futuras.

ELABORACIÓN DEL INVENTARIO DE RESIDUOS PELIGROSOS Y TIPOS DE RESIDUOS PELIGROSOS PRESENTES EN LA CENTRAL NUCLEAR DE ALMARAZ

Como resultado de la aplicación de la metodología propuesta, se ha elaborado un inventario detallado de los residuos peligrosos presentes en la instalación, cumplimentando los campos de la **Tabla 1**.

A partir de todos los análisis realizados, se ha elaborado el Listado de Residuos Peligrosos Inventariados en la Central Nuclear de Almaraz.

Dentro de este inventario, se identifican en primer lugar residuos químicos líquidos asociados a procesos operativos y de mantenimiento, principalmente ácidos, bases y otros reactivos utilizados en los distintos sistemas de la central. Entre ellos se incluyen ácido sulfúrico, amoníaco (hidróxido amónico), hidróxido sódico, hidróxido potásico, hidróxido de litio, hidracina y etanolamina. Estos residuos se localizan fundamentalmente en tanques de almacenamiento y redes de tuberías, por lo que su cuantificación se ha basado en el volumen de los depósitos y de las líneas de proceso asociadas. Asimismo, se consideran cromatos y dicromatos empleados en tratamientos anticorrosivos, cuya elevada toxicidad y peligrosidad requieren una gestión específica conforme a la normativa vigente.

Otra categoría relevante corresponde a materiales sólidos o semisólidos utilizados en sistemas auxiliares y en mantenimiento. Se incluyen el carbón activo empleado en unidades de filtración, las siliconas utilizadas en el sellado de penetra-

ciones, los tóneres de impresión con componentes peligrosos y los tubos fluorescentes con contenido en mercurio. La cuantificación de estos residuos se basa en la cantidad de material presente en las unidades de proceso, en datos históricos de consumo o en el peso del propio equipo.

Los aceites y combustibles representan una fracción significativa del inventario. Se consideran aceites minerales no clorados de lubricación, aceites dieléctricos con y sin PCB presentes en transformadores y generadores, así como gasóleo almacenado en tanques y tuberías. En estos casos, la estimación de cantidades se realiza a partir del volumen de los depósitos y equipos asociados. Los aceites con PCB, cuyo uso fue prohibido en España en 1986, requieren una gestión especialmente controlada.

En el ámbito de los equipos eléctricos y electrónicos, se incluyen transformadores y condensadores con PCB, equipos de aire acondicionado, así como los refrigerantes empleados (clorofluorocarburos, HCFC, HFC), equipos eléctricos con amianto, transformadores con aceite, grandes equipos electrónicos como cuadros eléctricos y sistemas de control, pequeños dispositivos con pilas incorporadas y equipos de informática y telecomunicaciones con componentes peligrosos, como detectores iónicos de incendios. Para estos residuos, la cuantificación se realiza generalmente mediante el peso del equipo completo, dado que los componentes peligrosos forman parte integral del mismo. También se emplea documentación de los propios equipos para estimar la cantidad de residuo en el caso de los gases refrigerantes.

Los sistemas de protección contra incendios generan residuos asociados a gases en recipientes a presión, incluyendo CO₂, FE13, FM200 y NOVEC 1230. Estos residuos se cuantifican en función del peso de las botellas y su contenido. Adicionalmente, se considera residuo peligroso el líquido espumógeno asociado al sistema PCI cuyo contenido se contabiliza con el volumen de los tanques y red de tuberías que lo contienen.

Las baterías y acumuladores constituyen otra fuente relevante de residuos peligrosos, incluyendo baterías de plomo,

Campo	Descripción
Tipo Residuo Peligroso	Tipo de residuo peligroso asociado al código LER
Código de Identificación	Identificación del tipo de residuo peligroso
Componente Origen	Equipo asociado a la generación del residuo peligroso
Código Ubicación	Localización: edificio, elevación y cubículo
Característica Peligrosidad	Característica de peligrosidad asociada al residuo peligroso
Pictograma	Pictograma asociado al residuo peligroso
Código LER	Código LER asociado al residuo peligroso
Descripción LER	Descripción código LER asociado al residuo peligroso
Cantidad Estimada	Cantidad estimada de generación del residuo peligroso

Tabla 1. Campos para cumplimentar en el inventario de residuos peligrosos.

acumuladores de níquel-cadmio, baterías de litio y baterías con níquel. La cuantificación se basa en el peso de las baterías instaladas en los distintos sistemas de la central.

Finalmente, se consideran materiales de construcción con componentes peligrosos, como aislamientos de tuberías con amianto y cubiertas, fachadas y bajantes con fibrocemento. En estos casos, las cantidades se estiman mediante el volumen del material, la superficie de las estructuras o la masa unitaria de los componentes.

RESIDUOS PELIGROSOS NO INCLUIDOS Y NECESIDADES DE CARACTERIZACIÓN ADICIONAL

Durante el desarrollo del inventario se identifican ciertos residuos peligrosos que no se incluyen en el inventario inicial debido a la necesidad de metodologías de caracterización más precisas o tratamientos específicos. Entre ellos se encuentran suelos contaminados por derrames históricos de aceites, recubrimientos y pinturas con componentes peligrosos y zonas de acopio temporal. Para estos residuos se recomienda la realización de campañas de muestreo y análisis específicos que permitan su correcta clasificación y cuantificación.

APLICABILIDAD Y VENTAJAS DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología desarrollada proporciona un marco estructurado y reproducible para la gestión anticipada de residuos peligrosos en el desmantelamiento nuclear. Entre las principales ventajas de esta aproximación se incluyen:

- Optimización de la gestión de residuos peligrosos y reducción de riesgos operativos.
- Facilitar el cumplimiento de la normativa vigente y la preparación de documentación para auditorías e inspecciones.
- Permitir la estimación temprana de costes asociados a la gestión de residuos.
- Contribuir a la protección del medio ambiente y la salud de los trabajadores.

Además, la metodología es extrapolable a otras instalaciones nucleares y a otras instalaciones industriales complejas, constituyendo una base para el desarrollo de buenas prácticas en la gestión de residuos peligrosos.

CONCLUSIONES

La gestión de los residuos peligrosos constituye un elemento fundamental dentro del conjunto de medidas destinadas a la reducción y eliminación de riesgos en las actividades prepara-

torias del desmantelamiento de instalaciones nucleares. Aunque la atención tradicional se ha centrado en los residuos radiactivos, los residuos peligrosos de naturaleza química, industrial y tecnológica representan también un factor relevante de riesgo para la seguridad, la salud humana y el medio ambiente, por lo que requieren una planificación y gestión sistemática.

En este artículo se ha propuesto una metodología estructurada para la identificación, clasificación, localización, cuantificación y caracterización de los residuos peligrosos potencialmente presentes en una central nuclear, aplicada específicamente a la Central Nuclear de Almaraz. La metodología integra el análisis del marco normativo europeo y nacional, la revisión de la documentación técnica de la instalación y la explotación del inventario físico de componentes, permitiendo la elaboración de un inventario exhaustivo y trazable de residuos peligrosos.

La aplicación de esta metodología permite asociar cada residuo a su componente de origen y a su ubicación dentro de la instalación, proporcionando una base técnica para la planificación de las operaciones de desmontaje, la definición de estrategias de segregación y minimización de residuos, y la estimación de necesidades de almacenamiento, tratamiento y eliminación. Asimismo, el inventario generado constituye una herramienta clave para el cumplimiento regulatorio y la preparación de documentación de soporte para auditorías e inspecciones.

En conjunto, la metodología desarrollada contribuye a una transición ordenada, segura y ambientalmente responsable tras el cese de explotación de las centrales nucleares, y puede ser extrapolable a otras instalaciones nucleares o industriales complejas en proceso de desmantelamiento.

REFERENCIAS

- [1] Lista de residuos peligrosos. Decisión 2014/955/UE de la comisión de 18 de diciembre de 2014.
- [2] Real Decreto 110/2015, de 20 de febrero, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos.
- [3] Real Decreto 957/97, de 20 de junio, por el que se modifica el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, de 14 de mayo, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos.
- [4] Real Decreto 833/1988, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos.
- [5] Anexo III del Reglamento (UE) N.º 1357/2014 de la Comisión de 18 de diciembre de 2014 por el que se sustituye el Anexo III de la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas. ■