

Colección de Energía Nuclear del OIEA

Nº NW-T-1.8

**Principios
básicos**

Objetivos

Guías

**Informes
técnicos**

Sistemas de procesamiento móviles para la gestión de desechos radiactivos



IAEA

Organismo Internacional de Energía Atómica

PUBLICACIONES DE LA COLECCIÓN DE ENERGÍA NUCLEAR DEL OIEA

ESTRUCTURA DE LA COLECCIÓN DE ENERGÍA NUCLEAR DEL OIEA

Conforme a lo establecido en los artículos III.A.3 y VIII.C de su Estatuto, el OIEA está autorizado a “alentar el intercambio de información científica y técnica en materia de utilización de la energía atómica con fines pacíficos”. Las publicaciones de la ***Colección de Energía Nuclear del OIEA*** presentan buenas prácticas y avances en la tecnología, así como ejemplos prácticos y experiencias en las esferas de los reactores nucleares, el ciclo del combustible nuclear, la gestión de desechos radiactivos y la clausura, y sobre cuestiones de interés para la energía nuclear. La estructura de la ***Colección de Energía Nuclear del OIEA*** consta de cuatro niveles:

- 1) En la publicación ***Principios básicos de la energía nuclear*** se describen el fundamento y la visión de los usos pacíficos de la energía nuclear.
- 2) En las publicaciones de la categoría “**Objetivos**” de la ***Colección de Energía Nuclear*** se describe lo que es preciso tener en cuenta y los objetivos específicos que han de alcanzarse en los ámbitos temáticos en las diferentes etapas de la aplicación.
- 3) En la categoría “**Guías y Metodologías**” de la ***Colección de Energía Nuclear*** se ofrece orientación o métodos de alto nivel sobre las formas de lograr los objetivos relativos a los diferentes temas y ámbitos relacionados con los usos pacíficos de la energía nuclear.
- 4) En los “**Informes Técnicos**” de la ***Colección de Energía Nuclear*** se ofrece información adicional y más detallada sobre las actividades relacionadas con los temas analizados en la ***Colección de Energía Nuclear del OIEA***.

Los códigos de las publicaciones de la ***Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA*** son los siguientes: **NG** (energía nuclear en general); **NR** (reactores nucleares —antiguamente **NP** - energía nucleoelectrónica—); **NF** (ciclo del combustible nuclear); **NW** (gestión de desechos radiactivos y clausura). Además, las publicaciones pueden consultarse en el sitio web del OIEA:

<https://www.iaea.org/es/publicaciones>

Para más información, póngase en contacto con el OIEA en la dirección Vienna International Centre, PO Box 100, 1400 Viena, Austria.

Se invita a todos los lectores de las publicaciones de la ***Colección de Energía Nuclear del OIEA*** a que transmitan al OIEA sus experiencias a fin de garantizar que las publicaciones sigan satisfaciendo sus necesidades. La información podrá proporcionarse a través del sitio web del OIEA, por correo postal o por correo electrónico a la dirección Official.Mail@iaea.org.

SISTEMAS DE PROCESAMIENTO MÓVILES
PARA LA GESTIÓN DE DESECHOS
RADIOACTIVOS

Los siguientes Estados son Miembros del Organismo Internacional de Energía Atómica:

ALBANIA	FINLANDIA	PALAU
ALEMANIA	FRANCIA	PANAMÁ
ANGOLA	GABÓN	PAPUA NUEVA GUINEA
ANTIGUA Y BARBUDA	GEORGIA	PARAGUAY
ARABIA SAUDITA	GHANA	PERÚ
ARGELIA	GRANADA	POLONIA
ARGENTINA	GRECIA	PORTUGAL
ARMENIA	GUATEMALA	QATAR
AUSTRALIA	GUYANA	REINO UNIDO DE
AUSTRIA	HAITÍ	GRAN BRETAÑA E
AZERBAIYÁN	HONDURAS	IRLANDA DEL NORTE
BAHAMAS	HUNGRÍA	REPÚBLICA ÁRABE SIRIA
BAHREIN	INDIA	REPÚBLICA
BANGLADESH	INDONESIA	CENTROAFRICANA
BARBADOS	IRÁN, REPÚBLICA	REPÚBLICA CHECA
BELARÚS	ISLÁMICA DEL	REPÚBLICA DE MOLDOVA
BÉLGICA	IRAQ	REPÚBLICA DEMOCRÁTICA
BELICE	IRLANDA	DEL CONGO
BENIN	ISLANDIA	REPÚBLICA DEMOCRÁTICA
BOLIVIA, ESTADO	ISLAS MARSHALL	POPULAR LAO
PLURINACIONAL DE	ISRAEL	REPÚBLICA DOMINICANA
BOSNIA Y HERZEGOVINA	ITALIA	REPÚBLICA UNIDA
BOTSWANA	JAMAICA	DE TANZANÍA
BRASIL	JAPÓN	RUMANIA
BRUNEI DARUSSALAM	JORDANIA	RWANDA
BULGARIA	KAZAJSTÁN	SAINT KITTS Y NEVIS
BURKINA FASO	KENYA	SAMOA
BURUNDI	KIRGUISTÁN	SAN MARINO
CAMBOYA	KUWAIT	SAN VICENTE Y
CAMERÚN	LESOTHO	LAS GRANADINAS
CANADÁ	LETONIA	SANTA LUCÍA
COLOMBIA	LÍBANO	SANTA SEDE
COMORAS	LIBERIA	SENEGAL
CONGO	LIBIA	SERBIA
COREA, REPÚBLICA DE	LIECHTENSTEIN	SEYCHELLES
COSTA RICA	LITUANIA	SIERRA LEONA
CÔTE D'IVOIRE	LUXEMBURGO	SINGAPUR
CROACIA	MACEDONIA DEL NORTE	SRI LANKA
CUBA	MADAGASCAR	SUDÁFRICA
CHAD	MALASIA	SUDÁN
CHILE	MALAWI	SUECIA
CHINA	MALÍ	SUIZA
CHIPRE	MALTA	TAILANDIA
DINAMARCA	MARRUECOS	TAYIKISTÁN
DJIBOUTI	MAURICIO	TOGO
DOMINICA	MAURITANIA	TONGA
ECUADOR	MÉXICO	TRINIDAD Y TABAGO
EGIPTO	MÓNACO	TÚNEZ
EL SALVADOR	MONGOLIA	TURKMENISTÁN
EMIRATOS ÁRABES UNIDOS	MONTENEGRO	TÚRKIYE
ERITREA	MOZAMBIQUE	UCRANIA
ESLOVAQUIA	MYANMAR	UGANDA
ESLOVENIA	NAMIBIA	URUGUAY
ESPAÑA	NEPAL	UZBEKISTÁN
ESTADOS UNIDOS	NICARAGUA	VANUATU
DE AMÉRICA	NÍGER	VENEZUELA, REPÚBLICA
ESTONIA	NIGERIA	BOLIVARIANA DE
ESWATINI	NORUEGA	VIET NAM
ETIOPÍA	NUEVA ZELANDIA	YEMEN
FEDERACIÓN DE RUSIA	OMÁN	ZAMBIA
FIJI	PAÍSES BAJOS	ZIMBABWE
FILIPINAS	PAKISTÁN	

El Estatuto del Organismo fue aprobado el 23 de octubre de 1956 en la Conferencia sobre el Estatuto del OIEA celebrada en la Sede de las Naciones Unidas (Nueva York); entró en vigor el 29 de julio de 1957. El Organismo tiene la Sede en Viena. Su principal objetivo es “acelerar y aumentar la contribución de la energía atómica a la paz, la salud y la prosperidad en el mundo entero”.

COLECCIÓN DE ENERGÍA NUCLEAR DEL OIEA N° NW-T-1.8

SISTEMAS DE PROCESAMIENTO MÓVILES PARA LA GESTIÓN DE DESECHOS RADIACTIVOS

ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
VIENA, 2022

DERECHOS DE AUTOR

Todas las publicaciones científicas y técnicas del OIEA están protegidas en virtud de la Convención Universal sobre Derecho de Autor aprobada en 1952 (Berna) y revisada en 1972 (París). Desde entonces, la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (Ginebra) ha ampliado la cobertura de los derechos de autor, que ahora incluyen la propiedad intelectual de obras electrónicas y virtuales. Para la utilización de textos completos, o parte de ellos, que figuren en publicaciones del OIEA, impresas o en formato electrónico, deberá obtenerse la correspondiente autorización y, por lo general, dicha utilización estará sujeta a un acuerdo de pago de regalías. Se aceptan propuestas relativas a la reproducción y traducción sin fines comerciales, que se examinarán individualmente. Las solicitudes de información deben dirigirse a la Sección Editorial del OIEA:

Dependencia de Mercadotecnia y Venta
Sección Editorial
Organismo Internacional de Energía Atómica
Vienna International Centre
PO Box 100
1400 Viena, Austria
fax: +43 1 26007 22529
tel.: +43 1 2600 22417
correo electrónico: sales.publications@iaea.org
<https://www.iaea.org/es/publicaciones>

© OIEA, 2022

Impreso por el OIEA en Austria

Junio de 2022

STI/PUB/1621

SISTEMAS DE PROCESAMIENTO MÓVILES PARA LA
GESTIÓN DE DESECHOS RADIATIVOS

OIEA, VIENA, 2022

STI/PUB/1621

ISBN 978-92-0-323721-5 (papel) | 978-92-0-323621-8 (PDF)

ISSN 2708-2016

PRÓLOGO

Uno de los objetivos enunciados en el Estatuto del OIEA es procurar “acelerar y aumentar la contribución de la energía atómica a la paz, la salud y la prosperidad en el mundo entero”. Un medio para alcanzar este objetivo es la publicación de diversas colecciones de documentos técnicos. Dos de ellas son la *Colección de Energía Nuclear del OIEA* y la *Colección de Normas de Seguridad del OIEA*.

De conformidad con el artículo III.A.6 del Estatuto del OIEA, el Organismo establecerá “normas de seguridad para proteger la salud y reducir al mínimo el peligro para la vida y la propiedad”. Esas normas de seguridad comprenden las Nociones Fundamentales de Seguridad, los Requisitos de Seguridad y las Guías de Seguridad. Están redactadas principalmente en un estilo normativo, y son vinculantes para el OIEA en la ejecución de sus programas. Sus principales usuarios son los órganos reguladores de los Estados Miembros y otras autoridades nacionales.

La *Colección de Energía Nuclear del OIEA* contiene informes destinados a alentar y apoyar la labor de investigación y desarrollo y la aplicación de los usos pacíficos de la energía nuclear. Esto incluye ejemplos prácticos que pueden ser utilizados por los propietarios y explotadores de empresas de servicios públicos de los Estados Miembros y por organizaciones de ejecución, miembros del mundo académico y funcionarios gubernamentales, entre otros. La información se presenta en guías, informes sobre el estado y los avances de la tecnología, y prácticas óptimas para los usos de la energía nuclear con fines pacíficos, elaborados sobre la base de las aportaciones de expertos internacionales. La *Colección de Energía Nuclear del OIEA* complementa la *Colección de Normas de Seguridad del OIEA*.

Los desechos radiactivos, generados en las operaciones de las centrales nucleares, las instalaciones del ciclo del combustible y otras aplicaciones nucleares, comprenden distintos ‘tipos de desechos’, con características diferentes.

En los últimos tiempos ha aumentado el despliegue de sistemas móviles para la gestión previa a la disposición final (por ejemplo, para el tratamiento previo, el tratamiento mismo y el acondicionamiento) de las corrientes de desechos radiactivos. Además, las consideraciones relativas al rendimiento, el costo y la flexibilidad pueden reforzar el atractivo de estos sistemas para las futuras instalaciones nucleares.

La presente publicación ofrece orientaciones para evaluar y utilizar las tecnologías de las aplicaciones móviles de procesamiento de desechos radiactivos. Se aplica tanto a los programas de gestión de desechos más grandes y avanzados como a los de escala pequeña o intermedia, y puede ayudar a planificar y desarrollar las estrategias de los programas de gestión de desechos.

El OIEA ha producido varias publicaciones que describen en detalle algunas tecnologías conexas y su despliegue a lo largo del tiempo, así como las corrientes de desechos a las que se aplican, los cuerpos de desechos resultantes, el equipo requerido y las ventajas y limitaciones. En general, esa información no se reproduce en la presente publicación, a menos que sea necesario para una aclaración o una consulta inmediata.

El OIEA desea expresar su agradecimiento a todos aquellos que participaron en la preparación y publicación de este informe. El trabajo inicial corrió a cargo de V. Tsyplenkov y Z. Drace, de su División del Ciclo del Combustible Nuclear y de Tecnología de los Desechos. El funcionario del OIEA encargado de la elaboración ulterior de la obra y de su finalización para la publicación fue S.K. Samanta, de la misma División.

NOTA EDITORIAL

Esta publicación ha sido editada por el personal de los servicios editoriales del OIEA en la medida en que se ha juzgado necesario para facilitar su lectura.

Este informe no aborda cuestiones de responsabilidad, jurídica o de otra índole, por actos u omisiones por parte de persona alguna.

Aunque se ha puesto gran cuidado en mantener la exactitud de la información contenida en esta publicación, ni el OIEA ni sus Estados Miembros asumen responsabilidad alguna por las consecuencias que puedan derivarse de su uso.

El uso de determinadas denominaciones de países o territorios no implica juicio alguno por parte de la entidad editora, el OIEA, sobre la situación jurídica de esos países o territorios, sus autoridades e instituciones o la delimitación de sus fronteras.

La mención de nombres de empresas o productos específicos (se indiquen o no como registrados) no implica ninguna intención de violar derechos de propiedad ni debe interpretarse como una aprobación o recomendación por parte del OIEA.

Corresponde a los autores obtener la autorización necesaria para que el OIEA reproduzca, traduzca o utilice material de fuentes que ya estén protegidas por derechos de propiedad intelectual.

El OIEA no es responsable de la continuidad o exactitud de las URL de los sitios web externos o de terceros en Internet a que se hace referencia en esta publicación y no garantiza que el contenido de dichos sitios web sea o siga siendo preciso o adecuado.

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivo	1
1.3 Ámbito de aplicación	2
1.4 Estructura	2
1.5 Definiciones importantes	2
2 EVALUACIÓN DE LA APLICABILIDAD DE LOS SISTEMAS DE PROCESAMIENTO MÓVILES	3
2.1 Ejemplos y principales características de los sistemas móviles de procesamiento de desechos radiactivos	4
2.1.1 Potencial y ventajas	4
2.1.2 Limitaciones	5
2.2 Aplicabilidad de los sistemas móviles: metodología para la evaluación y la decisión ..	7
2.2.1 Evaluación preliminar de la viabilidad del uso de un sistema móvil (paso 1) ..	7
2.2.2 Evaluación detallada de la aplicación de un sistema móvil particular (paso 2)	10
2.2.3 Ejemplo del proceso de decisión en dos pasos	10
3 SISTEMAS DE TRATAMIENTO PREVIO DE DESECHOS	13
3.1 Desechos sólidos	13
3.1.1 Compactación de baja fuerza	13
3.1.2 Descontaminación mecánica	15
3.2 Desechos líquidos	22
3.2.1 Neutralización y precipitación químicas	22
4 SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE DESECHOS	26
4.1 Desechos sólidos	26
4.1.1 Lavado de suelos	26
4.1.2 Separación del aislamiento de los cables	31
4.2 Desechos líquidos y sólidos húmedos	34
4.2.1 Descontaminación de aceites radiactivos	34
4.2.2 Filtración	39
4.2.3 Filtración e intercambio iónico	42
4.2.4 Filtración, membrana e intercambio iónico	46
4.2.5 Intercambio iónico selectivo en un sistema de extracción de nucleidos	51
4.2.6 Deshidratación de medios de filtración e intercambio iónico gastados	56
4.2.7 Secado de desechos líquidos y sólidos húmedos dentro de un bidón	59
4.3 Desechos gaseosos	63
4.3.1 Tratamiento del gas expulsado	63
5 SISTEMAS DE ACONDICIONAMIENTO DE DESECHOS	67
5.1 Fuentes selladas en desuso	67

5.1.1	Encapsulamiento de fuentes selladas en desuso en una matriz metálica	67
5.2	Desechos líquidos y sólidos húmedos.	72
5.2.1	Solidificación (hormigonado).	72
5.2.2	Encapsulamiento de resinas de intercambio iónico gastadas en aglutinantes poliméricos.	76
6	SISTEMAS COMBINADOS DE TRATAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO DE DESECHOS.	80
6.1	Desechos sólidos	80
6.1.1	Supercompactación	80
6.1.2	Reducción de volumen y embalaje de componentes activados	84
6.1.3	Vitrificación del suelo <i>in situ</i>	91
6.2	Fuentes selladas en desuso	95
6.2.1	Desmantelamiento y embalaje de fuentes en desuso de actividad alta	95
7	SISTEMAS DE CARACTERIZACIÓN DE DESECHOS	99
7.1	Análisis no destructivo	100
7.1.1	Sistema de gammagrafía	100
8	CONCLUSIONES	104
	REFERENCIAS	107
ANEXO I:	EJEMPLO DE LOS DETALLES DE UN SISTEMA DE PROCESAMIENTO MÓVIL: SUPERCOMPACTACIÓN DE SÓLIDOS.	109
ANEXO II:	EJEMPLO DE LOS DETALLES DE UN SISTEMA DE PROCESAMIENTO MÓVIL: FILTRACIÓN E INTERCAMBIO IÓNICO.	118
	COLABORADORES EN LA REDACCIÓN Y LA REVISIÓN	127
	ESTRUCTURA DE LA COLECCIÓN DE ENERGÍA NUCLEAR DEL OIEA	128

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La explotación de las centrales nucleares, las instalaciones del ciclo del combustible y otras aplicaciones nucleares genera desechos radiactivos, que forman distintas corrientes de desechos líquidos, sólidos, gaseosos y multifásicos, con diferentes características físicas, químicas y radiactivas. Los programas de gestión de desechos se ocupan normalmente de estos desechos desde el momento de la generación hasta la disposición final.

Hay varias tecnologías de procesamiento disponibles para el tratamiento previo, el tratamiento y el acondicionamiento de estas corrientes de desechos. Las estrategias y tecnologías correspondientes y las cuestiones de seguridad pertinentes se describen en detalle en diversas publicaciones del OIEA, como sus documentos técnicos, la *Colección de Informes Técnicos*, la *Colección de Energía Nuclear* y la *Colección de Normas de Seguridad del OIEA* [1 a 15]. En general, las tecnologías se despliegan ya sea como sistemas fijos montados de forma permanente en instalaciones de procesamiento de desechos centralizadas o situadas dentro de los emplazamientos, o como configuraciones móviles. Las instalaciones fijas centralizadas procesan en un mismo lugar los desechos de múltiples usuarios del Estado, lo que significa que esos desechos deben transportarse hasta la instalación. En cambio, los sistemas fijos de los emplazamientos y los sistemas móviles permiten seleccionar y aplicar la tecnología óptima para cada corriente de desechos, al trasladar el proceso al lugar en que se generan los desechos. Además, los sistemas móviles pueden ofrecer una flexibilidad adicional si el equipo se comparte entre distintos emplazamientos con campañas de procesamiento de diferente duración, desde períodos muy breves hasta varios años.

La expresión ‘sistema de procesamiento móvil’ utilizada en esta publicación se refiere a cualquier sistema o componente de procesamiento de desechos radiactivos que haya sido diseñado para ser transportado y cuya instalación no se considere permanente [16].

Los sistemas móviles ofrecen algunas ventajas particulares. En algunos casos, pueden ser una opción más deseable que un sistema de procesamiento fijo, especialmente para mantenerse al día con los avances de la tecnología. Por ejemplo, el despliegue de un sistema móvil que pueda modernizarse o sustituirse con rapidez y a un costo relativamente bajo es una opción más atractiva que las obras de mejora de un sistema fijo y permanente. De igual modo, cuando sea posible que haya cambios frecuentes en el volumen o las características de las corrientes de desechos, el uso de una tecnología de procesamiento móvil en un formato modular, que propicie las mejoras eficientes de la capacidad o su uso en una estrategia de procesamiento basada en campañas, podría ser más eficaz en relación con el costo y el rendimiento.

En la elaboración de esta obra se utilizaron numerosas fuentes, con inclusión de otras publicaciones del OIEA y de un equipo internacional de expertos en gestión de desechos radiactivos. También se consultaron otras normas e informes reconocidos del sector [16, 17]. Además, los proveedores han publicado mucha información, a la que puede accederse a través de diversas fuentes o mediante búsquedas en la documentación disponible en Internet.

1.2 OBJETIVO

El principal objetivo de esta publicación es ofrecer información básica sobre el uso de sistemas móviles en los diferentes pasos de la gestión previa a la disposición final de los desechos (como el tratamiento previo, el tratamiento y el acondicionamiento) y presentar una metodología para determinar la viabilidad del uso de esa tecnología móvil de procesamiento de desechos en aplicaciones específicas.

Además, esta publicación proporciona información para la evaluación exacta de sistemas móviles que emplean una o varias de esas tecnologías.

1.3 ÁMBITO DE APLICACIÓN

La presente publicación trata sobre las posibles aplicaciones de sistemas móviles para el procesamiento de los desechos radiactivos generados en operaciones de las centrales nucleares, las instalaciones del ciclo del combustible y otras aplicaciones con radionucleidos empleadas en la industria, la investigación, la educación y la medicina. Describe procesos móviles de eficacia demostrada que pueden utilizarse en una instalación nuclear, ya sea individualmente o como componentes de una configuración más compleja, para nuevas aplicaciones, la mejora de las ya existentes o la sustitución de tecnología degradada u obsoleta. La metodología de evaluación comprende consideraciones relacionadas con la selección, la aplicación, las limitaciones y las ventajas de la tecnología móvil, y ayuda a determinar la viabilidad técnica y económica del despliegue de sistemas móviles en lugar de sistemas fijos y permanentes.

La presente publicación está destinada principalmente a los profesionales que trabajan en la gestión de desechos y tienen la responsabilidad de seleccionar, diseñar y desplegar los sistemas de procesamiento correspondientes. También puede ser de utilidad a los reguladores que deben examinar y autorizar los sistemas móviles de procesamiento de desechos, así como los posibles acuerdos bilaterales para el uso compartido de esos sistemas.

1.4 ESTRUCTURA

En la sección 2 de la presente publicación se describe brevemente la aplicabilidad de los sistemas móviles de procesamiento de desechos, detallando sus funciones, las posibilidades que ofrecen y sus ventajas y limitaciones. También se describe un proceso de evaluación en dos etapas, que puede utilizarse primero para verificar la posibilidad de aplicar la tecnología de procesamiento en una configuración móvil, y luego para realizar un estudio técnico detallado de la opción de utilizar una tecnología móvil particular.

Las secciones 3 a 7 contienen ilustraciones y ejemplos de sistemas móviles de tratamiento previo, tratamiento, acondicionamiento, tratamiento y acondicionamiento combinados, y caracterización de los desechos. Se presentan casos de procesamiento de corrientes de desechos sólidos, líquidos, gaseosos y multifásicos, a fin de dar una idea de la aplicación efectiva de los sistemas móviles y de las principales consideraciones que deben incluirse en el estudio técnico para compararlos con los sistemas fijos y permanentes. Cabe señalar que las descripciones se basan en una recopilación de la mejor información disponible para ilustrar la práctica actual. En la sección 8 se presentan las conclusiones.

Los anexos I y II contienen ejemplos de la información y los parámetros que deberán utilizarse para el estudio técnico detallado de dos sistemas móviles e incluirse en las especificaciones técnicas para su adquisición. Estos ejemplos más detallados se refieren a los sistemas móviles de supercompactación de desechos sólidos y de filtración e intercambio iónico.

1.5 DEFINICIONES IMPORTANTES

Las siguientes son algunas definiciones importantes tomadas del *Glosario de seguridad tecnológica del OIEA* [18]:

- a) **Acondicionamiento:** Actividades encaminadas a producir un bulto de desechos adecuado para su manipulación, transporte, almacenamiento y/o disposición final. El acondicionamiento puede comprender la conversión de los desechos en un cuerpo de desecho sólido, su introducción en contenedores y, de ser necesario, su protección con un sobreembalaje.
- b) **Inmovilización:** Conversión de los desechos en un cuerpo de desecho por solidificación, fijación en una matriz sólida o encapsulamiento. La inmovilización reduce la posibilidad de migración o

de dispersión de los radionucleidos durante la manipulación, el transporte, el almacenamiento y la disposición final.

- c) **Preparación para la disposición final:** Etapas de la gestión de los desechos que se realiza con anterioridad a la disposición final, como las actividades de tratamiento previo, tratamiento, acondicionamiento, almacenamiento y transporte.
- d) **Tratamiento previo:** Una o todas las operaciones que se realizan con anterioridad al tratamiento de los desechos, como la recogida, la segregación, el ajuste químico y la descontaminación.
- e) **Procesamiento:** Cualquier operación que modifique las características de los desechos, incluidos el tratamiento previo, el tratamiento y el acondicionamiento.
- f) **Segregación:** Actividad en la que los tipos de desechos o materiales (radiactivos o exentos) son separados, o se mantienen separados, de acuerdo con sus propiedades radiológicas, químicas y/o físicas, a fin de facilitar la manipulación y/o el procesamiento de los desechos.
- g) **Tratamiento:** Operaciones destinadas a mejorar la seguridad tecnológica y/o los aspectos económicos modificando las características de los desechos. Los tres objetivos básicos del tratamiento son:
 - i) la reducción del volumen;
 - ii) la extracción de los radionucleidos presentes en los desechos;
 - iii) la modificación de la composición.

El tratamiento puede dar lugar a un cuerpo del desecho apropiado. Si el tratamiento no da lugar a un cuerpo del desecho apropiado, los desechos pueden ser inmovilizados.

- h) **Reducción de volumen:** Método de tratamiento que reduce el volumen físico de un desecho. Son métodos típicos de reducción de volumen la compactación mecánica, la incineración y la evaporación.
- i) **Caracterización de desechos:** Determinación de las propiedades físicas, químicas y radiológicas de los desechos, con objeto de determinar la necesidad de ajustes, tratamiento o acondicionamiento adicionales, o su adecuación para la manipulación, el procesamiento o el almacenamiento posteriores, o para la disposición final.
- j) **Cuerpo del desecho:** Desechos en su forma física y química después del tratamiento y/o acondicionamiento (que da como resultado un producto sólido) y antes del embalaje. El cuerpo del desecho es un componente del bulto de desechos.
- k) **Bulto de desechos:** Producto del acondicionamiento que comprende el cuerpo del desecho y cualesquiera contenedores y barreras internas (por ejemplo, materiales absorbentes y recubrimientos), preparados conforme a los requisitos establecidos para la manipulación, el transporte, el almacenamiento o la disposición final.

2 EVALUACIÓN DE LA APLICABILIDAD DE LOS SISTEMAS DE PROCESAMIENTO MÓVILES

En la sección 2 se proporciona información básica y un método para evaluar determinadas aplicaciones a fin de decidir si debe tomarse en consideración el despliegue de un sistema de procesamiento móvil, en lugar de uno fijo. Es importante señalar que los detalles concretos de las distintas tecnologías y aplicaciones de procesamiento posibles pueden ser muy diferentes, y que esa metodología deberá aplicarse de forma iterativa, en las evaluaciones iniciales y en las subsiguientes. También cabe destacar que algunos de los factores incluidos en el proceso de adopción de decisiones (como la complejidad y los factores relacionados con la sociedad local) son muy subjetivos y no pueden definirse cuantitativamente.

Uno o varios de estos factores pueden influir en el resultado de la evaluación de la aplicabilidad. Además, no todos ellos serán pertinentes en todos los casos.

Un aspecto crítico del proceso decisorio es la evaluación de los riesgos y de cómo los entienden las partes interesadas. Esa percepción puede ser muy diferente, según el modo de despliegue de las tecnologías (por ejemplo, como instalación fija o móvil) y los arreglos que se adopten para la gestión de los desechos (en forma autónoma o mediante contratos de servicios). Entre otras cosas, deberán compararse los riesgos para la seguridad que entrañen el transporte del equipo móvil de procesamiento a diferentes lugares, por una parte, y el transporte de los desechos a una instalación de procesamiento centralizada, por otra.

2.1 EJEMPLOS Y PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS MÓVILES DE PROCESAMIENTO DE DESECHOS RADIATIVOS

Los sistemas de procesamiento móviles desempeñan un papel importante en una variada gama de aplicaciones de gestión de desechos, desde las que procesan cantidades aisladas o pequeñas hasta las que operan a gran escala en centrales nucleares e instalaciones del ciclo del combustible. Estos sistemas están siendo tomados en consideración en los diseños de reactores de potencia comerciales avanzados de la próxima generación.

La presente publicación se centra en las tecnologías de procesamiento de desechos que han sido puestas a prueba en aplicaciones móviles. En el cuadro 1 se presenta una lista de esas tecnologías, para la consulta rápida, pero se alienta a los lectores a que busquen más detalles en los documentos de referencia correspondientes. La lista no es exhaustiva, y puede haber otras tecnologías de procesamiento móviles, nuevas o más antiguas, que no se hayan incluido en esta publicación ni en la bibliografía citada. Sin embargo, la metodología de evaluación y selección aquí presentada podrá aplicarse a cualquiera de las opciones disponibles para el procesamiento móvil.

2.1.1 Potencial y ventajas

El proceso de evaluación comprende el examen del potencial, las ventajas y las posibles limitaciones de los sistemas móviles, para su comparación con los sistemas fijos. En los apartados siguientes se ilustran las posibilidades más notables que ofrecen los sistemas móviles, junto con sus principales ventajas y limitaciones. Esta lista no es exhaustiva; además, las consideraciones relativas a las posibilidades, las ventajas y las limitaciones son distintas para cada sistema:

- a) **Tecnología:** Los procesos básicos empleados en las aplicaciones móviles suelen ser los mismos que los de las configuraciones fijas o permanentes. Por ejemplo, el proceso del sistema móvil de intercambio iónico es equivalente al que se utiliza en las instalaciones permanentes, sin que importe el tamaño del sistema o la estrategia de despliegue. La diferencia más evidente radica en la posibilidad de utilizar, sustituir o reubicar el equipo móvil con relativa facilidad.
- b) **Rendimiento:** En la mayoría de las aplicaciones, las tecnologías móviles ofrecen el mismo nivel de rendimiento (por ejemplo, la misma reducción de volumen y los mismos factores de descontaminación) que una instalación fija de la misma capacidad. Sin embargo, la flexibilidad de los sistemas móviles permite con frecuencia introducir mejoras de la tecnología o cambios de la configuración que pueden facilitar el logro de un rendimiento mayor. En muchos casos, puede también desplegarse fácilmente tecnología móvil para efectuar modificaciones que permitan cumplir con las normas locales, regionales o nacionales de seguridad y de control de la contaminación.
- c) **Seguridad:** Las normas de seguridad aplicables al equipo móvil varían según la aplicación de que se trate, y por lo general se relacionan con los requisitos de las estructuras, sistemas y componentes circundantes. En algunos casos, los requisitos de seguridad pueden ser menos restrictivos (por ejemplo, en lo que respecta a la clasificación sísmica) que los de los sistemas fijos.

- d) **Costo:** En algunos casos, el costo del uso de un sistema móvil prefabricado y ya autorizado será inferior al que comportarían el diseño, la evaluación reglamentaria de la seguridad, la fabricación, la construcción y la explotación de una instalación permanente (fija) (por ejemplo, el uso de un supercompactador móvil de alta capacidad en campañas periódicas de corta duración puede costar menos que la instalación permanente de un supercompactador optimizado y explotado para el caudal anual de desechos generados). La introducción de un sistema móvil podría reducir el costo relacionado con la gestión de la configuración de los sistemas permanentes o de las interconexiones estructurales. En algunos casos, el equipo móvil podrá ser manejado y mantenido por el proveedor del servicio, y la consiguiente reducción de la necesidad de personal de plantilla cualificado para realizar el proceso abaratará aún más el costo. Por último, la posibilidad de desplegar sistemas móviles para múltiples aplicaciones podría reducir los costos de inversión, explotación y disposición final, si distintos usuarios optan por compartir los costos mediante un acuerdo de arrendamiento o adquisición.
- e) **Uso compartido:** El equipo móvil es, por definición, un equipo diseñado para que se pueda desplazar fácilmente a otros lugares dentro o fuera del emplazamiento. Esto permite también un uso más eficaz de los recursos humanos y contribuye a un intercambio efectivo de los conocimientos especializados.
- f) **Respuesta a emergencias:** Algunos sistemas de procesamiento móviles tienen la ventaja particular de que se pueden desplegar con relativa rapidez en respuesta a situaciones de emergencia o para una oportuna mejora o sustitución de las tecnologías existentes.
- g) **Uso en la clausura y la rehabilitación:** En las actividades de clausura es posible utilizar sistemas móviles cuando hay desechos que se pueden tratar y acondicionar en el emplazamiento mismo, en lugar de procesarlos en un lugar especializado. En la mayoría de los casos, la rehabilitación del suelo contaminado o de los lugares con derrames líquidos radiactivos puede efectuarse con sistemas móviles.

2.1.2 Limitaciones

Varios aspectos del despliegue de una tecnología móvil pueden limitar su potencial:

- a) **Disposición física y tamaño:** La disposición física y el tamaño de las unidades estarán sujetos a las restricciones que impongan el método de ensamblaje y transporte utilizado (plataforma, contenedor, remolque, etc.) y la contención necesaria para proteger a los trabajadores, el público y el medio ambiente del lugar en virtud de la reglamentación vigente en el emplazamiento o a nivel local, nacional o internacional. Por lo tanto, deberán tenerse en cuenta también el número de módulos o componentes del sistema que hayan de transportarse y la posibilidad de acogerlos en el emplazamiento.
- b) **Transporte:** El tamaño y el peso deberán permitir el transporte por los medios comerciales disponibles, de conformidad con la reglamentación que se aplique, para lo cual podrían requerirse permisos, aprobaciones o licencias especiales.
- c) **Descontaminación:** El transporte de equipo ya utilizado y contaminado con radiactividad a través de fronteras regionales e internacionales aumenta las responsabilidades y puede exigir una descontaminación interna y externa del equipo.
- d) **Carga de los pisos:** El sistema y la superficie (plataforma, remolque, etc.) sobre la que se encuentre, incluidos los desechos que se acumulen, traten o acondicionen, no deberán superar los límites de carga de los pisos, pudiendo ser necesarias medidas especiales de compactación y otras mejoras de la estabilidad del suelo para las aplicaciones en el exterior.
- e) **Gestión de emisiones líquidas y gaseosas:** El despliegue de sistemas de procesamiento móviles puede requerir disposiciones para la recogida o monitorización de efluentes líquidos o aerotransportados. Esto añadirá complejidad al diseño del sistema o a la interconexión con las instalaciones existentes y, en algunos casos, afectará a zonas externas a las estructuras de la instalación. Ciertas situaciones causadas por fugas involuntarias de desechos líquidos o gaseosos o por los gases de escape de

CUADRO 1. SINOPSIS DE LOS EJEMPLOS DE TECNOLOGÍAS MÓVILES DE PROCESAMIENTO EN USO

	Tecnología	Fase física de la corriente de desechos ^a	Estados Miembros con ejemplos de aplicaciones conocidas ^b
Tratamiento previo	Compactación de baja fuerza	S	Estados Unidos de América, Federación de Rusia, Reino Unido
	Descontaminación mecánica	S	Estados Unidos de América, India
	Neutralización/precipitación químicas	L	Estados Unidos de América
Tratamiento	Lavado del suelo	S	Estados Unidos de América, Federación de Rusia
	Separación del aislamiento de los cables	S	Alemania, Estados Unidos de América
	Descontaminación de aceites radiactivos	L	Canadá, Estados Unidos de América
	Filtración	L	Estados Unidos de América, Federación de Rusia
	Filtración e intercambio iónico	L	Estados Unidos de América, Federación de Rusia
	Filtración, membrana e intercambio iónico	L	Rusia, India, Reino Unido
	Intercambio iónico selectivo en un sistema de extracción de nucleidos	L	Federación de Rusia
	Deshidratación de medios de filtración e intercambio iónico gastados	SH	Finlandia
	Secado de desechos líquidos y sólidos húmedos en un bidón	L, SH	Estados Unidos de América, Reino Unido
	Tratamiento del gas expulsado	G	Estados Unidos de América Federación de Rusia
Acondicionamiento	Encapsulamiento de fuentes selladas en desuso en una matriz metálica	S	Federación de Rusia
	Solidificación (hormigonado)	L	Alemania, Eslovaquia, Estados Unidos de América, Federación de Rusia, Francia, India, Italia, Reino Unido
	Encapsulamiento de resinas de intercambio iónico gastadas en aglutinantes poliméricos	SH	Francia
Tratamiento y acondicionamiento combinados	Supercompactación	S	Alemania, Brasil, Canadá, Estados Unidos de América, Italia,
	Reducción de volumen y embalaje de componentes activados	S	Reino Unido, República Checa
	Desmantelamiento y embalaje de fuentes en desuso de actividad alta	S	Estados Unidos de América
	Vitrificación del suelo in situ	S	Reino Unido, Sudáfrica Australia, Estados Unidos de América
Caracterización	Sistemas de caracterización de desechos	S, L	Estados Unidos de América, Francia, Italia

^a G — gaseosa; L — líquida; S — sólida; SH — sólida húmeda.^b Esta lista de las aplicaciones conocidas no es exhaustiva; solo comprende algunos ejemplos.

las operaciones de secado, entre otras posibilidades, pueden exigir la incorporación de soluciones especiales o complejas, fácilmente adaptables a las instalaciones de los distintos usuarios, en el diseño del sistema.

2.2 APLICABILIDAD DE LOS SISTEMAS MÓVILES: METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN Y LA DECISIÓN

Antes de desplegar cualquier tecnología, ya sea fija o móvil, es necesario estudiar con cuidado una gran variedad de factores. Se recomienda vivamente que las consideraciones incluidas en el proceso de evaluación expuesto en esta publicación sean examinadas por profesionales en todos sus detalles antes de seleccionar un enfoque particular. También se recomienda que el usuario se forme una idea completa de los recursos necesarios para abordar las cuestiones técnicas, reglamentarias, jurídicas, empresariales y laborales relacionadas con otras partes interesadas, como los organismos gubernamentales y locales, en el marco del proceso de evaluación y aplicación de la tecnología.

En esta sección se presenta una metodología para evaluar la aplicabilidad de los sistemas móviles de procesamiento de desechos, y se describe un proceso de adopción de decisiones para seleccionar el más adecuado. El diagrama lógico ilustra los dos pasos distintos de la evaluación iterativa (véase la figura 1). El paso 1 comprende [4]:

- la adquisición de datos realistas sobre el inventario de desechos (volúmenes, tasas de procesamiento requeridas, características de los desechos, etc.);
- los objetivos del procesamiento (por ejemplo, el tratamiento, la inmovilización, y el embalaje para el almacenamiento y la disposición final);
- la determinación de las tecnologías que podrían utilizarse para el procesamiento (con las complejas consideraciones que eso entraña).

Este paso comprende también un estudio técnico preliminar de los posibles sistemas móviles para determinar si representan una opción viable.

Si los resultados de la evaluación preliminar efectuada en el paso 1 no respaldan la aplicación de un sistema móvil, valdrá la pena estudiar la opción de una instalación permanente o fija. En cambio, si el análisis preliminar demuestra que un sistema móvil sería adecuado, el proceso de evaluación continuará con el paso 2, que comprende un estudio técnico detallado, seguido de un análisis económico minucioso que justifique en todos sus detalles la aplicación de un sistema móvil. El paso 2 proporcionará una evaluación pormenorizada de los aspectos económicos, incluidas las ofertas preliminares de los proveedores, si ya está en uso un sistema similar, o una estimación de los costos basada en los planos de diseño del sistema. En esta evaluación deberán analizarse también los costos de la movilización, la explotación, el mantenimiento, la gestión de los desechos secundarios, la desmovilización y la disposición final. Aplicando este enfoque, podrá adoptarse una decisión técnica y financiera acertada.

A continuación se examinan en detalle las principales cuestiones que deben tomarse en consideración en cada paso del procedimiento de decisión que se ilustra en la figura 1. Es importante señalar que la decisión de aplicar una tecnología puede requerir múltiples iteraciones de ambos pasos, con la intervención oportuna de la administración y posiblemente la reconsideración de los objetivos del procesamiento y las opciones disponibles.

2.2.1 Evaluación preliminar de la viabilidad del uso de un sistema móvil (paso 1)

La primera tarea de la evaluación preliminar consiste en entender la corriente de desechos, la tasa de generación y las características de los desechos, a fin de precisar mejor los objetivos del procesamiento y las opciones disponibles. El conocimiento detallado de las propiedades radiológicas, físicas, térmicas, químicas y biológicas es esencial para comenzar este análisis [19].

Al establecer los objetivos del procesamiento (por ejemplo, el tratamiento, la inmovilización, y el embalaje para el almacenamiento y la disposición final), y especialmente al determinar las tecnologías que podrían utilizarse para ello, deberán satisfacerse los reglamentos y requisitos locales, nacionales, internacionales y del propio emplazamiento. Desde este punto de vista, habrá que cumplir con un marco de reglamentación y seguridad, compuesto por códigos, requisitos y guías, condiciones para la solicitud de las licencias, reglamentos de transporte, evaluaciones del impacto ambiental, propiedades deseadas del cuerpo de desechos final, y convenciones y acuerdos internacionales, antes de proseguir el análisis.

La determinación de una o varias tecnologías posibles para el procesamiento de los desechos significa que puede haber varias opciones, pero la atención deberá centrarse en primer lugar en identificar los sistemas de procesamiento y las configuraciones que permitirán cumplir las metas y objetivos de manera óptima. La comparación de las tecnologías de valor probado con las de aparición reciente también forma parte de este proceso de evaluación. Es importante examinar los resultados de esta evaluación junto con la administración y con las partes interesadas pertinentes, antes de proceder al estudio técnico preliminar de las tecnologías posibles.

En el estudio técnico preliminar de las opciones posibles deberán considerarse normalmente los siguientes aspectos y parámetros:

- características de los desechos entrantes o iniciales (volumen, tipo, actividad y forma);
- características de los desechos secundarios generados por el proceso (volumen, tipo, actividad y forma);
- características del cuerpo del desecho final (tipo de contenedor, actividad y forma);
- consideraciones jurídicas y reglamentarias (nacionales, locales, internacionales, licencias, explotación, movimientos y transporte de desechos);
- requisitos relacionados con el transporte (explotación del sistema, envíos de desechos, caminos de acceso);
- modo de uso: procesamiento por lotes o continuo (tipo de sistema y desechos secundarios);
- costo: arreglos contractuales (arriendo/compra), instalación periódica (mensual/anual/por campañas/por volumen), artículos fungibles, personal, retirada y disposición final del equipo, expedición, y disposición final de los desechos;
- configuración del sistema (fijo, móvil o montado sobre plataforma);
- superficie en la base o tamaño físico del sistema fijo o móvil (dimensiones máximas, espacio para la manipulación/sustitución/repelación de los medios);
- peso total (carga de los pisos y movimientos);
- personal requerido (número de operadores, personal por contrata, cualificaciones técnicas, operaciones, seguridad física, mantenimiento);
- capacidad y rendimiento máximos u óptimos, y reducción de volumen;
- necesidades de espacio (zona de almacenamiento de artículos fungibles, espacio de aparcamiento transitorio y almacenamiento de desechos);
- lista de los artículos fungibles necesarios para los procesos (medios, contenedores, piezas, productos químicos);
- necesidades de servicios generales (aire, agua, vapor, electricidad y ventilación);
- equipo de manipulación para la colocación, el procesamiento, y la manipulación y el embalaje de los desechos (grúas, horquillas elevadoras y capacidad de carga);
- requisitos generales de seguridad industrial y radiológica (barreras, protección respiratoria, monitorización de la exposición del personal, controles de la contaminación, monitorización del aire).

Algunos de estos aspectos y parámetros ya están considerados a un nivel superior (por ejemplo, en relación con la reglamentación, el transporte o las características de los desechos). A los efectos de esta publicación, los elementos del estudio técnico de las opciones posibles se han optimizado para que ayuden a determinar si un sistema móvil es una opción viable que merece un análisis más a fondo.

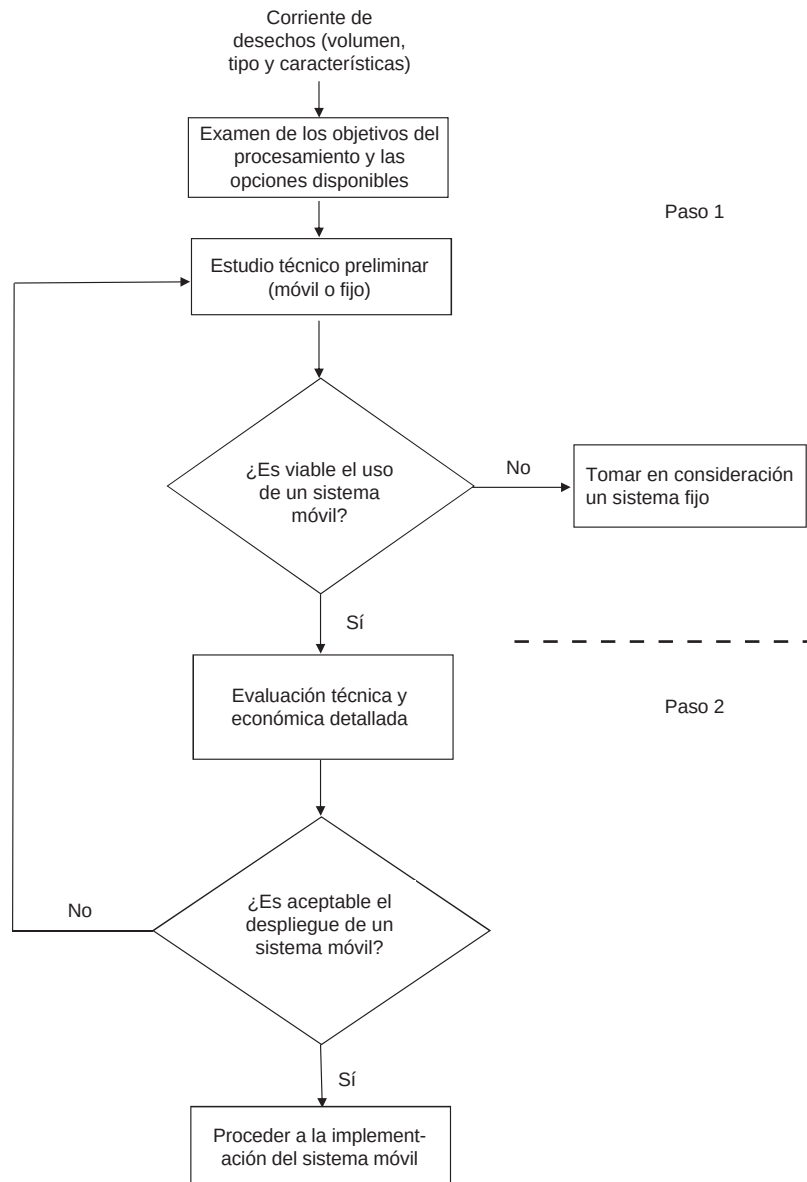


Fig. 1. Proceso decisorio para determinar la aplicabilidad de un sistema de procesamiento móvil.

El grupo encargado de la evaluación deberá determinar y sopesar la importancia de los distintos factores al examinar la ventaja de un sistema móvil con respecto a uno fijo. La importancia relativa (el peso) de cada factor dependerá de la aplicación de que se trate, y su determinación requerirá el examen de las aportaciones de todo el grupo de evaluación y la adopción de decisiones colectivas.

En las secciones 3 a 7 figura información sobre todas las características importantes de varias tecnologías móviles de valor comprobado para los distintos pasos de procesamiento de desechos que podrían utilizarse directamente, tal como se describen en esta publicación, para el estudio técnico preliminar. Esa información se considera actualizada en el momento de la publicación. Sin embargo, como se señaló anteriormente, no es exhaustiva y debería emplearse solo como punto de partida para cada análisis particular.

2.2.2 Evaluación detallada de la aplicación de un sistema móvil particular (paso 2)

El paso 2 consiste en un estudio técnico detallado de la opción de utilizar una tecnología móvil particular, seguido de un minucioso análisis económico. El estudio técnico detallado incluirá la recopilación de datos y el análisis para entender mejor los detalles técnicos y las posibles deficiencias a partir de:

- a) el panorama general de la tecnología;
- b) los componentes del sistema;
- c) las interconexiones de los componentes físicos;
- d) el espacio y la distribución del peso;
- e) los controles físicos;
- f) los movimientos de los desechos y materiales.

El uso de un análisis económico formal puede incluir la solicitud de propuestas de varios proveedores potenciales. También puede entrañar la participación de representantes financieros y jurídicos, y la realización de una evaluación del riesgo que tenga en cuenta los factores técnicos, ambientales y financieros. Las conversaciones con las partes interesadas deberán desarrollarse en términos técnicamente exactos pero que todos puedan comprender con facilidad.

Una vez terminado el análisis económico, se compilará y resumirá toda la información, que se empleará luego para determinar el enfoque más adecuado, con el apoyo de los interesados internos y externos. El paso final del proceso es la validación de la decisión sobre la aceptabilidad del despliegue del sistema móvil. Si la evaluación detallada no justifica plenamente el despliegue, deberá repetirse el análisis, comenzando en general por la determinación de las otras opciones posibles. Una alternativa a este bucle iterativo podría ser la decisión de tomar en consideración una instalación fija.

Los anexos I y II contienen información técnica detallada sobre dos tecnologías móviles de procesamiento ampliamente utilizadas. Cabe señalar que esa información no es exhaustiva y habrá de utilizarse solo como punto de partida para realizar un estudio técnico detallado que tenga en cuenta, entre otras cosas:

- los requisitos referentes al funcionamiento y el mantenimiento;
- la inflamabilidad;
- la generación de gases peligrosos;
- la necesidad de blindaje adicional;
- los posibles problemas de recriticidad en relación con los desechos secundarios.

2.2.3 Ejemplo del proceso de decisión en dos pasos

La metodología propuesta para la aplicación de un sistema móvil (enfoque, evaluación de las consideraciones pertinentes y análisis técnico-económico) es un proceso de adopción de decisiones en dos pasos (véase la figura 1). Aplicaremos este proceso a un ejemplo simple, consistente en el tratamiento de los desechos sólidos de las operaciones de cinco emplazamientos de centrales nucleares con una capacidad instalada de 1500 MW(e) y múltiples unidades de reactores, distribuidas dentro de un perímetro de 300 km. En promedio, la combinación de desechos sólidos generados consta de un 70 % que es combustible (de los cuales el 85 % es también compactable) y un 30 % que no es posible procesar.

2.2.3.1 Paso 1: Examen de los objetivos del procesamiento y las opciones disponibles

Para el tratamiento de las corrientes de desechos definidas, según la experiencia internacional y las mejores prácticas de valor probado, las opciones más adecuadas son la incineración y la compactación. Un examen preliminar de los requisitos reglamentarios y de seguridad indica que las dos opciones merecen un análisis más a fondo, ya que ambas podrían satisfacer los requisitos. Sin embargo, dado que las dos

opciones tienen ventajas e inconvenientes, vale la pena consultar con la administración y otras partes interesadas para obtener retroinformación y decidir si se procederá al estudio técnico preliminar de ambas o si se dará preferencia a una de ellas por las ventajas obvias que presenta. En este ejemplo, la opinión de la administración es favorable a que se realice el estudio técnico preliminar de las dos opciones.

2.2.3.2 Paso 1: Estudio técnico preliminar, con un análisis comparativo de los sistemas móviles y fijos

La comparación cualitativa de los aspectos y parámetros indica, en este caso, que la aprobación reglamentaria de la incineración sería mucho más difícil de obtener (debido, por ejemplo, al costo y la demora de la concesión de la licencia) que la autorización de un supercompactador. Los desechos secundarios generados por un incinerador, especialmente las emisiones gaseosas, son más difíciles de controlar y requieren un sistema complejo. El cuerpo del desecho que produce un supercompactador es definitivo y no requiere ninguna inmovilización ulterior, salvo, posiblemente, su fijación en una matriz sólida (enlechado) en el contenedor destinado a la disposición final. El cuerpo del desecho producido por un incinerador requiere normalmente algún tipo de inmovilización (a menos que se utilice un proceso con plasma a alta temperatura).

Sin embargo, el factor de reducción de volumen que podría alcanzarse para el cuerpo de desechos final con la incineración es mucho más alto que el que se logra con la supercompactación. Muchos de los supercompactadores disponibles en el comercio son instalaciones modulares que pueden utilizarse para realizar campañas en los lugares de generación de desechos o instalarse permanentemente en un sitio centralizado. En cambio, no muchos incineradores son ‘transportables’. Para crear un sistema modular se precisarían algunas innovaciones en el diseño, la explotación y la obtención de la licencia definitiva. Por lo tanto, esta opción puede eliminarse del análisis. Sin embargo, la incineración centralizada es una práctica muy común para esos volúmenes de desechos, ya que ofrece los mejores resultados en lo que respecta a la reducción de volumen.

El transporte de los desechos desde los lugares en que se generan exige el cumplimiento de estrictos reglamentos de transporte y podría aumentar considerablemente los costos y los riesgos. En cambio, la transferencia de los desechos desde las unidades que los producen hasta un lugar dentro de cada emplazamiento, por caminos no públicos, es más eficaz en relación con el costo y entraña menos riesgos. En cuanto al personal necesario, un incinerador requeriría normalmente el trabajo en turnos de operadores autorizados las 24 horas del día y los siete días de la semana, mientras que un supercompactador puede arrendarse y ser explotado enteramente por operadores externos.

La comparación de los costos (basada en estimaciones presupuestarias) indica que la diferencia entre las opciones consideradas no es sustancial: es del orden de un porcentaje, y no del orden de magnitud del costo unitario (dólares/m³). El análisis preliminar tiene en cuenta los costos del capital, la explotación y el mantenimiento, la obtención de los permisos y los gastos varios desde el comienzo hasta el final (por ejemplo, a lo largo de todo el ciclo de vida de la corriente de desechos, incluidos el almacenamiento y la disposición final). Aunque esta comparación de los costos demuestra la ventaja comparativa de un incinerador fijo situado en un lugar central, desde ese punto de vista podrían justificarse también un supercompactador móvil que operara por campañas en los distintos emplazamientos o un supercompactador instalado permanentemente en un lugar centralizado.

Estas consideraciones preliminares dejan en claro que la decisión deberá basarse en cuestiones de otra índole (otros factores) y no en el costo unitario. Sobre la base de este estudio técnico preliminar cualitativo, el grupo encargado de la evaluación puede llegar a la conclusión de que un supercompactador móvil es una opción viable que vale la pena someter a la evaluación técnica y económica detallada del paso 2, necesaria para adoptar la decisión definitiva.

Cabe señalar que este análisis cualitativo conduciría probablemente a otra conclusión si los parámetros de entrada fueran diferentes, por ejemplo si el número de emplazamientos con centrales nucleares fuera solo de uno o dos, si el volumen fuera mucho menor o si los emplazamientos estuvieran muy cerca unos de otros.

2.2.3.3 Paso 2: Evaluación técnica y económica detallada

Para realizar una evaluación técnica detallada es preciso reexaminar los supuestos considerados en relación con la generación de desechos (es decir, los volúmenes, la tasa de producción, el régimen de explotación y las capacidades requeridas), así como los aspectos de la reglamentación y la seguridad, a fin de confirmar que se cumplen todos los requisitos para la solicitud de la licencia. El paso siguiente consiste en examinar los parámetros de diseño, los límites y restricciones, la fiabilidad y disponibilidad, la facilidad de mantenimiento y de construcción, los límites del entorno de trabajo y las normas nacionales (el panorama general de la tecnología). Luego se realizará un análisis de los componentes del sistema, a fin de entender mejor el equipo necesario para aplicar los diagramas de flujo del proceso. Otra parte esencial del análisis técnico consiste en entender mejor las necesidades de espacio, la distribución del peso, las interfaces, las conexiones, la contigüidad con las configuraciones existentes, los servicios requeridos y los controles físicos del sistema (barreras, acceso, entradas y salidas, etc.). Por último, para finalizar el análisis deberán tomarse en consideración los movimientos de los desechos y materiales. Esta lista no es ni secuencial ni exhaustiva. La información que se necesite será distinta en cada caso particular.

En el anexo I se enumeran los parámetros y las consideraciones más importantes para los supercompactadores móviles utilizados en este ejemplo. Sin embargo, los proveedores podrán proporcionar información más detallada para una determinada capacidad o un régimen de explotación dado, lo que incluirá un diagrama de flujo del proceso y otros datos útiles para la evaluación.

Los resultados del análisis de este ejemplo indican que un supercompactador móvil es una opción viable desde el punto de vista técnico. Sin embargo, el tratamiento de los desechos podría realizarse también utilizando compactadores móviles de diferentes capacidades (rendimientos) y con diferentes modos de explotación (en turnos únicos o múltiples, y en campañas de mayor o menor duración). Deberá encontrarse una solución óptima, basada en un análisis económico que genere estimaciones detalladas de los costos tecnológicos de los diversos compactadores y de los costos de funcionamiento de los distintos modos de explotación. A ello deberá seguir un análisis del impacto de esta tecnología en el costo del ciclo de vida del desecho. La realización de este análisis económico complejo será obligatoria para toda solución que parezca técnicamente viable, antes de su aplicación.

Cuando el análisis indique claramente que el costo del uso de un sistema móvil es asequible y adecuado, la aplicación podrá comenzar de inmediato. En cambio, si se determina que el sistema móvil no cumple las metas fijadas (por ejemplo, para el costo unitario) o las cumple solo de manera muy ajustada, sin márgenes suficientes para imprevistos en el costo del ciclo de vida, será necesario volver al paso del estudio técnico preliminar y reexaminar los supuestos adoptados con respecto a la viabilidad del sistema móvil. Normalmente se realizará entonces un examen detallado similar de la opción de un sistema fijo, lo que en este ejemplo correspondería a la incineración o la supercompactación centralizadas. Este análisis permitirá realizar la comparación necesaria para seleccionar la solución más adecuada.

Cabe observar que, según el caso de que se trate, el análisis iterativo puede tener que repetirse varias veces antes de llegar a una decisión definitiva sobre la aplicación. Dado que esa decisión sobre la aplicación de la solución más adecuada no depende solo de la eficacia en relación con el costo sino también de una serie de otras consideraciones referentes a la gestión de las incertidumbres y los riesgos, el sistema móvil puede terminar siendo igualmente la opción más conveniente.

Este examen demuestra que incluso en un caso sencillo como el de este ejemplo (tratamiento de los desechos sólidos de las operaciones de cinco centrales nucleares con una capacidad instalada de 1500 MW(e) y múltiples unidades de reactores, distribuidas dentro de un perímetro de 300 km), la decisión final de utilizar un sistema móvil o alternativo no es sencilla y puede exigir un análisis minucioso y complejo del caso en cuestión.

3 SISTEMAS DE TRATAMIENTO PREVIO DE DESECHOS

3.1 DESECHOS SÓLIDOS

3.1.1 Compactación de baja fuerza

3.1.1.1 Descripción de un sistema típico

Los sistemas de compactación de baja fuerza suelen ser unidades independientes que emplean la tecnología del pistón hidráulico, con un dispositivo para recoger los líquidos que puedan generarse durante el ciclo de compactación (véase la figura 2). El efluente —una mezcla de gases, aire y partículas— debe ser filtrado y dirigido hacia un punto de descarga autorizado y monitorizado. La compactación de baja fuerza puede ser un sistema de tratamiento previo, antes de la compactación de alta presión, o un sistema de tratamiento independiente. La fuerza de compresión suele ser de entre 100 y 500 kN.

Esta tecnología puede reducir un bidón estándar de 200 L a un disco, o ser utilizada para compactar desechos de baja densidad de modo que ocupen un volumen menor dentro de un bidón, en preparación para la supercompactación o disposición final ulterior. El producto final variará según la fuerza de compactación utilizada y la densidad inicial del bidón, pero los factores de reducción de volumen se sitúan típicamente entre 3 y 6, en función de que la unidad se utilice para la compactación solo del contenido o del bidón completo. Esta tecnología se configura en muchos casos como un sistema móvil para atender las necesidades de diversas instalaciones.



Fig. 2. Compactador de baja fuerza.

3.1.1.2 Descripción de los componentes y elementos

- a) **Estructura del compactador:** Este es el elemento central del sistema, compuesto por un pistón hidráulico vertical y una cámara de compactación, con contención para retener todo el gas y el material particulado que se generen durante la operación. El bidón que se someterá a la compactación, completa o solo del contenido, se introduce en la estructura ya sea elevando la cámara o abriendo una puerta de acceso.
- b) **Unidad motriz hidráulica:** Este es el sistema presurizador de lubricante hidráulico, compuesto por una bomba de alta presión y las tuberías de interconexión con el compactador. La unidad motriz contiene también reguladores de la presión, dispositivos de control del caudal y válvulas de seguridad.
- c) **Sistema de gestión del aire, el gas y la materia particulada:** El sistema de eliminación de partículas en los gases expulsados asegura que los gases emitidos al medio ambiente estén exentos de partículas radiactivas. Por lo general consiste en un mecanismo de filtración previa y un filtro de aire particulado de alta eficiencia (HEPA) configurados en serie y, en algunos casos, un desnebulizador situado frente a un ventilador aspirante de tamaño adecuado.
- d) **Sistema de gestión de líquidos:** El proceso de compactación puede generar líquidos procedentes del material sometido a la operación. Para gestionar esos líquidos de manera segura, el equipo incluye un sistema de drenaje o recogida. Por lo general, el líquido se recoge y transfiere a un sistema de tratamiento de desechos por lotes.
- e) **Panel de control y distribución de energía eléctrica:** La bomba hidráulica y el ventilador aspirante necesitan energía eléctrica. El panel de control contiene los mandos y los dispositivos electrónicos de la lógica de regulación. Para el accionamiento a distancia se necesita un estativo de mandos, con el correspondiente cable eléctrico o accionador.
- f) **Tanques de recogida de desechos secundarios:** En algunos casos, el compactador se suministra con los tanques de recogida de desechos. El tratamiento de esos desechos suele correr a cargo del emplazamiento en cuestión.

3.1.1.3 Ventajas particulares del sistema

- Relaciones de reducción de volumen relativamente altas;
- Envolvente físico de dimensiones pequeñas;
- Fuerzas de compresión de hasta 500 kN;
- Diseños especiales para bidones de diversas dimensiones;
- Posibilidad de compactación dentro del bidón;
- Facilidad de mantenimiento y descontaminación;
- Eficacia ampliamente demostrada.

3.1.1.4 Limitaciones particulares del sistema

- La relación de reducción de volumen lograda varía considerablemente según la naturaleza del desecho;
- El sistema no es adecuado para desechos de alta densidad (como metales, hormigón o madera);
- El compactador no incluye normalmente el tratamiento de los desechos secundarios.

3.1.1.5 Principales consideraciones para el estudio técnico

Las principales consideraciones para el estudio técnico de los sistemas de compactación de baja fuerza se recogen en el cuadro 2.

3.1.2 Descontaminación mecánica

3.1.2.1 Descripción de un sistema típico

Los sistemas móviles de descontaminación tienen una variedad de opciones de configuración. Las tecnologías móviles de descontaminación mecánica comprenden la limpieza criogénica con dióxido de carbono (hielo seco) o con hielo, el chorreo con granalla cortante o arenado, el chorreo con perlas de plástico o vidrio, los cañones de agua (una combinación de agua a alta presión con medios abrasivos) y la limpieza con chorros de agua a presión (el uso de un chorro de agua a alta temperatura y alta presión, junto con medios de aspiración y limpieza a presión muy alta y ultraalta).

Un ejemplo de un sistema de descontaminación mecánica consiste en un pequeño sistema de limpieza por chorro de agua a alta temperatura montado en un carrito, que, entre otras cosas, limpia mecánicamente los pisos y las paredes de la planta o los componentes situados en campanas especiales (véase la figura 3). El principio de esta limpieza eficaz se basa en la combinación del impacto mecánico del chorro de agua con la acción del vapor. La mezcla residual de agua/vapor es recogida por un potente sistema de aspiración, que deja el piso y los componentes casi secos. En este diseño, la unidad móvil trata también el líquido y los desechos sólidos recogidos. Otras variantes del diseño pueden incluir condensadores y separadores ciclónicos en el sistema de expulsión de gases y los filtros, y medios de intercambio iónico para los desechos líquidos. Las aplicaciones para los pisos contienen también opciones de limpieza por cepillado.

CUADRO 2. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE COMPACTACIÓN DE BAJA FUERZA

Consideración	Descripción
Características de los desechos y materiales tratados (volumen, tipo, actividad, forma)	Las formas o características de las corrientes de desechos tratadas más comúnmente con los sistemas móviles de compactación de baja fuerza comprenden lo siguiente: — desechos preembalados generalmente en sacos de plástico, bidones o cajas (plataformas); — contenedores de desechos sueltos y de baja densidad relacionados típicamente con la explotación de instalaciones radiactivas (como papeles, plásticos y telas); — desechos de baja actividad gestionados en el marco de una estrategia de disposición final de costo relativamente bajo (desechos para los que no se justifican los sistemas de compactación a mayor presión ni otros sistemas más costosos con una reducción de volumen mayor). La compactación de baja fuerza puede utilizarse también como tratamiento previo a la supercompactación, si se desea reducir aún más el volumen.
Características de los desechos secundarios generados por el proceso (volumen, tipo, actividad, forma)	Aparte del disco compactado o el bidón con el material comprimido resultante del proceso, los desechos secundarios generados por la compactación de baja fuerza suelen ser escasos o nulos. Las operaciones pueden producir pequeñas cantidades de líquidos, además de los medios de filtración cargados de partículas. Los desechos compactados suelen tener cierto grado de contaminación, pero normalmente esta no se concentra como consecuencia del proceso.

CUADRO 2. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE COMPACTACIÓN DE BAJA FUERZA (cont.)

Consideración	Descripción
Características del cuerpo de desechos final (tipo de contenedor, actividad, forma)	El cuerpo de desechos final es por lo general un cuerpo comprimido de baja densidad, que puede estar contenido en un saco, un bidón o una caja. Algunos sistemas utilizan formas simples de dispositivos antirrebote (como fajas o elementos insertados), que se comprimen junto con el cuerpo del desecho para maximizar la reducción de volumen. Los factores de reducción de volumen dependen del tipo de desecho, pero por lo general se sitúan entre 3 y 6.
Consideraciones jurídicas y reglamentarias (nacionales, locales, internacionales, licencias, explotación, movimientos y transporte de desechos)	El despliegue del sistema no requiere un proceso jurídico o reglamentario complejo.
Requisitos relacionados con el transporte (explotación del sistema, envíos de desechos, caminos de acceso)	El traslado de la unidad es una operación de transporte normal y, a diferencia del caso de los materiales o desechos radiactivos, no se requieren medios de transporte especiales para el equipo o los cuerpos de desechos resultantes.
Modo de uso: procesamiento por lotes o continuo (tipo de sistema, desechos secundarios)	El modo de funcionamiento típico es por lotes. La frecuencia depende generalmente de la tasa de generación de desechos y de la capacidad de almacenamiento de esos desechos.
Costo: arreglos contractuales (arriendo/compra); instalación periódica (mensual/anual/por campañas/por volumen); artículos fungibles; personal; retirada y disposición final del equipo; expedición; disposición final de los desechos	Los sistemas de compactación de baja fuerza pueden arrendarse o (más comúnmente) comprarse. Por lo general son baratos y se fabrican por adaptación directa de las aplicaciones de gestión de desechos no radiactivos. No requieren una inversión de dinero sustancial, ni son caros de explotar o mantener.
Configuración del sistema (móvil o montado sobre plataforma)	Los sistemas de compactación de baja fuerza pueden estar montados en una plataforma, para su uso dentro de la planta, o instalados dentro de una pequeña estructura móvil, como un contenedor ISO.
Superficie en la base o tamaño físico del sistema móvil (dimensiones máximas, espacio para la manipulación/sustitución /reparación de los medios)	Los sistemas de compactación de baja fuerza requieren un espacio mínimo, pudiendo normalmente ser colocados en superficies de solo 15 m ² .
Peso total (carga de los pisos y movimientos)	El peso típico por unidad es de entre 1 y 5 toneladas.
Personal requerido (número de operadores, personal por contrata, cualificaciones, operaciones, seguridad física, mantenimiento)	Por lo general basta un único operador. En algunos emplazamientos se requiere un equipo de dos personas, como medida de seguridad industrial (pistón de compresión hidráulica a alta presión). La capacitación se limita normalmente al control del sistema y la seguridad industrial. Algunas operaciones de mantenimiento pueden requerir la intervención de un técnico especializado en sistemas hidráulicos.

CUADRO 2. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE COMPACTACIÓN DE BAJA FUERZA (cont.)

Consideración	Descripción
Capacidad y rendimiento máximos u óptimos, factor de descontaminación y reducción de volumen	La capacidad o el rendimiento típicos de un compactador de baja fuerza se especifican en ‘minutos por ciclo de compresión’. Esta duración del ciclo está determinada por el volumen de desechos sólidos presente en el contenedor y por la presión de terminación del ciclo fijada por el fabricante. En un compactador de baja fuerza de bidones o cajas, un ciclo de compresión completo dura de 1 a 5 minutos. Al igual que la duración del ciclo de compresión, el número de ciclos necesarios por contenedor dependerá del tipo de desechos de que se trate, de su densidad y de los valores de presión fijados para el compactador.
Necesidades de espacio (zona de almacenamiento de artículos fungibles, espacio de aparcamiento transitorio y almacenamiento de desechos)	— En los sistemas independientes: espacio para un remolque de 3 m × 6 m. — En los sistemas sobre plataformas: típicamente, 3,7 m × 2,3 m × 1,3 m. — Las necesidades de espacio para artículos fungibles son insignificantes; para el aparcamiento transitorio de los contenedores de desechos antes y después del procesamiento se requieren normalmente entre 15 y 30 m².
Lista de los artículos fungibles necesarios para el proceso (medios, contenedores, piezas, productos químicos)	— Los artículos fungibles necesarios para la compactación de baja fuerza se limitan por lo general a los bidones, los dispositivos antirrebote, los filtros de material particulado y otros contenedores utilizados en el proceso. — El fluido hidráulico se cambia periódicamente, pero en general no se contamina durante el proceso de compactación, a menos que haya derrames o fugas del sistema.
Necesidades de servicios generales (aire, agua, vapor, electricidad, ventilación)	— Energía eléctrica: 440/220 V, CA. — Ventilación: 0,5-5 m³/min; presión negativa en la cara de compactación.
Equipo de manipulación para la colocación, el procesamiento, y la manipulación y el embalaje de los desechos (grúas, horquillas elevadoras, capacidad de carga)	— Los sacos de desechos preprocesados se manipulan y cargan manualmente en el compactador. — Para los bidones o cajas compactados se precisa por lo general algún vehículo industrial estándar de elevación/transporte, como una horquilla elevadora, una carretilla de mano o un mecanismo elevador simple.
Requisitos generales de seguridad industrial y radiológica (barreras, protección respiratoria, monitorización de la exposición del personal, controles de la contaminación, monitorización del aire)	— En general tendrá que haber ropa anticontaminación, dosímetros y equipo de protección industrial (por ejemplo, gafas de protección y calzado de seguridad). — Puede requerirse protección respiratoria para la compactación de desechos muy contaminados y la descontaminación de la cámara de compactación interna o el pistón. — Normalmente, el emplazamiento que reciba el equipo instalará dispositivos de ventilación localizada y de toma de muestras del aire para reducir al mínimo la posibilidad de emisión de actividad aerotransportada.



Fig. 3. Sistema de descontaminación de pisos montado en un carrito (cortesía de BARC).

3.1.2.2 Descripción de los componentes y elementos

Los componentes varían enormemente según la tecnología de que se trate. En el sistema arriba descrito, los principales componentes son:

- un aspirador pulverizador;
- una unidad de calentamiento y bombeo de agua (módulo de alta temperatura/alta presión);
- un módulo de expulsión de gases, consistente en el ventilador aspirante;
- unidades de purificación y recirculación del agua, comprendidas en el módulo de separación ciclónica;
- un módulo de filtración;
- un módulo de intercambio iónico.

Estos módulos están ensamblados sobre un carrito móvil (de aproximadamente 1,5 m × 1 m × 1,5 m), en una configuración que permite el acceso fácil para el uso y el mantenimiento de cada uno de ellos. La unidad de control y de alimentación de electricidad del sistema también se encuentra sobre el carrito, en un lugar de fácil acceso. La unidad móvil está diseñada de modo que pueda desplazarse por los corredores y las galerías de mantenimiento. El avance del aspirador durante el proceso de limpieza deja atrás un espacio (limpio) seco y descontaminado, en que pueden moverse el operador y las mangueras sin propagar la contaminación (véase la figura 4).

El sistema consta básicamente de los siguientes componentes:

- a) **Aspirador pulverizador:** Este componente es un aspirador de mano dotado de una serie de toberas para la pulverización de agua a alta temperatura y alta presión. Un conjunto de ruedecillas situadas en la parte inferior lo separa de la superficie (entre 2 y 3 mm) y permite su desplazamiento. El aspirador tiene conectadas mangueras para el agua y la succión (típicamente con un radio de cobertura de 5 a 10 m). Esto permite utilizar el aspirador en la zona contaminada, dejando la unidad móvil en una zona limpia y alejada. De ser necesario, pueden instalarse mangueras más largas.
- b) **Tanque para el agua, bomba y sistema de calentamiento:** El módulo de calentamiento y bombeo del agua se encuentra sobre el carrito móvil. El agua recibida se almacena en un tanque de 100 L,

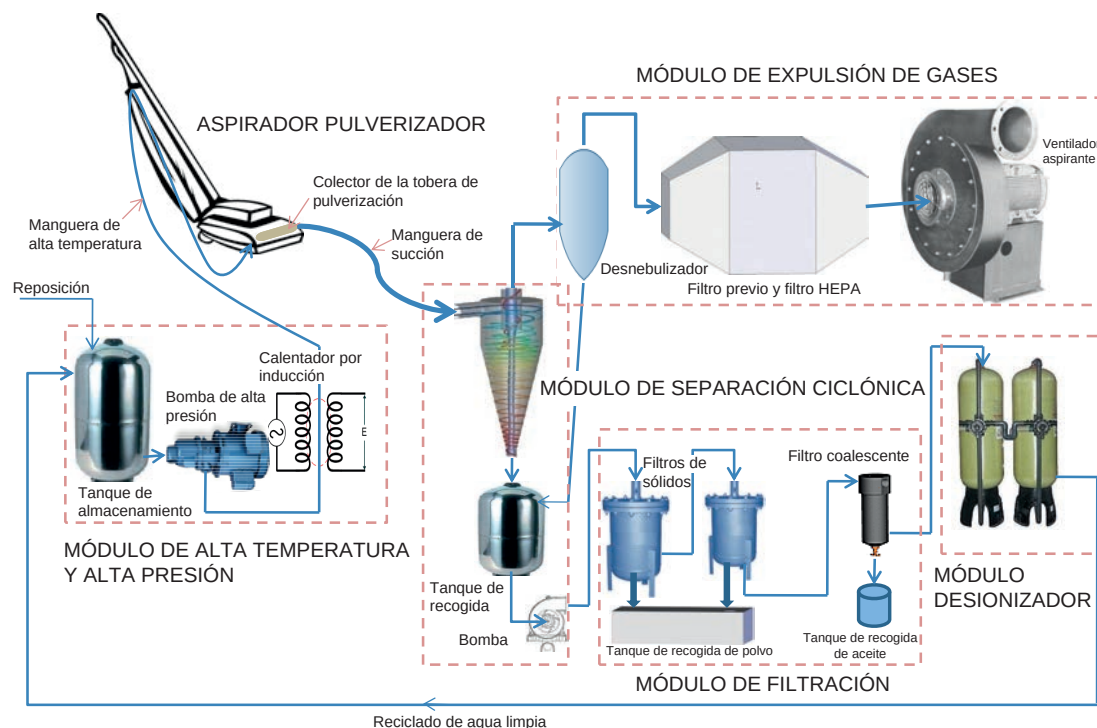


Fig. 4. Representación esquemática de un sistema móvil de descontaminación de superficies (cortesía de BARC).

donde un calentador en línea eleva su temperatura. La tasa de descarga del agua se controla mediante válvulas, lo que permite efectuar la limpieza con cantidades menores de agua.

- c) **Ciclón, desnebulizador, filtro previo, filtro HEPA y ventilador aspirante:** El subsistema de depuración comprende los elementos de tratamiento de gases y líquidos. En el separador ciclónico, el líquido desciende y los componentes de gas/vapor de la superficie son atraídos por el ventilador aspirante. El depurador de los gases de expulsión consta de un desnebulizador y un filtro previo o un filtro HEPA. El agua que se condensa en el desnebulizador es dirigida hacia el sistema de depuración de líquidos.
- d) **Filtros de cartucho para partículas sólidas, filtro coalescente, columnas de intercambio catiónico-aniónico, bombas de recirculación:** El sistema de depuración de líquidos consta de filtros de cartucho para las partículas sólidas, un filtro coalescente para separar las sustancias oleosas y un módulo desionizador para eliminar las sales disueltas. El agua limpia se reintroduce en el circuito. El reciclaje del agua tratada reduce el volumen de los desechos líquidos secundarios. Se requerirá un suministro de agua del emplazamiento para reponer las pérdidas del sistema durante el proceso de depuración.
- e) **Suministro de energía eléctrica, sistema de control e instrumentación:** La energía eléctrica es aportada por el emplazamiento en cuestión. Los sistemas de alimentación y de control, incluidas las válvulas, se encuentran en el carrito, en una posición de fácil acceso para el mantenimiento.

3.1.2.3 Ventajas particulares del sistema

- Reciclado y reutilización de herramientas y equipos;
- Descarga ilimitada de materiales limpios que cumplen con los criterios de emisión;
- Limpieza combinada por presión y aspiración, que limita la propagación de la contaminación;
- Reducción de los volúmenes de desechos y, por consiguiente, de los costos de la disposición final.

3.1.2.4 Limitaciones particulares del sistema

- El tamaño de los materiales que se pueden descontaminar está limitado por las dimensiones del aspirador y de la cámara;
- Algunos Estados o instalaciones nucleares pueden no tener criterios para la descarga ilimitada de materiales.

3.1.2.5 Principales consideraciones para el estudio técnico

Las principales consideraciones para el estudio técnico de los sistemas de descontaminación mecánica se recogen en el cuadro 3.

CUADRO 3. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE DESCONTAMINACIÓN

Consideración	Descripción
Características de los desechos y materiales tratados (volumen, tipo, actividad, forma)	— Pisos de la planta contaminados durante las operaciones o las actividades de mantenimiento; — Componentes (metales, plásticos, compuestos) con superficies lisas o irregulares; — Volúmenes variables, según el proceso de generación de desechos; — Niveles de actividad típicamente de bajos a intermedios, transitorios o parcialmente atrapados.
Características de los desechos secundarios generados por el proceso (volumen, tipo, actividad, forma)	— Los volúmenes de desechos secundarios son bajos, en comparación con el fregado y la limpieza en húmedo. — Los desechos resultantes son sólidos o líquidos (agua utilizada en el sistema, agua del lavado a contracorriente, filtro previo/ filtros HEPA). — Algunos tipos de medios sólidos pueden reutilizarse varias veces (como las bujías y los elementos de los filtros de cartucho, o los medios de intercambio iónico). — Los medios sólidos gastados deben recogerse y acondicionarse. — Los desechos líquidos generados deben ser tratados para su emisión o reutilización con tecnologías de tratamiento de desechos acuosos.
Características del cuerpo de desechos final (tipo de contenedor, actividad, forma)	— Sólido, dentro de un bidón, una caja u otro contenedor; — Los medios gastados de filtración e intercambio iónico pueden requerir acondicionamiento a fin de cumplir los criterios de aceptación para la disposición final.
Consideraciones jurídicas y reglamentarias (nacionales, locales, internacionales, licencias, explotación, movimientos y transporte de desechos)	En general, las cuestiones reglamentarias no son complejas, ya que los sistemas se utilizan en condiciones controladas. La reglamentación local, regional y nacional regulará la gestión de las actividades, la expedición de sistemas radiactivos, y la emisión de materiales y desechos líquidos tratados: — puede ser necesario transferir los materiales contaminados del punto de generación o recogida al sistema de descontaminación; — puede ser necesario el transporte por carretera para el envío a un nuevo emplazamiento.

CUADRO 3. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE DESCONTAMINACIÓN (cont.)

Consideración	Descripción
Requisitos relacionados con el transporte (explotación del sistema, envíos de desechos, caminos de acceso)	— El sistema requiere un camino de acceso para la entrega y la retirada en camiones o contenedores; — El movimiento de los desechos se efectúa con ayuda de pequeños cofres o recipientes blindados en bidones o contenedores; — Para la descontaminación de superficies, el sistema móvil se desplaza a la zona que debe ser limpiada tirando o empujando manualmente el carrito.
Modo de uso: procesamiento por lotes o continuo (tipo de sistema, desechos secundarios)	— Típicamente, procesamiento por lotes, pero también puede ser continuo; — Los límites suelen estar dados por el cansancio del operador.
Costo: arreglos contractuales (arriendo/compra); instalación periódica (mensual/anual/por campañas/por volumen); artículos fungibles; personal; retirada y disposición final del equipo; expedición; disposición final de los desechos	Los costos varían según el tipo de proceso. Un sistema de limpieza de superficies que utilice la técnica de la pulverización tendrá un costo típico del orden de 200 000 dólares de los Estados Unidos. Tanto el arriendo como la compra son estrategias comunes.
Configuración del sistema (móvil o montado sobre plataforma)	— En las opciones de arrendamiento el sistema suele estar montado en un contenedor. — Los sistemas disponibles para la compra son unidades más pequeñas.
Superficie en la base o tamaño físico del sistema móvil (dimensiones máximas, espacio para la manipulación/sustitución /reparación de los medios)	— Unidades pequeñas para el interior de la planta: 1 m × 1,5 m × 1,5 m, más una superficie de 1 m × 1 m para el carrete portamanguera. — Las unidades montadas en contenedores pueden tener un volumen de hasta 3 m × 15 m × 3 m.
Peso total (carga de los pisos y movimientos)	El peso típico de un sistema de limpieza de superficies para el interior de la planta es de aproximadamente 1000 kg, pero el peso efectivo variará según el diseño.
Personal requerido (número de operadores, personal por contrata, cualificaciones técnicas, operaciones, seguridad física, mantenimiento)	— Generalmente se requiere un solo operador capacitado, respaldado por un ayudante no cualificado. — Puede necesitarse personal de mantenimiento para la conexión, la retirada y el mantenimiento correctivo periódico.
Capacidad y rendimiento máximos u óptimos, factor de descontaminación y reducción de volumen	Un sistema móvil de limpieza de superficies para el uso dentro de la planta puede tratar típicamente una superficie de entre 800 y 1000 m ² en un turno de ocho horas, según el tipo y nivel de contaminación.
Necesidades de espacio (zona de almacenamiento de artículos fungibles, espacio de aparcamiento transitorio y almacenamiento de desechos)	El espacio de almacenamiento requerido suele ser de 3 m × 3 m × 4 m.

CUADRO 3. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE DESCONTAMINACIÓN (cont.)

Consideración	Descripción
Lista de los artículos fungibles necesarios para el proceso (medios, contenedores, piezas, productos químicos)	— Elementos de los filtros previos/filtros HEPA; — Columnas de intercambio iónico; — Agua; — Filtros de aire y agua; — Toberas de pulverización; — Puntas de boquilla; — Aditivos específicos para la limpieza.
Necesidades de servicios generales (aire, agua, vapor, electricidad, ventilación)	— Energía eléctrica: los requisitos varían según el equipo; típicamente, 440/220 V, CA. — Sistemas líquidos: sistema de drenaje u otras vías de descarga monitorizadas y autorizadas. — Aire: botella de aire comprimido incluida en el sistema móvil o conexión por manguera al aire de servicio de la planta.
Equipo de manipulación para la colocación, el procesamiento, y la manipulación y el embalaje de los desechos (grúas, horquillas elevadoras, capacidad de carga)	Sistemas de manipulación, por ejemplo mecanismos de izado y horquillas elevadoras para la movilización y desmovilización (carga).
Requisitos generales de seguridad industrial y radiológica (barreras, protección respiratoria, monitorización de la exposición del personal, controles de la contaminación, monitorización del aire)	Tiene que haber puntos de control de la radiación y la contaminación, y un espacio para ponerse y quitarse la ropa protectora. Después del trabajo debe monitorizarse la contaminación del personal.

Nota: Filtro HEPA — filtro de aire particulado de alta eficiencia.

3.2 DESECHOS LÍQUIDOS

3.2.1 Neutralización y precipitación químicas

3.2.1.1 Descripción de un sistema típico

La composición química puede modificarse mediante un ajuste del pH, por adición de floculantes o precipitantes o con otros tratamientos suplementarios. El cambio de la composición química como tratamiento independiente o combinado con otros medios de procesamiento es un método de valor probado para el tratamiento de desechos. La adición de productos químicos puede ser manual o realizarse de forma automatizada con un sistema de administración dosificada en régimen discontinuo, en línea o automático. En la figura 5 se presenta un esquema simplificado de un mecanismo de alimentación continua y automatizada. La figura 6 es una fotografía de la unidad de control de un proveedor.

3.2.1.2 Descripción de los componentes y elementos

Las necesidades de equipo para el tratamiento previo con productos químicos son mínimas y no influyen de manera importante en los servicios o el espacio requeridos para las instalaciones de procesamiento móviles. Por lo general se utiliza una bomba dosificadora de 110/220 V, CA, para inyectar los productos químicos directamente de los recipientes suministrados por el proveedor a la tubería

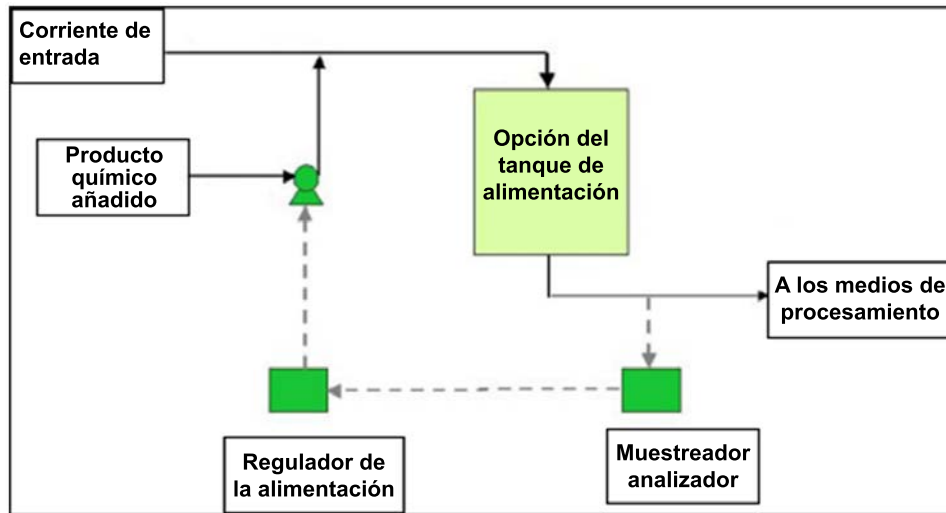


Fig. 5. Esquema de un sistema típico de inyección continua de productos químicos.



Fig. 6. Panel de control de un sistema típico de inyección continua de productos químicos (cortesía de EnergySolutions).

del sistema. En una disposición típica, se instala también un equipo de tratamiento suplementario que alimenta directamente un tanque de mezcla en línea o situado antes de los medios de procesamiento. Estas opciones permiten la estabilización del líquido y dejan un tiempo de reacción suficiente para la precipitación antes de la llegada a los medios de procesamiento. El equipo comprende lo siguiente:

- bombas dosificadoras o de inyección automática o manual de productos químicos;
- medidores de la diferencia de potencial eléctrico;
- sensores del pH y la conductividad;
- detectores de corriente de flujo;
- pequeños tanques de adición de productos químicos con capacidad de mezcla.

3.2.1.3 Ventajas particulares del sistema

- Mayor eliminación de la actividad con un aumento mínimo del volumen de desechos secundarios;
- Bajo costo;
- Tamaño pequeño;
- Portabilidad;
- Flexibilidad: posibilidad de utilizar numerosos tipos de productos químicos para una amplia variedad de impurezas.

3.2.1.4 Limitaciones particulares del sistema

- Requiere una caracterización exacta de la corriente de entrada;
- No sirve para todas las corrientes de desechos ni para todas las características;
- Los productos químicos pueden requerir una manipulación o regulación especiales;
- Puede ser preciso instalar un sistema de mezcla en línea, por ejemplo paletas de agitación mecánica.

3.2.1.5 Principales consideraciones para el estudio técnico

Las principales consideraciones para el estudio técnico de los sistemas de neutralización y precipitación químicas se recogen en el cuadro 4.

CUADRO 4. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE NEUTRALIZACIÓN Y PRECIPITACIÓN QUÍMICAS

Consideración	Descripción
Características de los desechos y materiales tratados (volumen, tipo, actividad, forma)	Esta tecnología se aplica a los desechos líquidos y los fangos residuales. El volumen variará según la aplicación; el sistema puede utilizarse para desechos de actividad de baja a intermedia.
Características de los desechos secundarios generados por el proceso (volumen, tipo, actividad, forma)	— El proceso se utiliza para eliminar la actividad o las impurezas químicas. Los desechos secundarios pueden consistir en lodos precipitados (sólidos) y en los medios de procesamiento utilizados para capturar las impurezas modificadas, como los medios de filtración para la actividad insoluble o las resinas de intercambio iónico para las impurezas solubles. — El volumen de desechos secundarios dependerá de la concentración de impurezas, el volumen del líquido entrante y el método de extracción utilizado.
Características del cuerpo de desechos final (tipo de contenedor, actividad, forma)	En general, los desechos secundarios requerirán un acondicionamiento (por ejemplo, por deshidratación, hormigonado o tratamiento térmico) para eliminar la humedad o crear un monolito sólido, y podrán embalsarse en bidones de 200 L u otros contenedores de desechos aprobados.
Consideraciones jurídicas y reglamentarias (nacionales, locales, internacionales, licencias, explotación, movimientos y transporte de desechos)	Deberá consultarse la reglamentación local, regional, nacional o internacional relativa a la manipulación, el almacenamiento, el transporte y la disposición final de los productos químicos.
Requisitos relacionados con el transporte (explotación del sistema, envíos de desechos, caminos de acceso)	Ninguna consideración especial, aparte de las ya señaladas.

CUADRO 4. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE NEUTRALIZACIÓN Y PRECIPITACIÓN QUÍMICAS (cont.)

Consideración	Descripción
Modo de uso: procesamiento por lotes o continuo (tipo de sistema, desechos secundarios)	El sistema puede utilizarse en cualquiera de los dos modos, según la aplicación de que se trate. Típicamente, el proceso con adiciones manuales a granel es discontinuo, mientras que el uso de sistemas de dosificación manuales o automatizados permite un proceso continuo.
Costo: arreglos contractuales (arriendo/compra); instalación periódica (mensual/anual/por campañas/por volumen); artículos fungibles; personal; retirada y disposición final del equipo; expedición; disposición final de los desechos	El costo varía según el tipo de producto químico y el consumo. Los sistemas continuos automatizados son normalmente más caros que los manuales. Un sistema automatizado diseñado para el procesamiento continuo suele costar menos de 10 000 dólares de los Estados Unidos.
Configuración del sistema (móvil o montado sobre plataforma)	El sistema puede configurarse de ambas formas. Las penetraciones pueden incluir la conexión con los tanques de alimentación del proceso o las tuberías de procesamiento.
Superficie en la base o tamaño físico del sistema móvil (dimensiones máximas, espacio para la manipulación/sustitución / reparación de los medios)	— Sistema manual: 4 m². — Sistema plenamente automatizado: 9 m².
Peso total (carga de los pisos y movimientos)	<100 kg.
Personal requerido (número de operadores, personal por contrata, cualificaciones, funcionamiento, seguridad física, mantenimiento)	— El sistema requiere ciertos conocimientos de química. — Para el procesamiento por lotes se necesita una persona que añada los productos químicos. — Para el procesamiento continuo se necesita una persona que reponga periódicamente los productos químicos para mantener el suministro (<15 min por lote de proceso). — Los productos químicos a granel son suministrados a la instalación y el equipo de proceso.
Capacidad y rendimiento máximos u óptimos, factor de descontaminación y reducción de volumen	— Varían según el diseño del sistema; — A granel hasta 40 m³ (la mezcla es el factor limitante); — Continuo, típicamente de 115 L/min o menos.
Necesidades de espacio (zona de almacenamiento de artículos fungibles, espacio de aparcamiento transitorio y almacenamiento de desechos)	Varían según la tasa de consumo, pero típicamente son inferiores a 10 m ³ .
Lista de los artículos fungibles necesarios para el proceso (medios, contenedores, piezas, productos químicos)	Determinados productos químicos (cáusticos, ácidos, floculantes) según las características de los desechos entrantes y la actividad o las especies químicas que sea preciso eliminar.
Necesidades de servicios generales (aire, agua, vapor, electricidad, ventilación)	— Típicamente, electricidad de 110/220 V, CA; — Agua desmineralizada.

CUADRO 4. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE NEUTRALIZACIÓN Y PRECIPITACIÓN QUÍMICAS (cont.)

Consideración	Descripción
Equipo de manipulación para la colocación, el procesamiento, y la manipulación y el embalaje de los desechos (grúas, horquillas elevadoras, capacidad de carga)	— Puede necesitarse una horquilla elevadora o una carretilla de mano para el desplazamiento de los productos químicos a granel. — Algunos productos químicos se suministran en volúmenes que pueden transportarse a mano (por ejemplo, en contenedores plásticos de 20 kg/19 L).
Requisitos generales de seguridad industrial y radiológica (barreras, protección respiratoria, monitorización de la exposición del personal, controles de la contaminación, monitorización del aire)	Algunos tratamientos suplementarios utilizan productos químicos peligrosos. Esas opciones deberán evaluarse cuidadosamente, para determinar su impacto en los equipos de las zonas de trabajo adyacentes o el acceso del personal. Normalmente no se requieren controles radiológicos especiales.

4 SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE DESECHOS

4.1 DESECHOS SÓLIDOS

4.1.1 Lavado de suelos

4.1.1.1 Descripción de un sistema típico

Los procedimientos de lavado de suelos comprenden normalmente el funcionamiento de varias unidades conectadas en un proceso integrado para separar los componentes del suelo de los materiales contaminantes, y los distintos contaminantes entre sí. Buena parte del sistema se basa en tecnologías de tratamiento de minerales de uso común en la industria minera, y tiene parámetros de ampliación a escala bien conocidos. La figura 7 ilustra los principales componentes de un sistema ofrecido por un proveedor.

El sistema de lavado de suelos puede diseñarse de modo que sirva para una gran variedad de tipos de suelos, incluidos los que tienen un contenido de arcilla moderadamente alto. La mayoría de estos sistemas separan los suelos contaminados principalmente según el tamaño físico de las partículas, aunque pueden modificarse para que los separen según otros parámetros físicos, como la densidad, las características de flotación, o las propiedades químicas, magnéticas y eléctricas. Los suelos contaminados que contienen cantidades excesivas de materiales arcillosos (más de un 40 % a 50 % aproximadamente) suelen ser demasiado difíciles de separar. El tamaño mínimo de las partículas separadas está dado por una luz de malla de alrededor de 200 (0,075 mm).

Las piedras y guijarros separados se lavan a presión, con agua que se recicla en un nuevo lavado a presión o como agua de reposición en el sistema de lavado de suelos. El agua utilizada para descontaminar el equipo se trata del mismo modo.

El suelo exento de piedras y guijarros se hace pasar por el sistema de lavado. El suelo así descontaminado se recombina con las fracciones sólidas limpias y se devuelve al lugar de origen. El pequeño volumen de sólidos contaminados se embala para su disposición final o su tratamiento ulterior, según proceda. La única agua que se extrae del sistema es la del vaciado del equipo en el momento de la desmovilización, que se trata y descarga.

En cuanto a la configuración, los sistemas móviles de lavado de suelos están montados en una plataforma, que se carga en remolques para el transporte hacia y desde el emplazamiento. El equipo

principal de procesamiento del suelo de un sistema móvil típico de lavado de suelos de 20 t/h puede montarse en tres remolques de plataforma, y el equipo de apoyo cabe en otros cinco remolques.

4.1.1.2 Descripción de los componentes y elementos

- Transportadores y tolvas;
- Tanques, bombas y tuberías;
- Sistemas de accionamiento;
- Sistemas hidráulicos;
- Equipo pesado;
- Contención secundaria.

4.1.1.3 Ventajas particulares del sistema

- Rehabilitación *in situ*.
- Segregación de los componentes radiactivos y peligrosos de los desechos mixtos, que permite la disposición final segura de cada uno de ellos en un lugar apropiado.
- Operaciones a plena escala: funcionamiento continuo, basado en turnos.
- Posibilidad de altas tasas de procesamiento.
- Reducción al mínimo de los desechos secundarios, gracias al diseño del sistema.

4.1.1.4 Limitaciones particulares del sistema

- Tamaño, y complejidad de la movilización y desmovilización;
- Impacto ambiental negativo inicial;
- Alto costo, por lo general;
- Necesidad de respetar el complejo marco regulador para el lavado de suelos.



Fig. 7. Sistema de lavado de suelos (cortesía de EnergySolutions).

4.1.1.5 Principales consideraciones para el estudio técnico

Las principales consideraciones para el estudio técnico de los sistemas de lavado de suelos se recogen en el cuadro 5.

CUADRO 5. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE LAVADO DE SUELOS

Consideración	Descripción
Características de los desechos y materiales tratados (volumen, tipo, actividad, forma)	Las formas o características de las corrientes de desechos asociadas más comúnmente con los sistemas móviles de lavado de suelos son grandes superficies de terrenos con suelos ampliamente contaminados con radio, y suelos que contienen Th y U. Sin embargo, el proceso permite tratar también suelos con otros contaminantes radiactivos y no radiactivos (As, Cd, Pb, PCB).
Características de los desechos secundarios generados por el proceso (volumen, tipo, actividad, forma)	— Los efluentes del sistema de lavado de suelos pueden incluir piedras, guijarros, grava, arenas secas, finos contaminados y soluciones de lavados/enjuagues (agua). — La principal corriente de desechos secundarios es el agua de lavado con los lodos residuales, que se generan como parte del proceso de separación y consisten típicamente en agua, reactivos y aditivos, por ejemplo ácidos, bases, agentes tensioactivos, disolventes, y agentes quelantes y eliminadores, para aumentar la solubilidad o separación de los contaminantes. — El agua de lavado contendrá también una mezcla de partículas finas contaminadas o de contaminantes disueltos. — Los lodos del proceso son el residuo de la extracción de los contaminantes disueltos o de las partículas finas contaminadas del agua de lavado gastada.
Características del cuerpo de desechos final (tipo de contenedor, actividad, forma)	La mayor parte del suelo que entra en el proceso se descarga con un nivel de contaminantes reducido a niveles inferiores a los límites reglamentarios, mientras que los contaminantes extraídos se concentran en el suelo restante, para su disposición final. El cuerpo de desechos final consistirá en el suelo contaminado concentrado, que podrá destinarse a la disposición final dentro del emplazamiento (de forma contenida, por ejemplo por enterramiento en un vertedero poco profundo) o ser embalado en contenedores adecuados para su disposición final como desecho radiactivo fuera del emplazamiento. Las características del cuerpo de desechos final dependerán de las características iniciales del suelo tratado y del funcionamiento del sistema de lavado de suelos.
Consideraciones jurídicas y reglamentarias (nacionales, locales, internacionales, licencias, explotación, movimientos y transporte de desechos)	El lavado de suelos está sujeto normalmente a un complejo marco regulador, compuesto por las leyes, reglamentos y políticas sobre el impacto ambiental relacionados con la gestión de las tierras y las aguas residuales.
Requisitos relacionados con el transporte (explotación del sistema, envíos de desechos, caminos de acceso)	— La mayoría de los sistemas móviles piloto pueden transportarse en entre dos y cuatro remolques; un sistema típico de 20 t/h puede requerir entre ocho y diez remolques. — El volumen del equipo necesario dependerá del tamaño del proyecto. — El equipo puede transportarse por carretera o por ferrocarril (suponiendo que exista un acceso al emplazamiento). — Se requerirá una calzada de acceso para el aparcamiento transitorio en el emplazamiento, la instalación y la retirada de los desechos finales.

CUADRO 5. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE LAVADO DE SUELOS (cont.)

Consideración	Descripción
Modo de uso: procesamiento por lotes o continuo (tipo de sistema, desechos secundarios)	— Los sistemas piloto pueden efectuar un procesamiento por lotes o continuo. — Las operaciones a plena escala son continuas y se basan en turnos.
Costo: arreglos contractuales (arriendo/compra); instalación periódica (mensual/anual/por campañas/por volumen); artículos fungibles; personal; retirada y disposición final del equipo; expedición; disposición final de los desechos	— En general, los sistemas de lavado de suelos son caros y requieren una inversión de dinero sustancial para la construcción, el almacenamiento, la movilización y el mantenimiento. — Los arreglos contractuales típicos comprenden una suma por la movilización y desmovilización del sistema, más una tarifa fija basada en el peso en seco ajustado del suelo, en toneladas por hora. — La mano de obra y los artículos fungibles (por ejemplo, los reactivos) suelen estar incluidos en la tarifa fija. — Los costos pueden incluir las pruebas de laboratorio, los ensayos piloto, la selección del equipo, los exámenes del diseño, la adquisición, la fabricación, la instalación en el emplazamiento y la puesta en marcha del sistema. — Los costos de explotación pueden incluir la recogida del suelo, el procesamiento, la redistribución del suelo, la energía eléctrica, el equipo pesado, el aire, los tanques auxiliares, las columnas de resina, el muestreo, los análisis de laboratorio y la disposición final de los desechos primarios y secundarios.
Configuración del sistema (móvil o montado sobre plataforma)	— Por lo general, el sistema está montado en plataformas, que se cargan en remolques para el transporte hacia y desde el emplazamiento. — El equipo de procesamiento principal de un sistema móvil típico de lavado de suelos de 20 t/h puede montarse en tres remolques de plataforma, y el equipo de apoyo requiere otros cinco remolques.
Superficie en la base o tamaño físico del sistema móvil (dimensiones máximas, espacio para la manipulación/sustitución/ reparación de los medios)	Para un sistema típico de 20 t/h se necesita una superficie de colocación de 37 m × 46 m; para un sistema piloto de 4 t/h se precisan 15 m × 21 m.
Peso total (carga de los pisos y movimientos)	— El peso total y la carga de las zonas (carga de los pisos) pueden variar enormemente, según la capacidad y la configuración del equipo. — Los cimientos adecuados para la colocación del equipo de lavado de suelos son muy variables y dependen de las limitaciones físicas del emplazamiento. — Pueden abarcar desde un simple fundamento consistente en un revestimiento sintético, arena o grava, hasta una losa de hormigón o asfalto que sostenga y acoja el equipo. — La zona en torno al equipo de lavado de suelos suele estar inclinada, para que el agua escurra y no se acumule en el área de trabajo adyacente al lugar del tratamiento.
Personal requerido (número de operadores, personal por contrata, cualificaciones técnicas, operaciones, seguridad física, mantenimiento)	— El equipo puede explotarse de forma ininterrumpida, las 24 horas del día. — Debe preverse un tiempo de parada de alrededor del 10 % para el mantenimiento del equipo. — Típicamente, el personal requerido para el despliegue sobre el terreno comprende de 10 a 20 personas.

CUADRO 5. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE LAVADO DE SUELOS (cont.)

Consideración	Descripción
Capacidad y rendimiento máximos u óptimos, factor de descontaminación y reducción de volumen	— Las tasas de alimentación son del orden de 1 a 2 t/h, en el caso de los equipos piloto pequeños, y de hasta 50 t/h en el de los sistemas a mayor escala. — Un sistema de 20 t/h puede procesar en promedio más de 900 t de suelo por semana (a razón de 6 d, 9 h/d, con un suelo de alto contenido de arcilla). — Los volúmenes de los proyectos típicos varían de miles a cientos de miles de toneladas. — Las tasas de procesamiento pueden ser más altas, según las características particulares del suelo y los contaminantes o el rendimiento del sistema.
Necesidades de espacio (zona de almacenamiento de artículos fungibles, espacio de aparcamiento transitorio y almacenamiento de desechos)	Los reactivos y aditivos utilizados en la planta de tratamiento deben almacenarse en tanques, bidones y otros contenedores hechos de un material adecuado.
Lista de los artículos fungibles necesarios para el proceso (medios, contenedores, piezas, productos químicos)	— Una gran variedad de reactivos y aditivos, como ácidos, bases, agentes tensioactivos, disolventes, y agentes quelantes y eliminadores. — Los productos químicos pueden ser floculantes, agentes dispersantes, reactivos extractores ácidos o cáusticos, y productos químicos de ajuste del pH. — Pueden requerirse medios de intercambio iónico para la depuración y descarga del agua de lavado.
Necesidades de servicios generales (aire, agua, vapor, electricidad, ventilación)	— Agua; — Combustible diésel para alimentar el equipo; — Electricidad de 110 y 220 V, CA, para el alumbrado y para los equipos de monitorización radiológica, reparación y seguridad física.
Equipo de manipulación para la colocación, el procesamiento, y la manipulación y el embalaje de los desechos (grúas, horquillas elevadoras, capacidad de carga)	En general, una grúa y una horquilla elevadora.
Requisitos generales de seguridad industrial y radiológica (barreras, protección respiratoria, monitorización de la exposición del personal, controles de la contaminación, monitorización del aire)	— Deben aplicarse las operaciones estándar de seguridad radiológica, con inclusión de controles tecnológicos localizados (como la ventilación negativa) para reducir al mínimo la contaminación aerotransportada y la contaminación de los desechos y el agua de lavado a raíz del proceso. — Con frecuencia se coloca un revestimiento de tipo geomembrana bajo los cúmulos de suelo, para evitar el paso de lixiviados contaminados al entorno. — A menudo se utiliza también una cubierta resistente a los rayos ultravioleta (por ejemplo, de polietileno estabilizado) para evitar la penetración de las precipitaciones en el cúmulo de suelo y reducir al mínimo la salida de posibles emisiones volátiles y de polvo. — En muchos casos se emplean asimismo otras medidas de control del polvo, como la humidificación de la superficie de los cúmulos.

CUADRO 5. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE LAVADO DE SUELOS (cont.)

Consideración	Descripción
	— Con frecuencia se construyen bermas, muros de protección u otras medidas adecuadas de desviación (por ejemplo, cunetas de avenamiento) en torno a los cúmulos para prevenir la acumulación de agua y la escorrentía. — Los requisitos generales de protección del personal durante el funcionamiento del equipo comprenden el uso de ropa protectora, la dosimetría y el empleo de equipo de protección industrial (gafas protectoras, calzado de seguridad). — La protección respiratoria no suele ser necesaria, salvo en las raras ocasiones en que se procede a la descontaminación de los componentes internos del sistema.

Nota: PCB — policlorobifenilos.

4.1.2 Separación del aislamiento de los cables

4.1.2.1 Descripción de un sistema típico

Este sistema se utiliza después del tratamiento previo de los cables y alambres de cobre, que incluye la limpieza, la clasificación y la retirada del aislamiento exterior. El material aislante del cable se separa del alambre interno de cobre en la planta trituradora, por procesos mecánicos (véase la figura 8). Una ventaja importante de este proceso es que separa el alambre interno de la contaminación, que suele limitarse al material aislante. En este proceso, el material se carga en la planta trituradora de cables mediante una cinta transportadora. Tras su paso por un troceador para la granulación, es triturado en el molino de corte. La energética acción mecánica del molino de corte elimina la mayor parte de la contaminación del aislamiento. La división del cobre y los fragmentos de material aislante se efectúa por separación mecánica neumática y vibratoria, y el polvo producido se recoge y separa.

4.1.2.2 Descripción de los componentes y elementos

Los principales componentes del sistema comprenden lo siguiente:

- elementos de tratamiento previo (limpieza, clasificación, retirada del aislamiento exterior);
- un troceador;
- un molino de corte (triturador);
- un separador de polvo;
- un separador de aire (para extraer el cobre del aislamiento por flujo de aire);
- un sistema de ventilación con tratamiento del efluente gaseoso (filtración del aire);
- un sistema de recogida del cobre y el material aislante.

4.1.2.3 Ventajas particulares del sistema

- El cobre puede ser apto para la libre reutilización;
- Una parte del material aislante puede ser apta para la libre reutilización;
- La reducción de volumen de los desechos radiactivos es adecuada;
- El costo global es bajo: los costos de disposición final están reducidos al mínimo; el cobre puede revenderse; los costos de campaña del sistema móvil son más económicos que los de un sistema fijo.

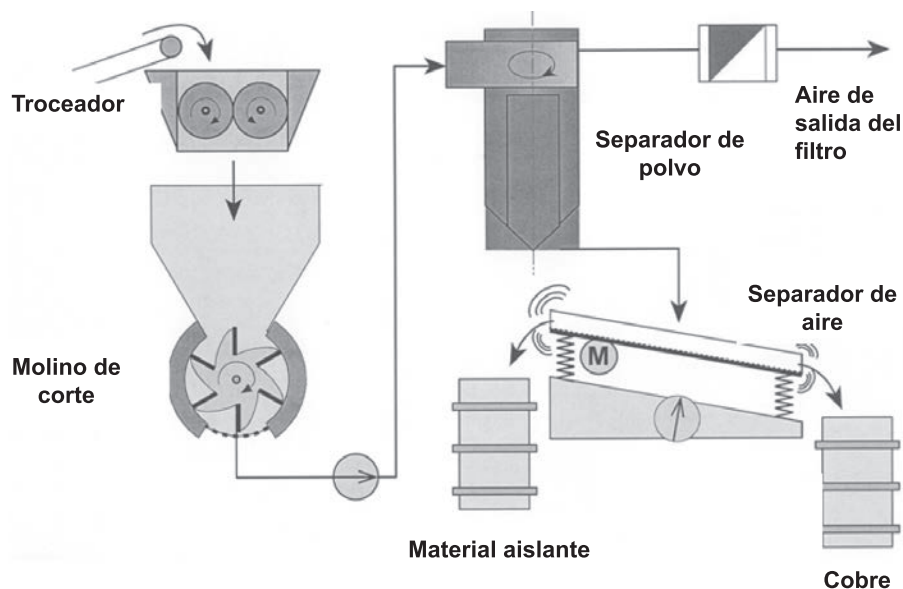


Fig. 8. Diagrama de flujo del proceso del sistema de separación del aislamiento de los cables (cortesía de GNS Gesellschaft für Nuklear-Service mbH).

4.1.2.4 Limitaciones particulares del sistema

- Puede tratar cables de un diámetro máximo de 120 mm;
- Se requiere un tratamiento previo;
- Solo es adecuado para cables de cobre.

4.1.2.5 Principales consideraciones para el estudio técnico

Las principales consideraciones para el estudio técnico de los sistemas de separación del aislamiento de los cables se recogen en el cuadro 6.

CUADRO 6. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE SEPARACIÓN DEL AISLAMIENTO DE LOS CABLES

Consideración	Descripción
Características de los desechos y materiales tratados (volumen, tipo, actividad, forma)	— Cables de Cu preparados del tamaño adecuado (alambres de cobre con su material aislante); — El diámetro de los cables no debe superar los 120 mm; por lo general es de entre 40 y 60 mm.
Características de los desechos secundarios generados por el proceso (volumen, tipo, actividad, forma)	Cu en gránulos (10 % del volumen), material aislante en gránulos (50 % del volumen), polvo (40 % del volumen).
Características del cuerpo de desechos final (tipo de contenedor, actividad, forma)	— Cu: puede ser apto para la libre reutilización. — Material aislante: una parte puede ser apta para la libre reutilización, y el resto deberá tratarse como desecho radiactivo (puede emplearse para el relleno de huecos). — Polvo: disposición final como desecho radiactivo.

CUADRO 6. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE SEPARACIÓN DEL AISLAMIENTO DE LOS CABLES (cont.)

Consideración	Descripción
Consideraciones jurídicas y reglamentarias (nacionales, locales, internacionales, licencias, explotación, movimientos y transporte de desechos)	Para el tratamiento del cable contaminado en una instalación nuclear se requerirá la confirmación de que el proceso puede realizarse sin vulnerar la base de seguridad de la instalación ni la reglamentación local, regional y nacional.
Requisitos relacionados con el transporte (explotación del sistema, envíos de desechos, caminos de acceso)	— Transporte en dos contenedores ISO; — En el emplazamiento receptor tendrá que haber una grúa para colocar el sistema.
Modo de uso: procesamiento por lotes o continuo (tipo de sistema, desechos secundarios)	El sistema puede funcionar en modo continuo o por lotes.
Costo: arreglos contractuales (arriendo/compra); instalación periódica (mensual/anual/por campañas/por volumen); artículos fungibles; personal; retirada y disposición final del equipo; expedición; disposición final de los desechos	Buena relación costo-eficacia para el procesamiento de 10 a 11 t de cables en una campaña, en comparación con la disposición final directa de ese material como desecho radiactivo.
Configuración del sistema (móvil o montado sobre plataforma)	El sistema puede transportarse en dos contenedores ISO, montados uno sobre el otro.
Superficie en la base o tamaño físico del sistema móvil (dimensiones máximas, espacio para la manipulación/sustitución /reparación de los medios)	Superficie requerida: 10 m × 5 m, con 6 m de altura (bajo la grúa).
Peso total (carga de los pisos y movimientos)	Hasta 16 t.
Personal requerido (número de operadores, personal por contrata, cualificaciones técnicas, operaciones, seguridad física, mantenimiento)	Personal mínimo: — un operador del equipo (con capacitación, competencia y experiencia); — dos trabajadores no cualificados para el tratamiento previo.
Capacidad y rendimiento máximos u óptimos, y reducción de volumen	— 200 a 400 kg de desechos primarios por hora; — Factores de reducción de volumen de 20 a 25.
Necesidades de espacio (zona de almacenamiento de artículos fungibles, espacio de aparcamiento transitorio y almacenamiento de desechos)	— Ningún requisito especial; — El espacio de almacenamiento de desechos variará según el volumen de desechos procesado.
Lista de los artículos fungibles necesarios para el proceso (medios, contenedores, piezas, productos químicos)	Filtros HEPA.
Necesidades de servicios generales (aire, agua, vapor, electricidad, ventilación)	— Energía eléctrica: 400 V, CA, 50 Hz; ~100 kW. — Sistema de ventilación del aire de salida del sistema.
Equipo de manipulación para la colocación, el procesamiento, y la manipulación y el embalaje de los desechos (grúas, horquillas elevadoras, capacidad de carga)	Una grúa (10 t) para la colocación y una horquilla elevadora para la manipulación de los desechos.

CUADRO 6. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE SEPARACIÓN DEL AISLAMIENTO DE LOS CABLES (cont.)

Consideración	Descripción
Requisitos generales de seguridad industrial y radiológica (barreras, protección respiratoria, monitorización de la exposición del personal, controles de la contaminación, monitorización del aire)	— Niveles de ruido; — Controles de la contaminación; — Peligros de tropiezo; — Manejo de la horquilla elevadora; — Elevación y corte del cable.

Nota: Filtro HEPA — filtro de aire particulado de alta eficiencia.

4.2 DESECHOS LÍQUIDOS Y SÓLIDOS HÚMEDOS

4.2.1 Descontaminación de aceites radiactivos

Algunos sistemas de reactores utilizan aceites como lubricantes y como fluidos hidráulicos para el accionamiento mecánico. En el curso de las operaciones, las fugas de aceite pueden contaminarse con radiactividad. Por ejemplo, en los reactores canadienses de deuterio-uranio (CANDU), esta corriente de desechos puede ser importante, ya que las máquinas hidráulicas de recarga en línea producen varios centenares de litros de aceite residual por año. Las centrales más modernas han obviado el problema utilizando máquinas de recarga con sistemas neumáticos.

Debido al alto contenido de energía térmica de los aceites, la incineración es un método atractivo para el tratamiento y la disposición final de los aceites residuales. Sin embargo, esto no siempre es posible. En el Canadá se ha desarrollado otra forma de extraer una amplia gama de contaminantes radiactivos de los aceites residuales [20].

4.2.1.1 Descripción de un sistema típico

Existen dos procesos diferentes, que extraen ya sea la actividad β/γ o el tritio del aceite. En la figura 9 se ilustra el proceso de extracción de la actividad β/γ .

El proceso se basa en una extensa labor de investigación y desarrollo, en que se demostró que las especies radiactivas se incorporan en los aditivos de la mezcla de aceites lubricantes como complejos orgánicos. El proceso utiliza la oxidación térmica catalítica para descomponer esos aditivos y hacer que formen partículas en el aceite, que se extraen luego por medios mecánicos. Este proceso funciona por lotes, ya que la cinética de la oxidación es bastante lenta (horas). El aceite residual se hace pasar repetidas veces por un colador, un filtro de materia particulada y un calentador en serie que alimenta un desgasificador en vacío, lo que elimina el agua disuelta y en suspensión. La recirculación continúa hasta que el aceite alcanza la temperatura requerida de entre 180 y 200 °C. A continuación se introduce gas de oxígeno en el aceite, añadiendo un iniciador (hidroperóxido de cumeno) y un catalizador (naftenato de cobre) para poner en marcha el proceso de oxidación. El aceite se mezcla durante 3 a 6 horas y se hace pasar por la centrífuga para extraer el lodo. Los resultados de un muestreo periódico permiten determinar cuándo se ha logrado el factor de descontaminación deseado. El aceite resultante estará exento de contaminación. Este proceso extrae también contaminantes convencionales como el cadmio y el plomo.

Si el contaminante del aceite es predominantemente tritio, en forma de agua tritiada, puede omitirse el proceso de oxidación térmica y efectuarse únicamente la desgasificación en vacío. Sin embargo, cuando el contenido de agua tritiada del aceite es considerable, los compuestos orgánicos no volátiles asociados con los aditivos del aceite incorporan tritio, y la desgasificación en vacío por sí sola puede no reducir la concentración de tritio del aceite a niveles aceptables para la descarga. Para esta corriente de desechos se

requiere una columna de alúmina activada que extraiga las especies polares no volátiles contaminadas con tritio. En la figura 10 se muestra una versión a escala experimental de la unidad de desgasificación en vacío y la columna de alúmina activada.

4.2.1.2 Descripción de los componentes y elementos

El sistema consta de:

- un tanque de mezcla;
- calentadores en serie;
- un desgasificador en vacío;
- una centrífuga;
- un sistema de desecación que utiliza un condensador y un desecante para extraer los gases contaminados con tritio.

4.2.1.3 Ventajas particulares del sistema

- Es una alternativa a la incineración;
- El producto final es reciclable;
- Es ideal para volúmenes pequeños de aceites problemáticos (como los contaminados también con policlorobifenilos);
- Las operaciones son sencillas;
- Es fácil de manejar.

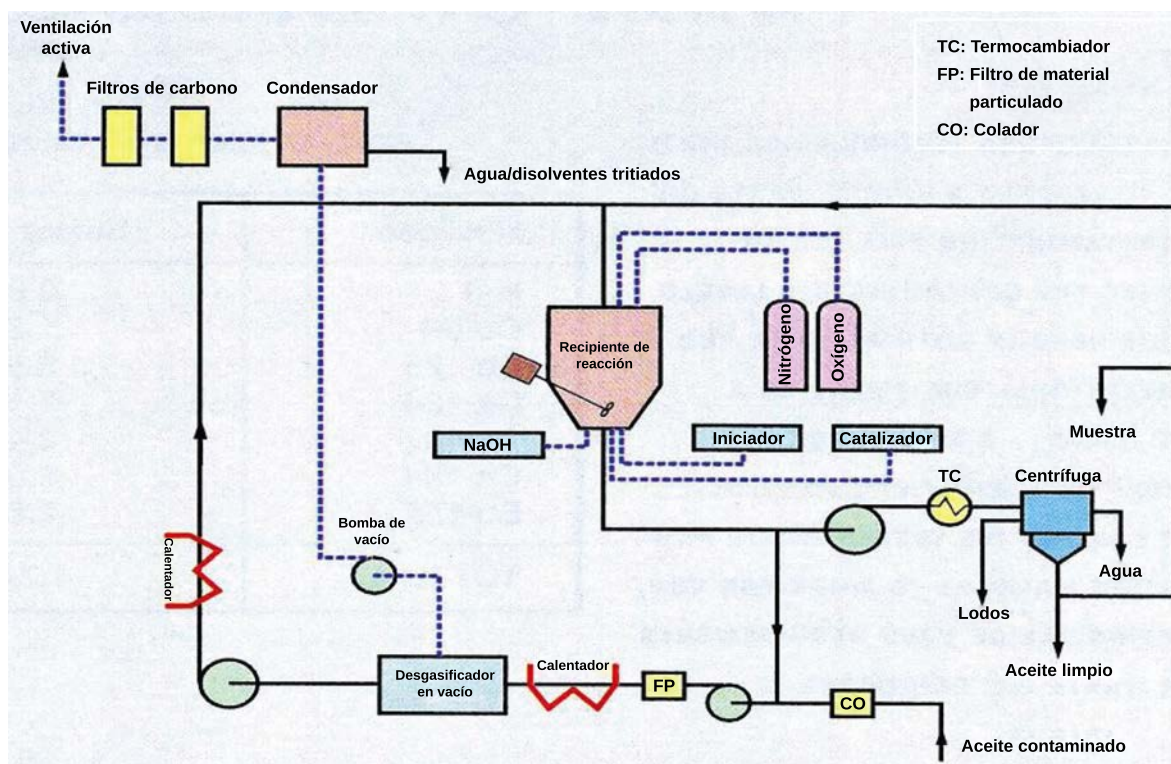


Fig. 9. Diagrama de flujo simplificado del proceso de descontaminación de aceites residuales.



Fig. 10. Sistema de descontaminación de aceites: unidad de desgasificación en vacío y columna de alúmina activada (cortesía de Kinectrics).

4.2.1.4 Limitaciones particulares del sistema

- La cinética de la oxidación es relativamente lenta;
- Los lodos residuales secundarios necesitan un acondicionamiento antes de la disposición final.

4.2.1.5 Principales consideraciones para el estudio técnico

Las principales consideraciones para el estudio técnico de los sistemas de descontaminación de aceites radiactivos se recogen en el cuadro 7.

CUADRO 7. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE DESCONTAMINACIÓN DE ACEITES RADIATIVOS

Consideración	Descripción
Características de los desechos y materiales tratados (volumen, tipo, actividad, forma)	— Aceite lubricante mezclado con agua disuelta y en suspensión que contiene una mezcla de productos de fisión y de activación generados en las operaciones normales de la central nuclear. — Aceites residuales de los reactores CANDU, que también contienen niveles de ^3H del orden de los MBq/L en forma de agua tritiada y de compuestos orgánicos con tritio.
Características de los desechos secundarios generados por el proceso (volumen, tipo, actividad, forma)	— Lodos residuales y agua tritiada del sistema de expulsión de gases; — Factor de reducción de volumen de hasta 100; — Tasa de generación de lodos residuales secundarios proporcional a la duración del proceso.

CUADRO 7. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE DESCONTAMINACIÓN DE ACEITES RADIATIVOS (cont.)

Consideración	Descripción
Características del cuerpo de desechos final (tipo de contenedor, actividad, forma)	Pequeño volumen de material particulado oleoso radiactivo, que puede embalsarse en un contenedor de alta integridad para la disposición final.
Consideraciones jurídicas y reglamentarias (nacionales, locales, internacionales, licencias, explotación, movimientos y transporte de desechos)	— El procesamiento a gran escala requeriría la aprobación reglamentaria en el emplazamiento en cuestión. — También puede ser necesaria la aprobación reglamentaria de las emisiones de aire, porque el sistema de expulsión de gases podría emitir hidrocarburos volátiles formados en el aceite caliente.
Requisitos relacionados con el transporte (explotación del sistema, envíos de desechos, caminos de acceso)	Sistema montado sobre una plataforma y ensamblado en el lugar del procesamiento.
Modo de uso: procesamiento por lotes o continuo (tipo de sistema, desechos secundarios)	Por lotes.
Costo: arreglos contractuales (arriendo/compra); instalación periódica (mensual/anual/por campañas/por volumen); artículos fungibles; personal; retirada y disposición final del equipo; expedición; disposición final de los desechos	— Un sistema móvil construido respetando las normas del diseño nuclear cuesta menos de 50 000 dólares de los Estados Unidos; el costo dependerá del tamaño. — La compra puede no ser una opción eficaz en relación con el costo (el equipo estaría inactivo entre una y otra campaña de procesamiento de desechos). — El montaje del equipo y los controles de operatividad necesarios antes de cada campaña de procesamiento representan dos días de trabajo.
Configuración del sistema (móvil o montado sobre plataforma)	Típicamente, montado sobre plataforma, pero, según el volumen de aceite que deba procesarse, podrá utilizarse también un sistema móvil.
Superficie en la base o tamaño físico del sistema móvil (dimensiones máximas, espacio para la manipulación/sustitución /reparación de los medios)	El espacio máximo requerido es el de un contenedor ISO de 12 m en un remolque.
Peso total (carga de los pisos y movimientos)	No suele ser un problema, a menos que el aceite contenga niveles elevados de radiactividad y deba utilizarse un blindaje.
Personal requerido (número de operadores, personal por contrata, cualificaciones técnicas, operaciones, seguridad física, mantenimiento)	Dos personas con formación en tecnología química.
Capacidad y rendimiento máximos u óptimos, factor de descontaminación y reducción de volumen	— Depende del grado de contaminación del aceite y del grado de limpieza requerido. — Para la actividad β y γ puede lograrse un factor de descontaminación de 100. — Para la contaminación con ^3H cabe esperar un factor de descontaminación menor. — Puede alcanzarse una reducción de volumen de hasta 100, según la duración del procesamiento.

CUADRO 7. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE DESCONTAMINACIÓN DE ACEITES RADIATIVOS (cont.)

Consideración	Descripción
Necesidades de espacio (zona de almacenamiento de artículos fungibles, espacio de aparcamiento transitorio y almacenamiento de desechos)	5 m ² para artículos fungibles.
Lista de los artículos fungibles necesarios para el proceso (medios, contenedores, piezas, productos químicos)	— Catalizador homogéneo: naftenato de cobre; — Iniciador: hidroperóxido de cumeno; — Gas de O₂; — Bidones limpios para los aceites descontaminados; — Bidones de almacenamiento para los lodos residuales;
Necesidades de servicios generales (aire, agua, vapor, electricidad, ventilación)	— Energía eléctrica: 600 V para el calentamiento del aceite y la centrífuga; 110/220 V para otras cargas eléctricas (bombas, alumbrado, ventiladores, mezcladores). — Ventilación pasiva o activa, suponiendo que haya contaminantes volátiles radiactivos en el aceite (¹⁴CO₂, vapor de agua tritiada); — Sistema de extinción de incendios; — Agua de servicio para enfriar el aceite antes de extraer los lodos por centrifugación.
Equipo de manipulación para la colocación, el procesamiento, y la manipulación y el embalaje de los desechos (grúas, horquillas elevadoras, capacidad de carga)	Manipulación de los bidones.
Requisitos generales de seguridad industrial y radiológica (barreras, protección respiratoria, monitorización de la exposición del personal, controles de la contaminación, monitorización del aire)	— Blindaje portátil para el recipiente de reacción y la centrífuga, si el aceite tiene una actividad alta. — El proceso oxidativo ocurre a temperaturas de entre 180 y 200 °C, y el calentador y el recipiente de reacción deben estar aislados. — El sistema completo, incluidos el tanque y los bidones de alimentación y el tanque y los bidones del producto, debe estar rodeado por una berma o un muro de protección capaces de retener un volumen dos veces mayor que el contenido total de líquidos del sistema. — Se requiere equipo de control de derrames y de depuración. — Deben preverse medios para depurar el aire de compuestos orgánicos volátiles (filtración con carbono) y condensar todo el vapor de agua que se produzca durante la oxidación; — Se requiere equipo de protección personal para la manipulación de los líquidos radiactivos. — Si se manipulan aceites tritiados, debe utilizarse un respirador de cartucho que impida la inhalación de ³H. — Si el aceite contiene una cantidad importante de ³H, debe instalarse un monitor de ³H en aire en el sistema de ventilación situado después del filtro de carbono para evaluar las emisiones al medio ambiente y el funcionamiento del condensador y los filtros.

Nota: Reactor CANDU — reactor canadiense de deuterio-uranio.

4.2.2 Filtración

4.2.2.1 Descripción de un sistema típico

Los sistemas de filtración de desechos acuosos permiten eliminar las impurezas insolubles y obtener el efluente deseado para la disposición final o el procesamiento ulterior. En la figura 11 se ilustra un tipo común de sistema móvil de filtración, compuesto por una carcasa que contiene un cartucho plegado o enrollado, o elementos de filtración de manga, una bomba impulsora, y las válvulas y mangueras de interconexión. Algunas aplicaciones pueden emplear medios tales como carbono, arena, fango de diatomeas u otros materiales más específicos. Los sistemas de filtración suelen estar acoplados con tecnologías de tratamiento suplementario, como el tratamiento químico previo, la evaporación, la cristalización, el intercambio iónico o las tecnologías de membrana, para mejorar aún más la calidad del efluente.

4.2.2.2 Descripción de los componentes y elementos

- Carcasa(s) de filtro;
- Indicador de diferencias de presión;
- Herramientas para la manipulación de los filtros (extracción y sustitución);
- Elementos de filtración;
- Bombas u otro equipo de impulsión de líquidos;
- Mangueras o tuberías;
- Válvulas de entrada y salida;
- Suministro de energía eléctrica o aire para las bombas eléctricas o neumáticas;
- Recipientes blindados de transferencia (para las aplicaciones de actividad alta).



Fig. 11. Bomba neumática móvil de diafragma para la filtración de desechos acuosos (izquierda, cortesía de Verder GPM) y carcasa de filtro con un filtro de cartucho (derecha, cortesía de Tri Nuclear Corp.).

4.2.2.3 Ventajas particulares del sistema

- Puede ser muy eficaz con diseños simples;
- Requiere poco espacio;
- Su tecnología sencilla reduce el nivel de conocimientos requerido para el uso;
- Es barato.

4.2.2.4 Limitaciones particulares del sistema

- No suele ser eficaz para las especies solubles (con excepciones en el caso de los elementos de filtro impregnados con materiales de intercambio iónico);
- Baja eficiencia de embalaje de los cartuchos plegados y de filamento enrollado desechados (el embalaje aumenta el volumen);
- Para los medios de filtración distintos de los cartuchos o las mangas, puede requerirse equipo adicional, por ejemplo de compuertas, y competencia técnica para sustituir los medios.

4.2.2.5 Principales consideraciones para el estudio técnico

Las principales consideraciones para el estudio técnico de los sistemas de filtración de desechos acuosos se recogen en el cuadro 8.

CUADRO 8. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE FILTRACIÓN DE DESECHOS ACUOSOS

Consideración	Descripción
Características de los desechos y materiales tratados (volumen, tipo, actividad, forma)	— Los volúmenes varían según la aplicación. — Típicamente líquidos, con impurezas químicas o radiactivas no disueltas. — Concentraciones que varían entre niveles muy bajos y un 10 a 15 % en peso (lodos, fangos). — Niveles de actividad de muy bajos a intermedios.
Características de los desechos secundarios generados por el proceso (volumen, tipo, actividad, forma)	— Los elementos de cartucho y de manga son sólidos y pueden embalarsen tal como se extraen, tras la purga del líquido residual. — Los medios fluidos (carbón, arena, fango de diatomeas) estarán en su forma originaria, con una mayor densidad y actividad, y pueden requerir un tratamiento adicional de secado, encapsulamiento, hormigonado o verificación del drenaje.
Características del cuerpo de desechos final (tipo de contenedor, actividad, forma)	Puede embalarsen en diversos contenedores de desechos, por ejemplo en bidones de 200 L, recipientes de polietileno de alta densidad, cajas u otros contenedores aprobados para las características químicas, físicas y de actividad de los desechos.
Consideraciones jurídicas y reglamentarias (nacionales, locales, internacionales, licencias, explotación, movimientos y transporte de desechos)	— Tienen que cumplirse las normas locales, regionales y nacionales para el diseño, embalaje, aparcamiento transitorio, almacenamiento, transporte y disposición final del sistema. — Los desechos de actividad más alta requerirán la adopción de precauciones adicionales para controlar la dispersión y la exposición de los trabajadores y el público.

CUADRO 8. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE FILTRACIÓN DE DESECHOS ACUOSOS (cont.)

Consideración	Descripción
Requisitos relacionados con el transporte (explotación del sistema, envíos de desechos, caminos de acceso)	— El sistema suele ser muy fácil de desplazar, ya sea como una unidad integrada montada sobre ruedas o con ayuda de equipo elevador. — La expedición de los sistemas nuevos puede encomendarse a una empresa de transportes. — No hay ningún requisito especial para el transporte.
Modo de uso: procesamiento por lotes o continuo (tipo de sistema, desechos secundarios)	— El sistema puede utilizarse en modo continuo o discontinuo. — En caso de procesamiento infrecuente por lotes, los medios pueden deteriorarse con el tiempo. — Se recomienda consultar con el fabricante de los medios las frecuencias adecuadas de sustitución en caso de procesamiento continuo y por lotes.
Costo: arreglos contractuales (arriendo/compra); instalación periódica (mensual/anual/por campañas/por volumen); artículos fungibles; personal; retirada y disposición final del equipo; expedición; disposición final de los desechos	En general, los sistemas son baratos (menos de 10 000 dólares de los Estados Unidos para una configuración con una sola carcasa y bomba), y la compra suele ser la opción más eficaz en relación con el costo. Sin embargo, para un solo uso o para un uso muy infrecuente, debería considerarse la opción del arriendo para una campaña.
Configuración del sistema (móvil o montado sobre plataforma)	Ambas son posibles.
Superficie en la base o tamaño físico del sistema móvil (dimensiones máximas, espacio para la manipulación/sustitución/ reparación de los medios)	Una configuración con una sola carcasa y una sola bomba requiere <4 m ² para la plataforma, más el acceso para la sustitución. Una superficie óptima más típica es de 10 m ² .
Peso total (carga de los pisos y movimientos)	<770 kg con blindaje (con filtros de hasta 0,20 Sv/h).
Personal requerido (número de operadores, personal por contrata, cualificaciones técnicas, operaciones, seguridad física, mantenimiento)	Un operador, cuando sea necesario para poner en marcha y parar el sistema y para evaluar las diferencias de presión (la frecuencia varía según los requisitos o la tasa de aumento prevista de cada emplazamiento).
Capacidad y rendimiento máximos u óptimos, factor de descontaminación y reducción de volumen	Varían según la aplicación; los caudales típicos van de 1 L/min a más de 2000 L/min.
Necesidades de espacio (zona de almacenamiento de artículos fungibles, espacio de aparcamiento transitorio y almacenamiento de desechos)	— El espacio requerido para los medios varía según el tipo. — Un elemento de cartucho ocupa normalmente un volumen de entre 0,01 y 0,1 m³.
Lista de los artículos fungibles necesarios para el proceso (medios, contenedores, piezas, productos químicos)	— Medios de filtración; — Diafragma para las partes accionadas por aire.
Necesidades de servicios generales (aire, agua, vapor, electricidad, ventilación)	— Aire exento de vapor de agua para la opción de la bomba neumática; — 220 V, CA, para una bomba eléctrica típica; — Puede requerirse agua de lavado limpia para el lavado a fondo de la carcasa tras la extracción de los elementos gastados.

CUADRO 8. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE FILTRACIÓN DE DESECHOS ACUOSOS (cont.)

Consideración	Descripción
Equipo de manipulación para la colocación, el procesamiento, y la manipulación y el embalaje de los desechos (grúas, horquillas elevadoras, capacidad de carga)	— Módulo sobre ruedas, horquilla elevadora o carretilla de mano, según el tamaño; — Puede ser necesaria una grúa de pequeña capacidad para los lugares de difícil acceso.
Requisitos generales de seguridad industrial y radiológica (barreras, protección respiratoria, monitorización de la exposición del personal, controles de la contaminación, monitorización del aire)	— Barreras radiológicas para controlar el acceso al equipo durante el uso y después de este; — Zona de control de la contaminación para la sustitución de los medios gastados; — Ropa protectora de recambio para el personal, por lo general de tipo impermeable; — Normalmente no se requieren controles de la contaminación aerotransportada.

4.2.3 Filtración e intercambio iónico

4.2.3.1 Descripción de un sistema típico

En esta sección se examina un sistema móvil de filtración e intercambio iónico desarrollado y utilizado por el Centro Bhabha de Investigaciones Atómicas (BARC), de la India, para el tratamiento de una corriente de desechos alcalina de actividad intermedia (véase la figura 12). El proceso consiste en hacer pasar los desechos acuosos por un cartucho de filtro desechable para eliminar los sólidos en suspensión tras el ajuste en línea del pH, y luego por una serie de tres columnas de intercambio iónico para la extracción de los radionucleidos predominantes [21 a 24]. Las dos primeras columnas de intercambio iónico contienen una resina de policondensado de resorcinol-formaldehído (RPRF) específica para el ^{137}Cs , y la tercera, una resina de ácido iminodiacético (AID) específica para el ^{90}Sr . El efluente atraviesa una trampa de resina y es monitorizado y encaminado hacia otro tratamiento, si es necesario, para la descarga ulterior. Después de la carga, la actividad es eluida en un pequeño volumen de ácido nítrico diluido, y la resina se regenera con hidróxido de sodio para un nuevo uso. De este modo, un mismo relleno de resina puede utilizarse en múltiples ciclos de carga-elución-regeneración antes de que se degrade y deba remplazarse por otro nuevo. La actividad eluida se almacena para el acondicionamiento ulterior o la recuperación del ^{137}Cs , según sea necesario. El sistema de tratamiento por intercambio iónico se encuentra sobre un remolque de 10 m, listo para ser conectado y utilizado en el emplazamiento, donde habrá que instalar una sala de control y conexiones para la preparación de productos químicos junto al sistema móvil. El sistema está dotado de equipo de monitorización radiológica y de instrumentos para el accionamiento a distancia. Las operaciones de acoplamiento y extracción de las columnas de intercambio iónico se efectúan por control remoto.

4.2.3.2 Descripción de los componentes y elementos

- Unidad de procesamiento blindada:** Las resinas para radionucleidos específicos (RPRF para el ^{137}Cs y AID para el ^{90}Sr) se introducen en columnas de 100 L diseñadas para la sustitución a distancia, conectadas en serie con válvulas y tuberías que permiten la inversión del flujo. Las columnas tienen un blindaje local, y todos los componentes radiactivos se instalan en un recinto blindado para proteger a los operadores contra la radiación.

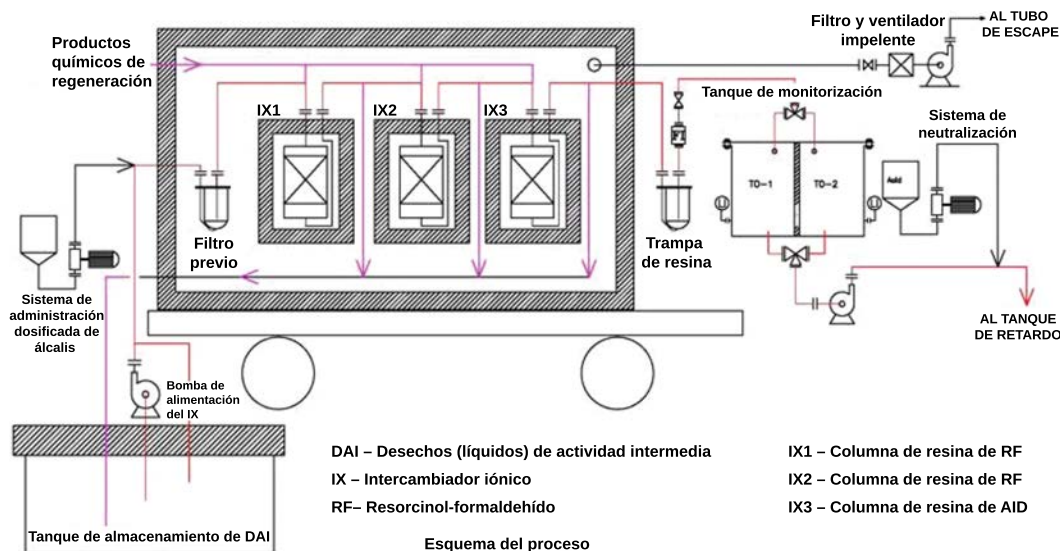


Fig. 12. Sistema móvil de tratamiento por filtración e intercambio iónico (adaptada a partir de una imagen del BARC).

- b) **Mandos de control:** El sistema se acciona a distancia desde una sala de control, que se instala en el emplazamiento junto al remolque móvil. La seguridad de la operación se garantiza con enclavamientos automáticos y todos los avisos correspondientes. Las operaciones por contacto se limitan al mantenimiento, cuando es necesario. Cada turno debe realizar una vez las operaciones de vigilancia radiológica y comprobación del sistema. La consola de control para el movimiento a distancia de las columnas de intercambio iónico se encuentra en el remolque, por fuera del blindaje, en la estación con ventana de blindaje de la radiación.
- c) **Manipulación mecánica:** La manipulación mecánica es necesaria para la retirada o sustitución de las columnas de intercambio iónico, los cartuchos de filtro y los productos químicos. Para ello se utilizan una grúa móvil con una capacidad de 5 t y una horquilla elevadora con una capacidad de 2 t.
- d) **Canalización, monitorización y tratamiento de los efluentes gaseosos:** El recinto blindado se mantiene a presión negativa, con hasta 10 renovaciones de aire por hora, y el aire pasa por filtros previos y filtros HEPA antes de la descarga. Los efluentes líquidos se monitorizan por muestreo y se canalizan hacia el tratamiento ulterior (precipitación química, si las características del desecho así lo exigen), la dilución y la descarga.

4.2.3.3 Ventajas particulares del sistema

- Simple de instalar, conectar y utilizar;
- Ningún límite preestablecido de los volúmenes de desechos que se pueden tratar;
- Alto rendimiento en los factores de descontaminación, la reducción de volumen y la descarga de efluentes (separación de radionucleidos específicos en una serie de columnas de intercambio iónico);
- Bajos volúmenes de desechos secundarios, con opciones sencillas de disposición final;
- Descarga del aire de la zona de procesamiento radiactivo a través del módulo de filtros HEPA;
- Bajo costo;
- Poco mantenimiento;
- Baja exposición del personal;
- Fácil de descontaminar y de retirar del emplazamiento.

4.2.3.4 Limitaciones particulares del sistema

- El sistema móvil está diseñado para resinas que actúan selectivamente sobre determinados radionucleidos, y puede tener que ser rediseñado en función de las características de los desechos entrantes.
- El sistema móvil está diseñado para operar a temperaturas de entre 10 y 40 °C. Para el transporte y funcionamiento en regiones de temperaturas más bajas será necesario remodelarlo.
- El blindaje está limitado por la capacidad del remolque, y optimizado para el tipo de desechos que se procesará. Durante los ciclos de elución se requerirá un permiso de trabajo especial para controlar los movimientos del personal cuando se trate de desechos de actividad más alta.

4.2.3.5 Principales consideraciones para el estudio técnico

Las principales consideraciones para el estudio técnico de los sistemas de filtración e intercambio iónico se recogen en el cuadro 9.

CUADRO 9. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE FILTRACIÓN E INTERCAMBIO IÓNICO

Consideración	Descripción
Características de los desechos y materiales tratados (volumen, tipo, actividad, forma)	— Desechos acuosos, volúmenes de pequeños a muy grandes; — Selección de las resinas según los desechos entrantes; — Típicamente para una actividad de hasta 1,85 MBq/ml, con una alta proporción de ¹³⁷Cs; — Desechos líquidos transferibles a la unidad móvil por bombeo.
Características de los desechos secundarios generados por el proceso (volumen, tipo, actividad, forma)	— Columnas de intercambio iónico, cartuchos de filtro, soluciones de depuración; — Desechos secundarios de baja actividad que requieren un tratamiento químico ulterior; — Sólidos que se pueden enterrar en zanjas en una instalación de disposición final cerca de la superficie; — Efluentes que deben monitorizarse antes de ser encaminados hacia el tratamiento ulterior y la descarga.
Características del cuerpo de desechos final (tipo de contenedor, actividad, forma)	— Desechos líquidos concentrados destinados al almacenamiento o al acondicionamiento ulterior; — Actividad específica hasta 12 veces superior a la de los desechos entrantes.
Consideraciones jurídicas y reglamentarias (nacionales, locales, internacionales, licencias, explotación, movimientos y transporte de desechos)	— Consideraciones relacionadas con la reglamentación nacional; — Obtención de la licencia: nivel de dificultad moderado.
Requisitos relacionados con el transporte (explotación del sistema, envíos de desechos, caminos de acceso)	— Ningún movimiento de desechos fuera del emplazamiento; — Remolque con rampa; — Camión para el desplazamiento de los tanques y los productos químicos de la sala de control.
Modo de uso: procesamiento por lotes o continuo (tipo de sistema, desechos secundarios)	— Procesamiento continuo hasta la sustitución de las resinas; — Los desechos líquidos secundarios se recogerán en tanques antes del tratamiento y la descarga.

CUADRO 9. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE FILTRACIÓN E INTERCAMBIO IÓNICO (cont.)

Consideración	Descripción
Costo: arreglos contractuales (arriendo/compra); instalación periódica (mensual/anual/por campañas/por volumen); artículos fungibles; personal; retirada y disposición final del equipo; expedición; disposición final de los desechos	— Costo bajo en comparación con una instalación fija; — Campañas periódicas; — Arriendo o compra; — Fácil de instalar; — Resinas de intercambio iónico y cartuchos de filtro fáciles de conseguir; — Requiere personal capacitado y cualificado; — En general, no requiere competencias o conocimientos especializados; — Fácil de limpiar, dismantelar y retirar; — Transportable en remolques y camiones.
Configuración del sistema (móvil o montado sobre plataforma)	— La que se describe aquí es la configuración móvil. — La configuración sobre una plataforma es otra posibilidad.
Superficie en la base o tamaño físico del sistema móvil (dimensiones máximas, espacio para la manipulación/sustitución/ reparación de los medios)	— Típicamente, montado en un remolque de 10 m de largo, con una altura de 5 m. — Este sistema está montado de forma permanente en un remolque. — También puede diseñarse para el montaje en una plataforma.
Peso total (carga de los pisos y movimientos)	— El peso del sistema dependerá de los niveles de actividad que se deban tratar y del blindaje requerido para el funcionamiento seguro. — Peso: ~30 t.
Personal requerido (número de operadores, personal por contrata, cualificaciones técnicas, operaciones, seguridad física, mantenimiento)	— Fácil de manejar, requiere personal cualificado; — Tres personas por turno; — Personal de operación y mantenimiento y un físico sanitario.
Capacidad y rendimiento máximos u óptimos, factor de descontaminación y reducción de volumen	— Rendimiento óptimo: 400 a 500 L/h. — Factores de descontaminación > 10 000 para el ¹³⁷Cs. — Factores de reducción de volumen de 10 a 12 (relación entre el volumen del desecho inicial procesado y el volumen de la solución eluida). — La columna de resina se desecha típicamente después de 10 a 12 ciclos de funcionamiento.
Necesidades de espacio (zona de almacenamiento de artículos fungibles, espacio de aparcamiento transitorio y almacenamiento de desechos)	Superficie de unos 25 m ² , con 5 m de altura, para la sala de control, la preparación de los productos químicos y el almacenamiento de los artículos fungibles.
Lista de los artículos fungibles necesarios para el proceso (medios, contenedores, piezas, productos químicos)	— Resinas de intercambio iónico; — Cartuchos de filtro; — Productos químicos para el ajuste del pH, la elución y la regeneración; — Piezas de recambio tales como obturadores, juntas tóricas y mangueras flexibles.
Necesidades de servicios generales (aire, agua, vapor, electricidad, ventilación)	— Energía eléctrica: 5 kW para los ventiladores, el alumbrado, el control y la monitorización de la seguridad. — Los requisitos de ventilación dependerán del emplazamiento que acoja el sistema: el sistema y las tuberías de transferencia deben mantenerse en un rango de temperaturas de 25 a 30 °C. — Aire comprimido para el funcionamiento de las bombas y válvulas: 300 m³/h a 0,6 MPa.

CUADRO 9. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE FILTRACIÓN E INTERCAMBIO IÓNICO (cont.)

Consideración	Descripción
Equipo de manipulación para la colocación, el procesamiento, y la manipulación y el embalaje de los desechos (grúas, horquillas elevadoras, capacidad de carga)	— El equipo de manipulación requerido localmente consiste en grúas para la extracción de las columnas de intercambio iónico blindadas (5 t) y horquillas elevadoras para el desplazamiento de los productos químicos.
Requisitos generales de seguridad industrial y radiológica (barreras, protección respiratoria, monitorización de la exposición del personal, controles de la contaminación, monitorización del aire)	— Barreras durante la elución de las columnas de intercambio iónico cargadas. — Monitorización del personal: dosímetro termoluminiscente. — Puede requerirse una monitorización periódica de física sanitaria. — Monitores γ de zona y monitores de aire continuos. — Controles de la contaminación según los requisitos del emplazamiento.

4.2.4 Filtración, membrana e intercambio iónico

4.2.4.1 Descripción de un sistema típico

El sistema móvil modular Aqua-Express fue diseñado por MosNPO Radon, de la Federación de Rusia, para el tratamiento de desechos radiactivos líquidos de actividad baja e intermedia (DABI). El sistema está concebido para su aplicación en centros de investigación de pequeños a medianos y en otras organizaciones en que la generación de aguas residuales de actividad baja e intermedia es bastante reducida (de hasta 500 m³/año) [25, 26]. El tratamiento se efectúa a lo largo de una cadena tecnológica que incluye procesos de filtración, sorción y ultrafiltración, y que libera las sales no radiactivas junto con el agua depurada. El sistema consta de tres módulos autónomos de purificación de aguas residuales y un sistema de muestreo (véase la figura 13). Puede transportarse por carretera, ferrocarril o aire, e instalarse en un contenedor ISO estándar.

4.2.4.2 Descripción de los componentes y elementos

El esquema del proceso actual, ilustrado en la figura 14 [26], comprende un contenedor filtrante, un módulo de filtración y un módulo de ultrafiltración.

El diagrama del proceso del sistema puede dividirse en los siguientes elementos, que corresponden a diferentes etapas de la purificación del agua: un contenedor filtrante con un sorbente de ferrocianuro, filtros de medios fluidos y un módulo de ultrafiltración. Normalmente, la instalación incluirá también otros módulos de purificación del agua. Pero el sistema básico es adecuado para la purificación de desechos líquidos de baja radiactividad y baja salinidad (inferior a 3 g/L). A continuación se describen los principios del proceso de purificación de Aqua-Express.

El desecho radiactivo líquido inicial, contenido en un tanque de almacenamiento, se hace pasar por bombeo a través del contenedor filtrante, en el que se encuentran un sorbente de ferrocianuro y filtros de medios fluidos. El sorbente de ferrocianuro es sintético (por ejemplo, ferrocianuro de níquel o ferrocianuro de cobre depositado en un gel de sílice) y extrae selectivamente los iones de cesio, incluidos el ¹³⁴Cs y el ¹³⁷Cs, de los desechos líquidos. En muchas corrientes de desechos radiactivos, los isótopos del cesio son los principales emisores γ , por lo que su extracción de la solución en la primera etapa de la purificación ayuda a reducir los niveles de radiación en la zona de la instalación de procesamiento. Los factores de descontaminación referentes a los isótopos del cesio en esta etapa pueden ser de hasta 10 000.



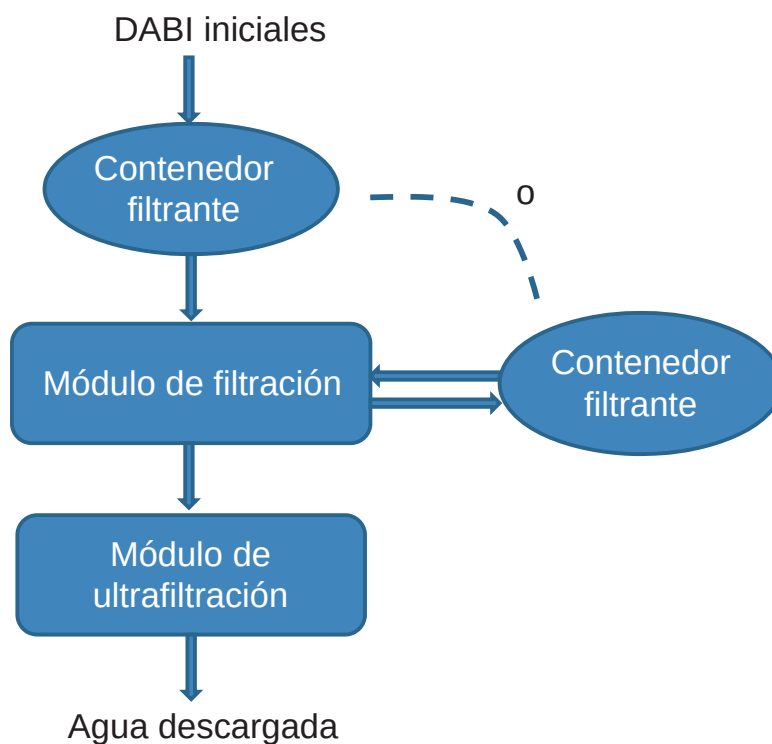
Fig. 13. Instalación de Aqua-Express (cortesía de MosNPO Radon).

La composición de los sorbentes utilizados en los filtros de medios fluidos dependerá de la composición de los desechos radiactivos líquidos y se determinará a partir de los análisis químicos y radioquímicos preliminares. Este es el paso de extracción de radionucleidos más importante en el proceso de purificación. Por lo tanto, la selección de los sorbentes debe correr a cargo de expertos en el tratamiento de aguas radiactivas.

Tras el tratamiento de extracción de radionucleidos con sorbentes, los desechos líquidos se dirigen hacia el tanque de alimentación del módulo de ultrafiltración, donde son bombeados a través del ‘aparato de ultrafiltración del tanque’ a una presión de entre 0,2 y 0,3 MPa. El tamaño de los poros de la membrana no supera el intervalo de 50 a 100 nm. Después de esta etapa, el agua está completamente depurada y exenta de sólidos en suspensión, coloides y moléculas poliméricas. La tecnología de ultrafiltración purifica el agua extrayendo los radionucleidos, que se integran con partículas en suspensión de tamaño submicrométrico y con los productos resultantes de la abrasión de los sorbentes. Estos últimos son especialmente importantes cuando se utilizan sorbentes naturales (por ejemplo, clinoptilolita, chabasita y bentonita) y carbones activados. Los factores de descontaminación de la última etapa varían entre 1 y 10, según la relación de partículas submicrométricas en suspensión en la corriente de desechos líquidos y su grado de arrastre a través de los filtros de medios fluidos.

Cuando se deban tratar desechos radiactivos líquidos con altas concentraciones de productos oleosos o sólidos en suspensión, se recomienda utilizar un filtro de medios fluidos antes del tratamiento por sorción y ultrafiltración. Para ello pueden emplearse, por ejemplo, materiales hidrófobos y sintéticos fibrosos y en capas, arena o arcilla expandida triturada, y carbón activado o antracita molida. En este caso, el contenedor filtrante se conectará al módulo de filtración entre el primer y el segundo filtro (véase la figura 14).

Durante el funcionamiento del contenedor filtrante y de los filtros de medios fluidos, se recomienda extraer periódicamente los gases que se acumulen en la parte superior de los filtros, y utilizar la inversión del flujo de agua (lavado a contracorriente) para aflojar la carga de los filtros.



DABI: desechos de actividad baja e intermedia

Fig. 14. Esquema del proceso de la instalación de Aqua-Express.

4.2.4.3 Ventajas particulares del sistema

- Simple de instalar, conectar y utilizar;
- Ningún límite preestablecido de los volúmenes de desechos que se pueden tratar;
- Alto rendimiento en los factores de descontaminación y la descarga de efluentes (separación de radionucleidos específicos en una serie de columnas de intercambio iónico y por ultrafiltración);
- Buen nivel total de reducción de volumen, también de los desechos secundarios radiactivos;
- Bajo costo;
- Poco mantenimiento;
- Bajas tasas de dosis para el personal;
- Fácil de descontaminar y de retirar del emplazamiento.

4.2.4.4 Limitaciones particulares del sistema

- La instalación móvil modular está diseñada actualmente para operar a temperaturas de entre 10 y 40 °C. Para el transporte y funcionamiento en regiones de temperaturas más bajas, será necesario modificarla.
- El sistema utiliza diversos sorbentes para distintos radionucleidos. En cada caso particular, deberán seleccionarse los sorbentes adecuados.
- El sistema (con la excepción del contenedor filtrante) no tiene ningún blindaje biológico. Por consiguiente, solo se pueden procesar desechos líquidos de actividad baja. Si el líquido contiene únicamente isótopos del cesio, el contenedor filtrante deberá ser remplazado tras la carga de 7,4 GBq de cesio.

- La instalación móvil modular no tiene ningún sistema de acondicionamiento de los desechos secundarios radiactivos. Por lo tanto, las membranas y los sorbentes gastados deberán embalarse y transportarse a otras instalaciones para el acondicionamiento.
- Si se emplea la ósmosis inversa (en esta u otras aplicaciones parecidas) en lugar de la ultrafiltración, se aplican las siguientes limitaciones: deberá efectuarse un cuidadoso control y caracterización de los desechos entrantes; puede ser necesario un tratamiento químico previo de esos desechos; la compleja tecnología exigirá la presencia de un operador capacitado y con conocimiento del proceso; se necesitará el apoyo de un técnico con conocimientos especializados de química y de la membrana de ósmosis inversa; el tamaño de la unidad puede ser grande; el costo inicial será superior al de la mayoría de las otras opciones de procesamiento.

4.2.4.5 Principales consideraciones para el estudio técnico

Las principales consideraciones para el estudio técnico de los sistemas de filtración, membrana e intercambio iónico (Aqua-Express) se recogen en el cuadro 10.

CUADRO 10. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE FILTRACIÓN, MEMBRANA E INTERCAMBIO IÓNICO

Consideración	Descripción
Características de los desechos y materiales tratados (volumen, tipo, actividad, forma)	— Hasta 500 m³/año, DABI líquidos. — Actividad γ total: hasta 1×10^6 Bq/L; principales contaminantes: ¹³⁴Cs y ¹³⁷Cs, ^{110m}Ag, ¹⁴⁰Ba, productos de corrosión. — Actividad β total: predominantemente ⁹⁰Sr (100 a 1000 Bq/L). — Actividad α total: 100 a 300 Bq/L. — pH de 1 a 10. — Salinidad moderada (1 a 10 g/L), puede ser algo más alta en casos especiales. — Si se utiliza la ósmosis inversa, se requerirá un material de entrada de calidad relativamente alta.
Características de los desechos secundarios generados por el proceso (volumen, tipo, actividad, forma)	El tratamiento de 500 m³ de desechos líquidos genera los siguientes desechos secundarios: — Cinco contenedores de filtros (0,2 m³): actividad total de hasta 8×10^8 Bq. — 15 bidones metálicos estándar con sorbentes granulados o arena (volumen total <0,6 m³): actividad específica de hasta 3×10^6 Bq/L. — Un elemento de ultrafiltración en espiral (0,1 m³): sin actividad significativa. — Membranas, si se emplea la ósmosis inversa.
Características del cuerpo de desechos final (tipo de contenedor, actividad, forma)	— Contenedor filtrante (bidón metálico estándar hormigonado); — Puede ser acondicionado por hormigonado antes o después del transporte (volumen total <0,6 m³).
Consideraciones jurídicas y reglamentarias (nacionales, locales, internacionales, licencias, explotación, movimientos y transporte de desechos)	— Reglamentación local, regional y nacional (Federación de Rusia: Normas de seguridad radiológica NRB-99).
Requisitos relacionados con el transporte (explotación del sistema, envíos de desechos, caminos de acceso)	— Camiones pequeños; — Otras variantes: contenedor de transporte o cajas de embalaje y mecanismos elevadores.

CUADRO 10. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE FILTRACIÓN, MEMBRANA E INTERCAMBIO IÓNICO (cont.)

Consideración	Descripción
Modo de uso: procesamiento por lotes o continuo (tipo de sistema, desechos secundarios)	— El sistema puede utilizarse para el procesamiento continuo de hasta 100 m³ de desechos líquidos. — La duración del procesamiento está dada por la vida útil de los medios.
Costo: arreglos contractuales (arriendo/compra); instalación periódica (mensual/anual/por campañas/por volumen); artículos fungibles; personal; retirada y disposición final del equipo; expedición; disposición final de los desechos	— Costo inicial de instalación: ~80 000 dólares de los Estados Unidos; — El costo del tratamiento de 1 m³ de desechos radiactivos líquidos puede llegar a 500 dólares (típicamente se sitúa entre 100 y 200 dólares); — El costo de la disposición del desecho final varía en los diferentes Estados, pudiendo ser superior a 10 000 dólares para 1 m³. — Si se utiliza la ósmosis inversa, los costos del sistema serán más altos.
Configuración del sistema (móvil o montado sobre plataforma)	— Por lo general, montado sobre plataforma; — Para la configuración móvil, el sistema puede instalarse en un camión pequeño.
Superficie en la base o tamaño físico del sistema móvil (dimensiones máximas, espacio para la manipulación/sustitución/ reparación de los medios)	— <10 m² para la ultrafiltración, normalmente más del doble para la ósmosis inversa.
Peso total (carga de los pisos y movimientos)	— <1500 kg para la ultrafiltración.
Personal requerido (número de operadores, personal por contrata, cualificaciones técnicas, operaciones, seguridad física, mantenimiento)	— Funcionamiento: una o dos personas (por lo menos un experto en química). — Mantenimiento: dos técnicos (un mecánico y un electricista).
Capacidad y rendimiento máximos u óptimos, y reducción de volumen	— 0,5 m³/h (valor óptimo: 0,3 m³/h); — Reducción de volumen en no menos de 100 veces. Para la ósmosis inversa: — La capacidad depende de la aplicación, pudiendo ser de solo 1 L/min o superior a 200 L/min; — Los límites están dados por el número de etapas, la presión de trabajo, las características de los desechos entrantes y el efluente que se pretende obtener; — Los factores de descontaminación típicos varían comúnmente de 1000 a 10 000.
Necesidades de espacio (zona de almacenamiento de artículos fungibles, espacio de aparcamiento transitorio y almacenamiento de desechos)	— <20 m².
Lista de los artículos fungibles necesarios para el proceso (medios, contenedores, piezas, productos químicos)	Por cada 500 m³ de desechos líquidos: — 16 bidones metálicos estándar; — 5 contenedores filtrantes; — 10 kg de AEDT o equivalente (ácido oxálico); — 50 kg de NaOH; — 40 L de HNO₃ 12N; — 10 kg de ácido cítrico.

CUADRO 10. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE FILTRACIÓN, MEMBRANA E INTERCAMBIO IÓNICO (cont.)

Consideración	Descripción
Necesidades de servicios generales (aire, agua, vapor, electricidad, ventilación)	— Energía eléctrica: 220 V, CA, 50 Hz, 3 kW. — Agua: <0,2 m³ para 500 m³ de desechos radiactivos líquidos descontaminados. Con ósmosis inversa: — Energía eléctrica: 220 V, trifásica, 50 A, 60 Hz. — Agua: desmineralizada, 110 L/h, dos líneas, 1,0 y 0,5 MPa. — Aire: 100 m³/h, 0,4 MPa. — CVAC: respiraderos conectados al sistema de CVAC de la planta.
Equipo de manipulación para la colocación, el procesamiento, y la manipulación y el embalaje de los desechos (grúas, horquillas elevadoras, capacidad de carga)	— Horquilla elevadora o grúa, si el sistema se transporta en un contenedor o en cajas (peso de cada módulo <800 kg). — Para el funcionamiento: contenedores filtrantes y bidones de sorbentes desechables (peso <400 kg). — Sistema de ósmosis inversa: grúa con una capacidad <25 t.
Requisitos generales de seguridad industrial y radiológica (barreras, protección respiratoria, monitorización de la exposición del personal, controles de la contaminación, monitorización del aire)	— Ningún requisito de seguridad especial; — Monitorización radiológica en puntos seleccionados en torno a la instalación; — Controles radiológicos y de la contaminación, según los requisitos del emplazamiento en cuestión.

Nota: DABI — desechos de actividad baja e intermedia; AEDT — ácido etilendiaminotetraacético; CVAC — calefacción, ventilación y aire acondicionado.

4.2.5 Intercambio iónico selectivo en un sistema de extracción de nucleidos

4.2.5.1 Descripción de un sistema típico

Fortum Nuclear Services, de Finlandia, ha construido y explota un sistema móvil de extracción de nucleidos (NURES) que puede adaptarse a diferentes necesidades, en una configuración ya sea fija o móvil. Debido a su flexibilidad, las unidades móviles pueden ser diferentes de caso en caso (véase la figura 15).

El NURES puede utilizarse para el tratamiento de diferentes líquidos, incluidos los que tienen altas concentraciones de sales. El sistema se ha empleado para líquidos con concentraciones totales de sales de hasta 300 g/L, y se ha ensayado con hasta 400 g/L. El primer elemento del proceso es una eficiente unidad de filtración que elimina las partículas radiactivas en suspensión. En el paso siguiente se extraen determinados radionucleidos de la radiactividad iónica mediante materiales de intercambio iónico muy selectivos.

Se han utilizado tres materiales inorgánicos de intercambio iónico muy selectivos [27]. CsTreat fue diseñado de modo que tuviera la máxima selectividad posible para el cesio, con $k_{\text{Cs/Na}} = 1\,500\,000$ y $k_{\text{Cs/K}} = 50\,000$, y una capacidad de intercambio iónico muy buena, de 0,35 meq/g. En la figura 16 se comparan los valores de K_d de CsTreat con los de otros medios típicos.

En un sistema móvil, CsTreat se utiliza típicamente en forma granulada, en columnas. Se han empleado columnas de entre menos de 1 L y 250 L en sistemas fijos, y de 12 L en sistemas móviles. Además, se han desarrollado SrTreat, que extrae el estroncio, y CoTreat, que extrae el cobalto y otros productos de corrosión. SrTreat es muy selectivo y elimina el estroncio de las soluciones alcalinas. Este producto tiene un alto factor de selectividad con respecto al sodio ($k_{\text{Sr/Na}} = 200\,000$), pero es sensible al calcio y al pH.

SrTreat se ha utilizado con éxito para el tratamiento de líquidos de reprocesamiento y de líquidos de buques rompehielos nucleares, y se ha puesto a prueba con los desechos líquidos de los tanques de los emplazamientos de Hanford y Savannah River del Departamento de Energía de los Estados Unidos.

La extracción del cobalto ha sido siempre uno de los mayores retos en las centrales nucleares. Para esta operación se ha desarrollado CoTreat, que es 100 % inorgánico. CoTreat ha conseguido extraer eficientemente el cobalto y otros productos de corrosión del agua de drenaje del piso de las centrales

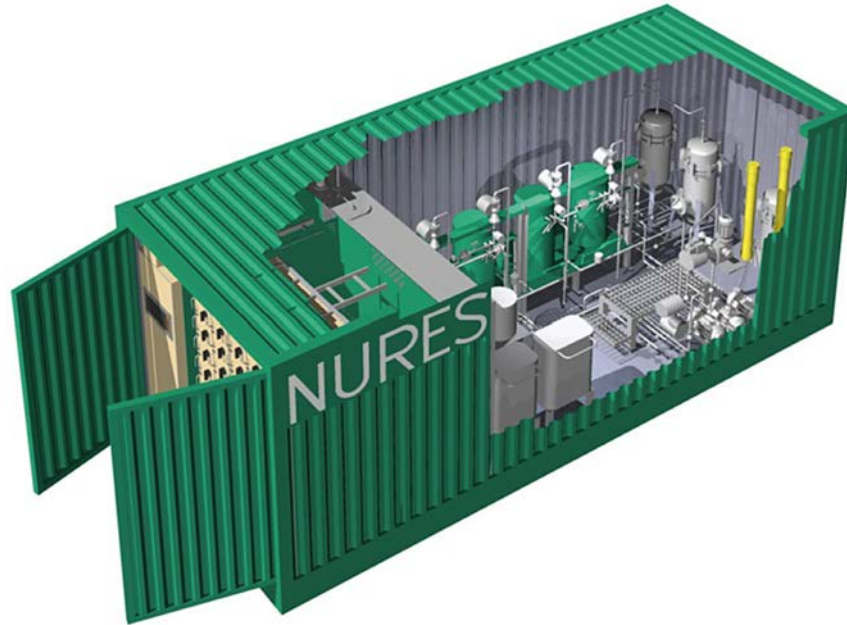
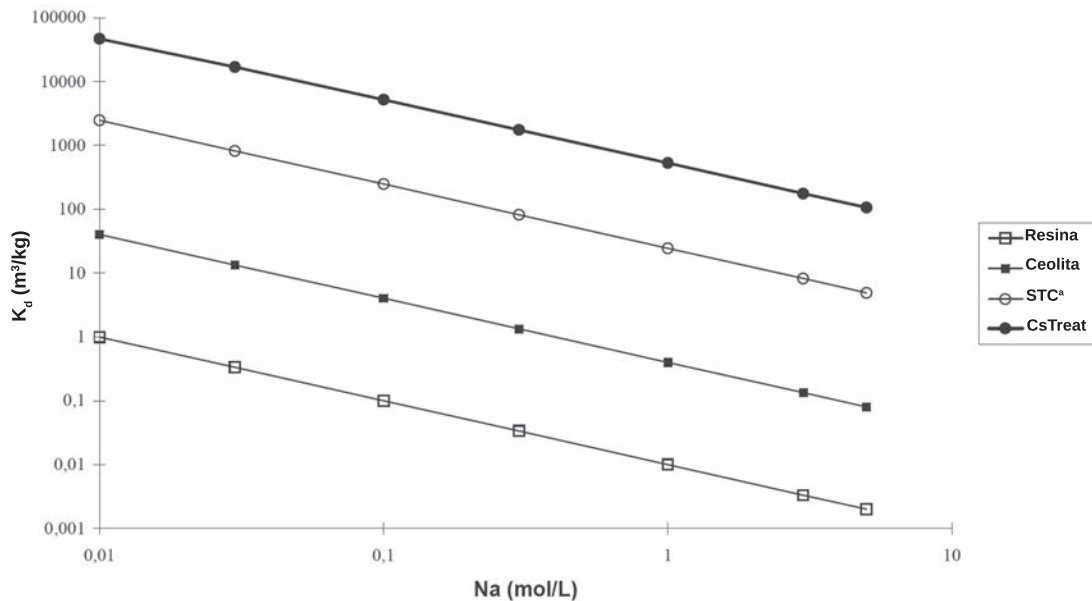


Fig. 15. Disposición típica del NURES móvil en un contenedor estándar de 6 m (cortesía de Fortum Nuclear Services).



^a Silicotitanato cristalino

Fig. 16. Comparación de los valores de K_d de CsTreat (imagen tomada de la referencia [27]).

nucleares en pruebas de laboratorio, alcanzando factores de descontaminación de hasta 1000 y capacidades de procesamiento superiores a 50 m³/kg, incluso en aguas de alta conductividad. Inicialmente, CoTreat fue desarrollado para extraer el cobalto iónico, pero luego se observó que al mismo tiempo se podían eliminar también varios otros productos de corrosión.

Actualmente está en fase de demostración un material nuevo para la extracción del antimonio. El antimonio causa alrededor de la mitad de la exposición a la radiación durante las paradas en la central nuclear de Loviisa, en Finlandia. Los resultados de las primeras pruebas indican que este medio puede reducir el antimonio y la tasa de dosis.

4.2.5.2 Descripción de los componentes y elementos

La etapa de la filtración incluye por lo menos dos fases de filtración mecánica de las partículas. Antes de la filtración, puede ser útil emplear un lecho de carbón activo para extraer los compuestos orgánicos (principalmente aceites). Los tamaños de los filtros pueden seleccionarse en función de la corriente de desechos de que se trate, pero por lo general se utilizan filtros de 1 µm y 0,45 µm. El empleo de un filtro de 0,1 µm en la segunda fase producirá una depuración aún mayor.

En un sistema móvil, el material de intercambio iónico selectivo se utiliza de forma particulada. El tamaño típico de una columna es de 12 L, pero pueden instalarse varias columnas en paralelo para aumentar la capacidad del sistema.

4.2.5.3 Ventajas particulares del sistema

- El NURES tiene una configuración flexible y puede adaptarse a muchas aplicaciones diferentes.
- Puede ser un sistema completamente automático e independiente, en un emplazamiento en que no haya ningún sistema de tratamiento instalado, o ser un módulo de una unidad de tratamiento más grande.
- Es muy simple de instalar y utilizar.
- Sus dimensiones pueden ser pequeñas, gracias a la alta selectividad del material de intercambio iónico.
- Sus factores de descontaminación muy altos permiten descargar un líquido purificado.
- Su alta selectividad y capacidad de extracción de nucleidos específicos dan factores de reducción de volumen elevados.
- Es muy fácil de mantener.
- Es fácil de descontaminar y de desmovilizar.

4.2.5.4 Limitaciones particulares del sistema

- Los materiales inorgánicos en forma granulada solo permiten caudales moderados. Típicamente, una columna de 12 L da un caudal de procesamiento de entre 120 y 240 L/h. El uso de columnas en paralelo o de materiales en polvo contenidos en cartuchos puede aumentar la capacidad.
- El líquido entrante puede contener radionucleidos que limiten la descarga del líquido después de la extracción del cesio, el estroncio, el cobalto u otros productos de corrosión. En estos casos, es necesario añadir otras fases al sistema, o reciclar el líquido en lugar de descargarlo.

4.2.5.5 Principales consideraciones para el estudio técnico

Las principales consideraciones para el estudio técnico del intercambio iónico selectivo en el NURES se recogen en el cuadro 11.

CUADRO 11. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DEL INTERCAMBIO IÓNICO SELECTIVO EN EL NURES

Consideración	Descripción
Características de los desechos y materiales tratados (volumen, tipo, actividad, forma)	— Desechos líquidos de actividad baja e intermedia con concentraciones de sales de hasta 400 g/L; — Para la extracción del Cs, pH de 1 a 13 en los líquidos con altas concentraciones de sales, y de 2 a 12 en los de bajas concentraciones de sales; para el Sr, pH >9 (en algunos casos >7); para el Co y los productos de corrosión, pH de 6 a 8.
Características de los desechos secundarios generados por el proceso (volumen, tipo, actividad, forma)	— Medios de filtración y de intercambio iónico; — El volumen depende de las características del líquido de entrada.
Características del cuerpo de desechos final (tipo de contenedor, actividad, forma)	— Actividad específica hasta miles de veces superior a la del líquido de entrada. — Columnas de intercambio iónico: 100 % inorgánicas. — Material de intercambio iónico normalmente en forma granulada, con tamaños de grano de 0,30 a 0,85 mm (hay otros tamaños disponibles). — La disposición final puede efectuarse purgando las columnas y colocándolas en contenedores de hormigón, o extrayendo los medios y acondicionándolos.
Consideraciones jurídicas y reglamentarias (nacionales, locales, internacionales, licencias, explotación, movimientos y transporte de desechos)	— Pueden aplicarse requisitos locales, regionales o nacionales. — Ninguna dificultad particular para la obtención de la licencia.
Requisitos relacionados con el transporte (explotación del sistema, envíos de desechos, caminos de acceso)	— El sistema móvil puede transportarse fácilmente en un camión. — Durante las operaciones, los materiales gastados se transportan con un montacargas de horquilla, una carretilla de mano o un mecanismo elevador.
Modo de uso: procesamiento por lotes o continuo (tipo de sistema, desechos secundarios)	— El procesamiento puede ser continuo o por lotes; — El NURES móvil puede incluir un sistema de control totalmente automatizado para el funcionamiento a tiempo completo, con paradas automáticas en caso de saturación, sobrepresión o fallo.
Costo: arreglos contractuales (arriendo/compra); instalación periódica (mensual/anual/por campañas/por volumen); artículos fungibles; personal; retirada y disposición final del equipo; expedición; disposición final de los desechos	— Costo bajo en comparación con un sistema fijo o con otras soluciones, como la solidificación de líquidos; — El sistema se utiliza típicamente en campañas periódicas; — Puede arrendarse o comprarse, y las columnas y los cartuchos están disponibles con tiempos de entrega razonables; — El personal de operación recibe capacitación; — El sistema puede transportarse en camiones normales; — Es fácil de instalar, limpiar y retirar; — La disposición final de las columnas y los cartuchos se efectúa en contenedores que deberá proporcionar el emplazamiento en cuestión.
Configuración del sistema (móvil o montado sobre plataforma)	El sistema puede ser móvil o estar montado sobre una plataforma.
Superficie en la base o tamaño físico del sistema móvil (dimensiones máximas, espacio para la manipulación/sustitución/ reparación de los medios)	Típicamente 15 m ² , pero la superficie necesaria depende de los requisitos de cada caso particular.

CUADRO 11. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DEL INTERCAMBIO IÓNICO SELECTIVO EN EL NURES (cont.)

Consideración	Descripción
Peso total (carga de los pisos y movimientos)	Típicamente entre 20 y 30 t: el blindaje aumentará el peso.
Personal requerido (número de operadores, personal por contrata, cualificaciones técnicas, operaciones, seguridad física, mantenimiento)	— Un operador: la frecuencia de la supervisión dependerá de los requisitos del emplazamiento en cuestión. — Sustitución de las columnas y los cartuchos según sea necesario; un operador cualificado, y otra persona para el cambio de las columnas y los cartuchos.
Capacidad y rendimiento máximos u óptimos, factor de descontaminación y reducción de volumen	— Caudal: 10 a 20 volúmenes de lecho por hora. — Factores de descontaminación típicamente $> > 1000$ para el Cs y el Sr, y de 10 a 1000 para el Co y los productos de corrosión. — Capacidad: miles de m³ con 1 kg de material de intercambio iónico. — Factor de reducción de volumen: como relación del líquido generado y el material de intercambio iónico, puede ser de decenas de miles; > 1000 para el cuerpo destinado a la disposición final.
Necesidades de espacio (zona de almacenamiento de artículos fungibles, espacio de aparcamiento transitorio y almacenamiento de desechos)	Una sala de almacenamiento para los contenedores del desecho final y su manipulación, típicamente de entre 10 m ² y 15 m ² .
Lista de los artículos fungibles necesarios para el proceso (medios, contenedores, piezas, productos químicos)	— Columnas de intercambio iónico para la extracción de radionucleidos iónicos. — Medios de filtración según las especificaciones de la corriente de alimentación. — Típicamente, un contenedor de hormigón de 1 m³ tiene cabida para entre 7 y 12 columnas gastadas. — Un contenedor para la recogida de las columnas y el carbono, otro para los cartuchos gastados. — El tipo dependerá de los requisitos del emplazamiento en cuestión.
Necesidades de servicios generales (aire, agua, vapor, electricidad, ventilación)	— Energía eléctrica; — Conexiones para el líquido afluente y efluente; — Disposición final de los desechos del muestreo.
Equipo de manipulación para la colocación, el procesamiento, y la manipulación y el embalaje de los desechos (grúas, horquillas elevadoras, capacidad de carga)	— Equipo de manipulación mecánica para la extracción de las columnas de intercambio iónico y los cartuchos de filtro gastados. — Para las columnas puede ser necesario un cofre de transporte blindado. — Un montacargas de horquilla, una carretilla o un simple mecanismo elevador para el transporte del material gastado.
Requisitos generales de seguridad industrial y radiológica (barreras, protección respiratoria, monitorización de la exposición del personal, controles de la contaminación, monitorización del aire)	— Ropa protectora para el personal; — Barreras radiológicas y bermas/muros de protección según los requisitos del emplazamiento en cuestión.

Nota: NURES — NUclide REmoval System (sistema de extracción de nucleidos).

4.2.6 Deshidratación de medios de filtración e intercambio iónico gastados

4.2.6.1 Descripción de un sistema típico

El sistema de deshidratación de autoengranaje (SEDS) introduce una suspensión acuosa que contiene las resinas gastadas y otros medios descartados de consistencia parecida en los contenedores de desechos, y luego extrae el agua. Se utiliza típicamente para las corrientes de desechos con altos campos de radiación que tienen que ser manejadas a distancia. Los contenedores de desechos —conocidos también como contenedores de alta integridad— tienen filtros integrados que separan los materiales sólidos del agua. Una vez posicionados correctamente los componentes del SEDS y el contenedor de deshidratación, la unidad del cabezal llenador se conecta a la manguera de entrada de desechos y a la manguera de salida para el retorno del agua de la suspensión acuosa a la planta. Luego se retira la tapa del contenedor y se desplaza la unidad del cabezal llenador hasta que esté sobre la abertura. El cabezal es capaz de alinearse prácticamente solo con la abertura del contenedor, con un mínimo ajuste manual por parte del operador.

Una vez posicionada, la unidad del cabezal llenador se sella al contenedor, y con una manipulación se efectúan todas las conexiones eléctricas y de deshidratación. A continuación se inicia la transferencia de las resinas y los otros medios desechados en suspensión acuosa al contenedor, a través del cabezal, y se activa la bomba de achique para que devuelva el agua filtrada al sistema de aguas residuales de la instalación. En un punto previamente fijado, el sistema de detección del nivel cerrará la válvula de entrada de desechos para evitar el llenado excesivo del contenedor. La bomba de achique seguirá funcionando para reducir el nivel del agua en el contenedor. Este ciclo se repetirá hasta que se encuentre en el contenedor el volumen correcto de desechos y se haya extraído el agua de la suspensión acuosa en una medida que cumpla con los criterios aplicables para la expedición y la disposición final. La figura 17 muestra una unidad típica instalada sobre un contenedor de alta integridad.

4.2.6.2 Descripción de los componentes y elementos

El agua de la suspensión acuosa es el medio de transporte que transfiere las resinas y los medios de filtración a los contenedores de deshidratación. La extracción del agua de las resinas y los medios de filtración que se encuentran en el contenedor reduce el volumen de desechos y permite cumplir con los criterios para el transporte y la disposición final. Los principales componentes del SEDS son una plataforma con la bomba de achique, la unidad del cabezal llenador, la consola de control, la válvula de regulación de los desechos y el contenedor de deshidratación (véase la figura 18).

4.2.6.3 Ventajas particulares del sistema

- Fácil instalación y retirada;
- Mayor volumen de desechos en el contenedor;
- Sistema de detección del nivel mejorado;
- Sistema de cámara e iluminación mejorado;
- Indicador de nivel mecánico;
- Medición de la temperatura en el infrarrojo.

4.2.6.4 Limitaciones particulares del sistema

- El diseño físico y las dimensiones del sistema de achique deben ser compatibles con el contenedor que deba deshidratar;
- En general no sirve para suspensiones acuosas de partículas finas (como los lodos).



Fig. 17. El SEDS (cortesía de EnergySolutions).



Fig. 18. Principales componentes del SEDS (de izquierda a derecha: consola de control, plataforma con la bomba y unidad del cabezal llenador; cortesía de EnergySolutions).

4.2.6.5 Principales consideraciones para el estudio técnico

Las principales consideraciones para el estudio técnico de los sistemas de deshidratación se recogen en el cuadro 12.

CUADRO 12. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE DESHIDRATACIÓN DE MEDIOS DE FILTRACIÓN E INTERCAMBIO IÓNICO GASTADOS

Consideración	Descripción
Características de los desechos y materiales tratados (volumen, tipo, actividad, forma)	El volumen dependerá del contenedor de desechos, la suspensión acuosa con las resinas o el carbono activado; la actividad dependerá de los criterios y las limitaciones para la disposición final.
Características de los desechos secundarios generados por el proceso (volumen, tipo, actividad, forma)	No se generan desechos secundarios.
Características del cuerpo de desechos final (tipo de contenedor, actividad, forma)	Resina deshidratada apta para el embalaje definitivo y la disposición final autorizada como desecho radiactivo.
Consideraciones jurídicas y reglamentarias (nacionales, locales, internacionales, licencias, explotación, movimientos y transporte de desechos)	El despliegue del sistema no requiere un proceso jurídico o reglamentario complejo.
Requisitos relacionados con el transporte (explotación del sistema, envíos de desechos, caminos de acceso)	Pequeñas jaulas de embalaje o contenedores ISO.
Modo de uso: procesamiento por lotes o continuo (tipo de sistema, desechos secundarios)	Los desechos se depositan por lotes en los contenedores de deshidratación. Si el achique libera más espacio en el contenedor, se añaden más desechos.
Costo: arreglos contractuales (arriendo/compra); instalación periódica (mensual/anual/por campañas/por volumen); artículos fungibles; personal; retirada y disposición final del equipo; expedición; disposición final de los desechos	El equipo puede comprarse o arrendarse como servicio. La movilización, instalación y capacitación son normalmente un gasto no recurrente.
Configuración del sistema (móvil o montado sobre plataforma)	— El cabezal llenador y el soporte son móviles; — La bomba de achique, el panel de control y el aire/agua de servicio están montados en plataformas distintas; — La válvula de regulación de los desechos puede instalarse en los componentes del sistema o en las tuberías de desechos de la planta.
Superficie en la base o tamaño físico del sistema móvil (dimensiones máximas, espacio para la manipulación/sustitución/repación de los medios)	— Cabezal llenador y soporte: ~1 m de diámetro, peso: ~270 kg con el cabezal; — Plataforma de la bomba de achique: alrededor de 0,6 m × 1 m, según los requisitos de la planta; — Panel de control y aire/agua de servicio (adaptables a las necesidades del cliente y separables): ~0,6 m × 1,5 m.
Peso total (carga de los pisos y movimientos)	Cabezal llenador y soporte: 270 kg, plataforma de la bomba: 120 kg, panel de control con el aire/agua de servicio: 145 kg, mangueras y cables: 130 kg (variable).
Personal requerido (número de operadores, personal por contrata, cualificaciones técnicas, operaciones, seguridad física, mantenimiento)	Uno o dos operadores capacitados.

CUADRO 12. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE DESHIDRATACIÓN DE MEDIOS DE FILTRACIÓN E INTERCAMBIO IÓNICO GASTADOS (cont.)

Consideración	Descripción
Capacidad y rendimiento máximos u óptimos, factor de descontaminación y reducción de volumen	No se aplica.
Necesidades de espacio (zona de almacenamiento de artículos fungibles, espacio de aparcamiento transitorio y almacenamiento de desechos)	Mínimas.
Lista de los artículos fungibles necesarios para el proceso (medios, contenedores, piezas, productos químicos)	Medios para el procesamiento líquido, contenedor de desechos y elementos internos, placas de relleno compatibles con el SEDS.
Necesidades de servicios generales (aire, agua, vapor, electricidad, ventilación)	— Aire: 34 m³/h, 0,62 MPa. — Agua: 75 L/min, 0,55 MPa. — Energía eléctrica: 110 V, CA, 20 A. — Presión de diseño: 1,0 MPa. — Ventilación: conexión al sistema de expulsión de gases de la planta o filtro HEPA portátil.
Equipo de manipulación para la colocación, el procesamiento, y la manipulación y el embalaje de los desechos (grúas, horquillas elevadoras, capacidad de carga)	El cabezal llenador incluye una eslinga de izado para su colocación sobre el contenedor de desechos. Durante la instalación inicial se requiere una horquilla elevadora o una grúa para la colocación de las plataformas.
Requisitos generales de seguridad industrial y radiológica (barreras, protección respiratoria, monitorización de la exposición del personal, controles de la contaminación, monitorización del aire)	El sistema se acciona a distancia y no requiere equipo de protección radiológica especial.

Nota: SEDS — sistema de deshidratación de autoengranaje; filtro HEPA — filtro de aire particulado de alta eficiencia.

4.2.7 Secado de desechos líquidos y sólidos húmedos dentro de un bidón

4.2.7.1 Descripción de un sistema típico

El secado térmico dentro de un bidón se utiliza para deshidratar sólidos húmedos contaminados (lodos, resinas, elementos de filtración), concentrados líquidos y soluciones de descontaminación, reduciéndolos a una torta sólida. En la figura 19 se ilustra un sistema típico ofrecido por un proveedor.

La figura 20 muestra el esquema del proceso. Los desechos deshidratados en bidones de 200 L del modelo DOT 17C del Departamento de Transporte de los Estados Unidos pueden almacenarse, manipularse y transportarse de manera segura. El sistema procesa los líquidos contaminados directamente en los tanques o bidones que los contienen. El destilado condensado se muestrea y se descarga o devuelve para el procesamiento como desecho radiactivo, según corresponda. El cabezal de llenado se coloca sobre el bidón de 200 L. En el llenado automático, un sensor de nivel controla el nivel del líquido en el bidón. Un termopar mide la temperatura del vapor y el aire que salen del bidón, y una válvula rompevacío controla

el vacío dentro de este. Para las aplicaciones de alta dosis existe la opción de un bidón de cabezal fijo. La fuente de energía térmica es un electrocalentador. Las dos valvas articuladas del calefactor envolvente rodean el bidón, proporcionando el calor para la evaporación. El calefactor envolvente puede funcionar a cualquier temperatura entre 120 y 230 °C. Cuando el contenido del bidón supera los 70 °C, que es la temperatura de ebullición del agua a un vacío de 0,5 m, los líquidos se evaporan instantáneamente. El bidón lleno de sólidos secos se calienta hasta la temperatura de trabajo máxima para asegurarse de que no quede ningún líquido en su interior.



Fig. 19. Unidad de secado dentro del bidón (cortesía de Diversified Technologies Services).

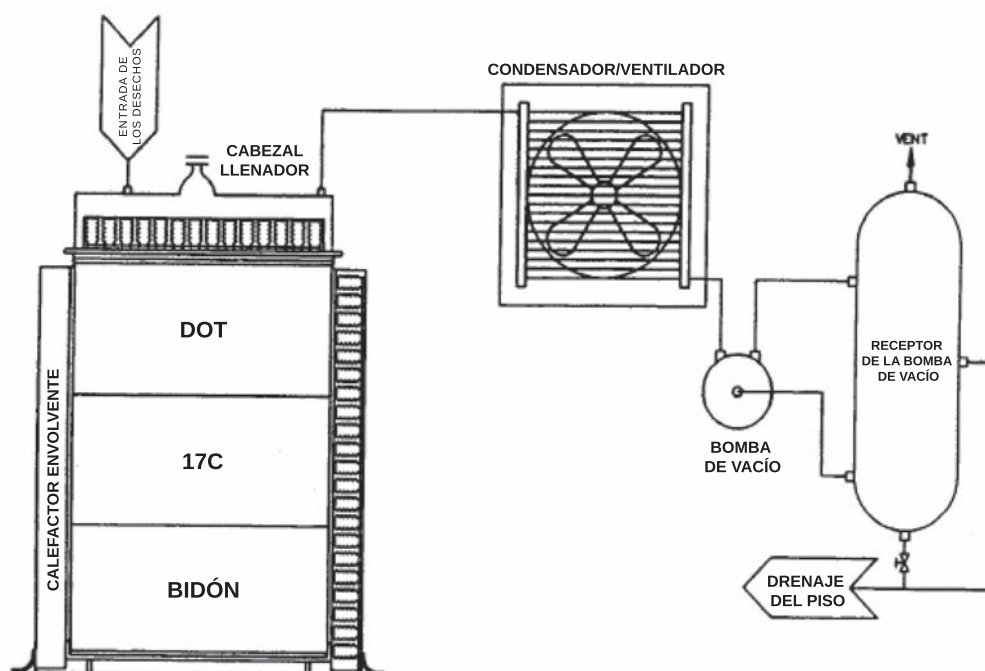


Fig. 20. Esquema de la unidad de secado dentro del bidón (cortesía de Diversified Technologies Services).

4.2.7.2 Descripción de los componentes y elementos

El sistema tiene dos componentes principales: una unidad de control y los módulos de los bidones.

- Estos componentes pueden estar montados en una plataforma o instalados de forma permanente.
- Los módulos de los bidones pueden situarse en una zona blindada, lejos de la plataforma de control.

4.2.7.3 Ventajas particulares del sistema

- Facilidad de instalación y mantenimiento;
- Controles automatizados;
- Supervisión mínima del operador;
- Capacidad flexible;
- Posibilidad de aumentar la capacidad del sistema en incrementos de 7,5 a 11,5 L/h conectando nuevos módulos a la plataforma de control;
- Reducción del volumen de los desechos en un 85 % a 95 %;
- Captación total (100 %) de la actividad líquida.

4.2.7.4 Limitaciones particulares del sistema

- La tasa efectiva de procesamiento varía según el número de módulos utilizados y el contenido de sólidos ya deshidratados de cada bidón.

4.2.7.5 Principales consideraciones para el estudio técnico

Las principales consideraciones para el estudio técnico de los sistemas de secado dentro de un bidón se recogen en el cuadro 13.

CUADRO 13. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE SECADO DE DESECHOS LÍQUIDOS Y SÓLIDOS HÚMEDOS DENTRO DE UN BIDÓN

Consideración	Descripción
Características de los desechos y materiales tratados (volumen, tipo, actividad, forma)	Lodos, resinas, elementos de filtración, concentrados líquidos y soluciones de descontaminación.
Características de los desechos secundarios generados por el proceso (volumen, tipo, actividad, forma)	Recuperación completa (100 %) del agua.
Características del cuerpo de desechos final (tipo de contenedor, actividad, forma)	Torta sólida.
Consideraciones jurídicas y reglamentarias (nacionales, locales, internacionales, licencias, explotación, movimientos y transporte de desechos)	— Necesidad de controlar la concentración de la actividad para cumplir los objetivos de clasificación de los desechos; — Compatibilidad del cuerpo del desecho resultante con los requisitos; — Blindaje para la protección radiológica; — Captación y control de los efluentes aerotransportados.

CUADRO 13. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE SECADO DE DESECHOS LÍQUIDOS Y SÓLIDOS HÚMEDOS DENTRO DE UN BIDÓN (cont.)

Consideración	Descripción
Requisitos relacionados con el transporte (explotación del sistema, envíos de desechos, caminos de acceso)	— Desplazamiento de los bidones de desechos en bruto a la unidad; — Retirada del cuerpo de desechos final de la unidad: el desplazamiento de los sólidos concentrados puede requerir el uso de un mecanismo de izado, un transportador de bidones o una horquilla elevadora.
Modo de uso: procesamiento por lotes o continuo (tipo de sistema, desechos secundarios)	La frecuencia de la operación dependerá de los desechos iniciales. El sistema puede funcionar de manera continua o en campañas periódicas.
Costo: arreglos contractuales (arriendo/compra); instalación periódica (mensual/anual/por campañas/por volumen); artículos fungibles; personal; retirada y disposición final del equipo; expedición; disposición final de los desechos	— Costo bajo en comparación con un sistema fijo o con otras soluciones, como la solidificación de líquidos; — Posibilidad de arriendo o de compra; — Capacitación del personal de operación, o manejo del sistema por técnicos del proveedor; — Posibilidad de transporte en camiones normales; — El sistema es fácil de instalar y retirar; — Los componentes del sistema expuestos a contaminantes radiactivos no pueden descontaminarse fácilmente para la descarga incondicional.
Configuración del sistema (móvil o montado sobre plataforma)	El sistema puede ser móvil o estar montado sobre una plataforma.
Superficie en la base o tamaño físico del sistema móvil (dimensiones máximas, espacio para la manipulación/sustitución/reparación de los medios)	~3 m × 3 m (sistema de dos bidones).
Peso total (carga de los pisos y movimientos)	~635 kg, excluidos los bidones de desechos.
Personal requerido (número de operadores, personal por contrata, cualificaciones técnicas, operaciones, seguridad física, mantenimiento)	— Un operador para poner en marcha y parar el sistema (contratado o perteneciente a la instalación); — Cualificaciones mínimas (manejo muy básico del equipo); — Mano de obra para desplazar los bidones de desechos en bruto y procesados; — Duración de las tareas en función del uso (por lotes, continuo, frecuencia, volumen); — Mantenimiento realizado normalmente por el proveedor; — Ningún requisito de ensayos; — Ningún requisito de seguridad física en la mayoría de las aplicaciones.
Capacidad y rendimiento máximos u óptimos, factor de descontaminación y reducción de volumen	— 7,5 a 11,5 L/h, con aumentos incrementales si se añaden nuevas unidades de bidones; — Reducción de volumen de 2:1 para la resina en perlas/polvo, 5:1 para los lodos y 100:1 para los líquidos; — Factor de descontaminación de 1000 para los líquidos procesados (con excepción de las materias volátiles).
Necesidades de espacio (zona de almacenamiento de artículos fungibles, espacio de aparcamiento transitorio y almacenamiento de desechos)	Varían según la tasa de proceso, pero típicamente se requiere espacio de almacenamiento para los bidones DOT 17C de 200 L con los desechos en bruto y para los bidones de desechos procesados.

CUADRO 13. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE SECADO DE DESECHOS LÍQUIDOS Y SÓLIDOS HÚMEDOS DENTRO DE UN BIDÓN (cont.)

Consideración	Descripción
Lista de los artículos fungibles necesarios para el proceso (medios, contenedores, piezas, productos químicos)	Bidones DOT 17C de 200 L para los desechos en bruto.
Necesidades de servicios generales (aire, agua, vapor, electricidad, ventilación)	— Energía eléctrica: 230 V para la unidad. — Puede necesitarse ventilación, según los requisitos del emplazamiento en cuestión.
Equipo de manipulación para la colocación, el procesamiento, y la manipulación y el embalaje de los desechos (grúas, horquillas elevadoras, capacidad de carga)	Horquilla elevadora, portapalés o mecanismo de izado.
Requisitos generales de seguridad industrial y radiológica (barreras, protección respiratoria, monitorización de la exposición del personal, controles de la contaminación, monitorización del aire)	— Se recomienda la monitorización radiológica de los bidones durante el proceso de secado. — Se recomienda dirigir el efluente de la salida de aire hacia los sistemas de ventilación de la instalación para su monitorización. — Aplicación de las precauciones de seguridad generales para el uso de equipo a altas temperaturas.

4.3 DESECHOS GASEOSOS

4.3.1 Tratamiento del gas expulsado

4.3.1.1 Descripción de un sistema típico

El sistema móvil de tratamiento del gas expulsado es una unidad autónoma destinada a tratar el gas que se desprende en el procesamiento térmico de los desechos radiactivos (por ejemplo, en la incineración o la fundición de sales) o en la descontaminación de superficies por métodos mecánicos. El tratamiento extrae los aerosoles y el material particulado del gas antes de su emisión al medio ambiente. El sistema ilustrado en la figura 21 está montado en un contenedor de transporte estándar.

4.3.1.2 Descripción de los componentes y elementos

El sistema consta de:

- un mezclador de aire;
- varios ventiladores;
- un filtro de cartucho;
- un filtro HEPA de partículas finas;
- un colector del condensado;
- un cañón de escape del gas depurado;
- un sistema de monitorización del cañón.

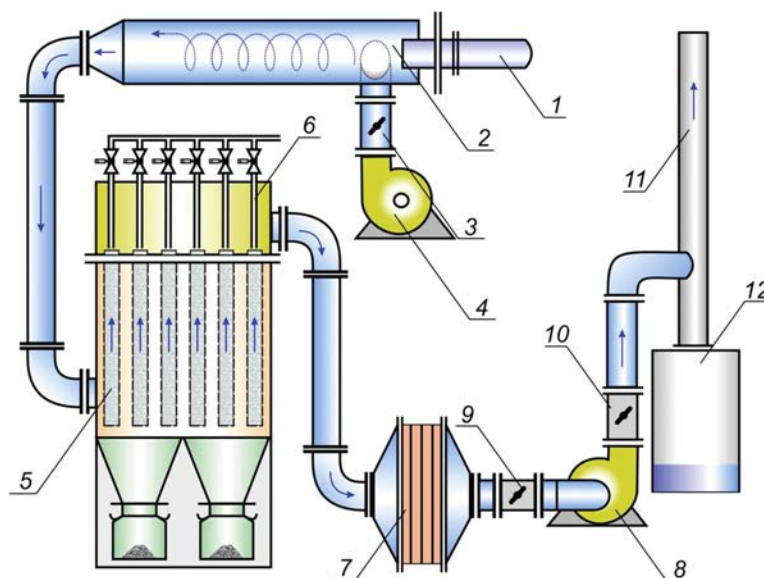


Fig. 21. Sistema móvil de tratamiento del gas expulsado (cortesía de MosNPO Radon).

Si es necesario reducir la temperatura de los gases de escape cargados de aerosoles radiactivos, se los envía hacia el mezclador de aire, donde se mezclan con el aire suministrado por el ventilador (véase la figura 22). A continuación pasan por los tubos perforados del filtro de cartucho, fabricados con tela de basalto. Durante el tratamiento de los gases, las superficies de los elementos de filtración pueden regenerarse mediante una secuencia de impulsos de aire comprimido enviada por el compresor hacia la cavidad interna de los cartuchos de filtro. Las partículas de aerosol extraídas se recogen en dos vasijas cilíndricas situadas en la parte inferior del filtro de cartucho. El tratamiento final de los gases es una filtración en un filtro de mallas pequeñas (como un filtro HEPA). Los gases purificados se emiten al medio ambiente a través del cañón extraíble, que tiene un colector para el agua condensada.

4.3.1.3 Ventajas particulares del sistema

- Altas tasas de procesamiento;
- Bajos costos de procesamiento;
- Bajos volúmenes de desechos secundarios que necesiten tratamiento o acondicionamiento;
- Facilidad de revisión del sistema;
- Depuración del gas a temperaturas elevadas;
- Poco mantenimiento;
- Baja exposición del personal;
- Fácil descontaminación y desmovilización.



(1) entrada de gas; (2) mezclador de aire; (3, 9, 10) reguladores; (4, 8) ventiladores; (5) elementos de tubos perforados; (6) sistema de regeneración del filtro de cartucho; (7) filtro HEPA; (11) cañón; (12) colector del agua condensada.

Fig. 22. Presentación esquemática del sistema móvil de tratamiento del gas expulsado (cortesía de MosNPO Radon).

4.3.1.4 Limitaciones particulares del sistema

- La temperatura del gas no debe superar los 1000 °C.
- El gas tratado no debe contener impurezas corrosivas, inflamables o explosivas.
- El sistema de tratamiento del gas expulsado no tiene ninguna protección biológica, por lo que la actividad específica máxima del gas no debe exceder de 1×10^5 Bq/m³.
- El sistema solo puede extraer los aerosoles del gas.
- El sistema no tiene ningún medio de acondicionamiento de los desechos secundarios radiactivos. Los materiales de filtración gastados y el polvo deben ser embalados y transportados a otro lugar para su acondicionamiento.

4.3.1.5 Principales consideraciones para el estudio técnico

Las principales consideraciones para el estudio técnico de los sistemas de tratamiento del gas expulsado se recogen en el cuadro 14.

CUADRO 14. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL GAS EXPULSADO

Consideración	Descripción
Características de los desechos y materiales tratados (volumen, tipo, actividad, forma)	Gases producidos en las instalaciones de procesamiento térmico de desechos (incineración, fundición de sales) o en las instalaciones de descontaminación mecánica; <200 000 m ³ /año; actividad específica < 1×10^5 Bq/m ³ .

CUADRO 14. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL GAS EXPULSADO (cont.)

Consideración	Descripción
Características de los desechos secundarios generados por el proceso (volumen, tipo, actividad, forma)	Por cada 200 000 m³ de gases depurados: — Agua desalada radiactiva: <0,05 m³, concentración de la actividad <1 × 10² Bq/L. — Material de tela de basalto: <0,2 m³, actividad total <1 × 10⁸ Bq. — Polvo de las partículas de aerosol: <20 kg, actividad específica <1 × 10⁸ Bq/kg.
Características del cuerpo de desechos final (tipo de contenedor, actividad, forma)	Por cada 200 000 m³ de gases depurados: — Menos de dos bidones de 200 L con 0,05 m³ de agua desalada radiactiva, 20 kg de polvo radiactivo de las partículas de aerosol y 0,2 m³ de material de tela radiactivo (actividad total <2 × 10⁹ Bq); — Desechos secundarios acondicionados por hormigonado después del transporte (volumen total <0,4 m³).
Consideraciones jurídicas y reglamentarias (nacionales, locales, internacionales, licencias, explotación, movimientos y transporte de desechos)	Necesidad de cumplir la reglamentación local, regional y nacional.
Requisitos relacionados con el transporte (explotación del sistema, envíos de desechos, caminos de acceso)	Horquilla elevadora o grúa y un camión.
Modo de uso: procesamiento por lotes o continuo (tipo de sistema, desechos secundarios)	El sistema puede utilizarse para el procesamiento continuo de hasta 200 000 m ³ de gases. El procesamiento puede proseguir después de un cambio de filtro.
Costo: arreglos contractuales (arriendo/compra); instalación periódica (mensual/anual/por campañas/por volumen); artículos fungibles; personal; retirada y disposición final del equipo; expedición; disposición final de los desechos	— El costo inicial de la instalación es del orden de los 70 000 dólares de los Estados Unidos. — El costo del tratamiento es muy bajo y varía según las características del desecho inicial. — El costo de la disposición final del desecho varía según el Estado.
Configuración del sistema (móvil o montado sobre plataforma)	Montado sobre una plataforma dentro de un contenedor ISO.
Superficie en la base o tamaño físico del sistema móvil (dimensiones máximas, espacio para la manipulación/sustitución/repación de los medios)	6 m × 2,4 m × 2,7 m (altura).
Peso total (carga de los pisos y movimientos)	<4200 kg.
Personal requerido (número de operadores, personal por contrata, cualificaciones técnicas, operaciones, seguridad física, mantenimiento)	— Durante la explotación: una persona (tecnólogo físico, sin necesidad de educación superior). — Para la reparación: dos personas (un mecánico y un electricista, sin necesidad de educación superior).
Capacidad y rendimiento máximos u óptimos, y reducción de volumen	— 450 m³/h (900 m³/h con aire de enfriamiento); — Factor de reducción de volumen: ~500 000.

CUADRO 14. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO DEL GAS EXPULSADO (cont.)

Consideración	Descripción
Necesidades de espacio (zona de almacenamiento de artículos fungibles, espacio de aparcamiento transitorio y almacenamiento de desechos)	<20 m ² .
Lista de los artículos fungibles necesarios para el proceso (medios, contenedores, piezas, productos químicos)	— Bidones de 200 L; — 12 m² de material de tela de basalto; — Un filtro HEPA (de capacidad no inferior a 500 m³/h).
Necesidades de servicios generales (aire, agua, vapor, electricidad, ventilación)	Energía eléctrica: 380 V, CA, 50 Hz, 20 kW.
Equipo de manipulación para la colocación, el procesamiento, y la manipulación y el embalaje de los desechos (grúas, horquillas elevadoras, capacidad de carga)	Una grúa.
Requisitos generales de seguridad industrial y radiológica (barreras, protección respiratoria, monitorización de la exposición del personal, controles de la contaminación, monitorización del aire)	— Un operador; — Monitorización de física sanitaria en torno a la instalación, especialmente cerca de las dos vasijas cilíndricas de la parte inferior del filtro de cartucho.

Nota: Filtro HEPA — filtro de aire particulado de alta eficiencia.

5 SISTEMAS DE ACONDICIONAMIENTO DE DESECHOS

5.1 FUENTES SELLADAS EN DESUSO

5.1.1 Encapsulamiento de fuentes selladas en desuso en una matriz metálica

5.1.1.1 Descripción de un sistema típico

El sistema Moskit encapsula las fuentes selladas en desuso en matrices metálicas, que se colocan luego en contenedores de almacenamiento a largo plazo o en repositorios subterráneos de pozo [28 a 31]. Las matrices metálicas ofrecen conductividad térmica y blindaje biológico. Las configuraciones del sistema ilustradas en las figuras 23 y 24 son adecuadas para las siguientes operaciones:

- el bombeo y la recogida del agua u otros líquidos que puedan estar presentes en el contenedor de almacenamiento;
- el secado de los elementos internos del contenedor o del pozo, si es necesario;
- la fusión de la matriz de materiales y el mantenimiento de la temperatura requerida;
- el vertido del material fundido en un contenedor o un repositorio de fuentes radiactivas gastadas;
- la purificación del gas expulsado durante el secado, la fusión o el vertido.

El diámetro mínimo requerido para introducir las fuentes radiactivas gastadas encapsuladas en la matriz metálica utilizando la tecnología Moskit es de 30 mm para los contenedores o el repositorio de pozo.

5.1.1.2 Descripción de los componentes y elementos

El sistema Moskit se compone de las siguientes unidades:

- El adaptador, que permite una conexión hermética del contenedor o repositorio con las otras unidades funcionales del módulo (la unidad de purificación del gas, el calentador del aire y el tubo conductor del metal calentado). Esta pieza tiene una brida lateral para la conexión con la unidad de purificación del gas y una brida superior para la conexión con otras unidades funcionales. El adaptador se coloca sobre el contenedor o el repositorio de pozo.
- La unidad de purificación del gas, que limpia y descarga el gas generado en el contenedor o el repositorio durante el secado, la fusión y el vertido. Consiste en un filtro de aire fino y un expulsor de aire radial con un cañón de escape de 2 m de largo. Esta unidad se conecta al adaptador con una manguera de caucho. La unidad purificadora puede procesar hasta 1000 m³/h y opera con una rarefacción de menos de 500 Pa.
- La unidad de bombeo, que extrae el agua libre y los otros líquidos que puedan estar presentes en el contenedor o repositorio. Consiste en un tanque cilíndrico hermético y una bomba de vacío. Operando al vacío, la bomba transfiere el líquido del contenedor o repositorio al tanque a través de una manguera. La unidad está dotada de un sistema de control del nivel automático, que impide el llenado excesivo.
- El calentador del aire, que calienta y seca el aire que entra en el contenedor o repositorio. El calentador posee una brida para la conexión hermética con el adaptador. La salida del calentador está conectada a una manguera, que introduce el aire caliente en el fondo del contenedor o repositorio. La unidad de purificación del gas permite la circulación del aire a través del calentador.

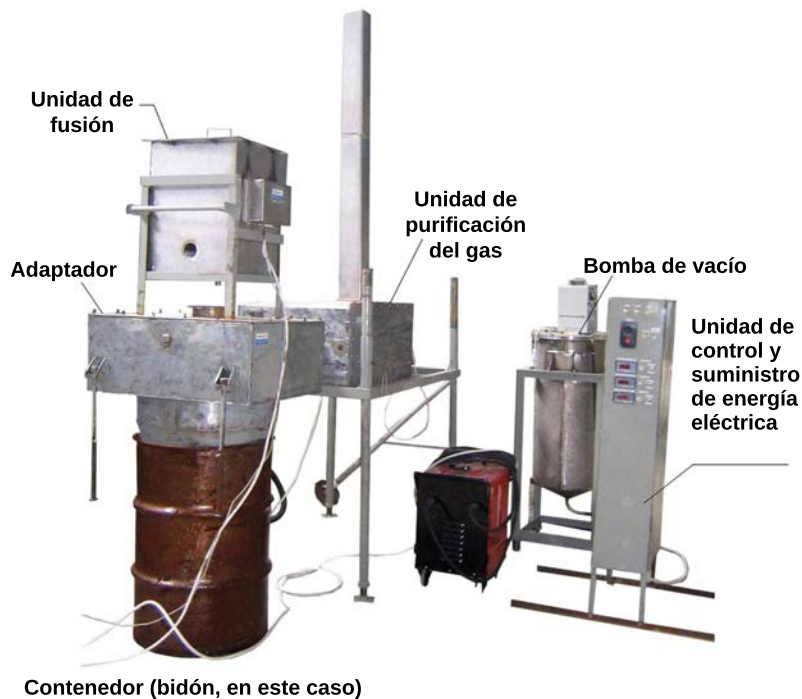


Fig. 23. Vista de conjunto del sistema Moskit (cortesía de MosNPO Radon).

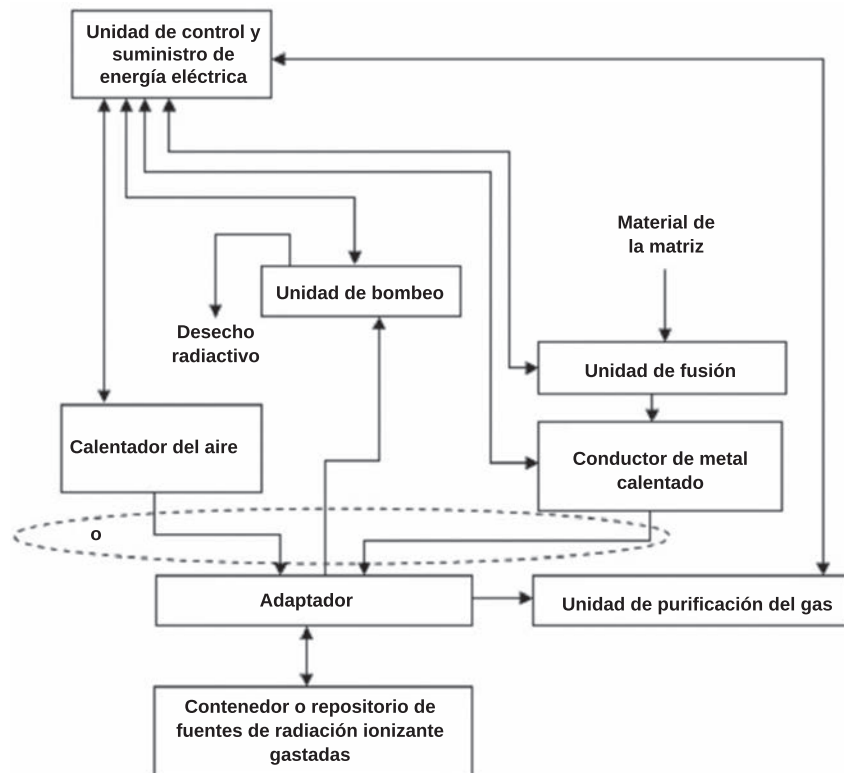


Fig. 24. Esquema del proceso del sistema Moskit.

- e) La unidad de fusión, que funde los materiales de la matriz, calienta y mantiene la temperatura requerida. Consta de una cámara de fundición de acero inoxidable calentada con electrocalentadores. El fondo de esta cámara está provisto de una unidad que descarga los materiales de la matriz. La unidad de descarga también se calienta con los electrocalentadores de la cámara de fundición. La entrada de la cámara está tapada, a fin de reducir la pérdida de calor y evitar la salida de los vapores emitidos por los materiales de la matriz.
- f) El tubo conductor del metal calentado, que descarga el material fundido de la matriz a una profundidad de 7 m. La manguera metálica se calienta, para evitar que el material fundido cristalice antes de tiempo dentro de ella. La manguera metálica es una manguera flexible de acero inoxidable, revestida con un aislante térmico hecho de un tejido de fibra de vidrio, y se calienta por corriente eléctrica. La manguera metálica atraviesa el adaptador para llegar al repositorio o el contenedor. Si se utilizan contenedores en lugar de un repositorio de pozo, no se requiere el tubo conductor para descargar los materiales fundidos de la matriz.
- g) La unidad de control y suministro de energía eléctrica, que alimenta las unidades del módulo y permite la monitorización del equipo y el control del bombeo, el secado y el vertido. Comprende una cabina de control y suministro de energía eléctrica, un transformador reductor (380/60 V) y cables de interconexión. La parte delantera de esta unidad está provista de instrumentos y activadores. Los conectores eléctricos y el equipo de control se encuentran en la parte trasera del gabinete.

5.1.1.3 Ventajas particulares del sistema

- Facilidad de instalación en el emplazamiento.
- Bajo costo del procesamiento.
- Tubo conductor del metal calentado, para evitar el bloqueo en su interior.

- Bajos volúmenes de desechos secundarios (agua, materiales de filtración) que requieran tratamiento o acondicionamiento.
- Fácil revisión del sistema.
- Poco mantenimiento: uno o dos operadores; el tubo conductor del metal calentado es la única parte de la instalación que requiere desactivación.
- Fácil desmovilización.

5.1.1.4 Limitaciones particulares del sistema

- La unidad de fusión se limita a 5 L de metal (plomo o aleación de plomo).
- La temperatura del metal fundido no debe exceder de 450 °C.
- La distancia vertical para la descarga no debe exceder de 5 m.
- El grosor de una capa de fuentes radiactivas gastadas no debe exceder de 0,2 m.

5.1.1.5 Principales consideraciones para el estudio técnico

Las principales consideraciones para el estudio técnico de los sistemas de encapsulamiento de fuentes selladas en desuso se recogen en el cuadro 15.

CUADRO 15. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE ENCAPSULAMIENTO DE FUENTES SELLADAS EN DESUSO

Consideración	Descripción
Características de los desechos y materiales tratados (volumen, tipo, actividad, forma)	— Fuentes radiactivas selladas en repositorios subterráneos de pozo (pozos barrenados), de hasta $6,6 \times 10^6$ GBq en equivalente de ^{226}Ra; — Fuentes radiactivas selladas en contenedores de almacenamiento a largo plazo, de hasta 370 GBq en equivalente de ^{226}Ra.
Características de los desechos secundarios generados por el proceso (volumen, tipo, actividad, forma)	Para los repositorios subterráneos de pozo (pozos barrenados): — agua radiactiva (hasta 0,1 m³; actividad específica $<1 \times 10^6$ Bq/L); — filtro de gases expulsados (radiactivo, $<0,2$ m³, combustible). Para los contenedores de almacenamiento a largo plazo, ningún desecho secundario.
Características del cuerpo de desechos final (tipo de contenedor, actividad, forma)	— Matriz metálica vertida directamente dentro de los repositorios subterráneos de pozo (pozos barrenados); — Contenedores especificados por el emplazamiento en cuestión (por ejemplo, bidones de 200 L).
Consideraciones jurídicas y reglamentarias (nacionales, locales, internacionales, licencias, explotación, movimientos y transporte de desechos)	Puede haber normas locales, regionales, nacionales e internacionales aplicables a la descarga de gases, el tratamiento del líquido recogido, y el transporte y el almacenamiento o la disposición final de los desechos.
Requisitos relacionados con el transporte (explotación del sistema, envíos de desechos, caminos de acceso)	— Contenedor o cajas de embalaje para el transporte del sistema; — No se requieren mecanismos elevadores.
Modo de uso: procesamiento por lotes o continuo (tipo de sistema, desechos secundarios)	Procesamiento por lotes.

CUADRO 15. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE ENCAPSULAMIENTO DE FUENTES SELLADAS EN DESUSO (cont.)

Consideración	Descripción
Costo: arreglos contractuales (arriendo/compra); instalación periódica (mensual/anual/por campañas/por volumen); artículos fungibles; personal; retirada y disposición final del equipo; expedición; disposición final de los desechos	— El costo inicial de la instalación es del orden de 50 000 dólares de los Estados Unidos. — El costo específico del tratamiento de un repositorio subterráneo de pozo (pozo barrenado) o de un contenedor de almacenamiento a largo plazo puede ascender a 50 000 dólares de los Estados Unidos.
Configuración del sistema (móvil o montado sobre plataforma)	Montado sobre plataforma.
Superficie en la base o tamaño físico del sistema móvil (dimensiones máximas, espacio para la manipulación/sustitución/repación de los medios)	<3 m ² .
Peso total (carga de los pisos y movimientos)	<900 kg.
Personal requerido (número de operadores, personal por contrata, cualificaciones técnicas, operaciones, seguridad física, mantenimiento)	— Funcionamiento: un tecnólogo físico, con educación superior; un trabajador no cualificado. — Mantenimiento: un mecánico; un electricista.
Capacidad y rendimiento máximos u óptimos, y reducción de volumen	Llenado de un repositorio subterráneo de pozo (pozo barrenado) o un contenedor de almacenamiento a largo plazo cada dos días.
Necesidades de espacio (zona de almacenamiento de artículos fungibles, espacio de aparcamiento transitorio y almacenamiento de desechos)	<10 m ² .
Lista de los artículos fungibles necesarios para el proceso (medios, contenedores, piezas, productos químicos)	Para el llenado de un repositorio subterráneo de pozo (pozo barrenado) o un contenedor de almacenamiento a largo plazo: — 500 a 1000 kg de Pb; — 500 a 1000 kg de una aleación de bajo punto de fusión.
Necesidades de servicios generales (aire, agua, vapor, electricidad, ventilación)	Energía eléctrica: 380 V, CA, 50 Hz, 20 kW.
Equipo de manipulación para la colocación, el procesamiento, y la manipulación y el embalaje de los desechos (grúas, horquillas elevadoras, capacidad de carga)	No necesario.
Requisitos generales de seguridad industrial y radiológica (barreras, protección respiratoria, monitorización de la exposición del personal, controles de la contaminación, monitorización del aire)	— Ningún requisito de seguridad especial; — Controles y monitorización radiológica según los requisitos del emplazamiento en cuestión; — Típicamente, niveles mínimos de medición de la radiación, controles de la zona y monitorización del gas expulsado.

5.2 DESECHOS LÍQUIDOS Y SÓLIDOS HÚMEDOS

5.2.1 Solidificación (hormigonado)

5.2.1.1 Descripción de un sistema típico

Un sistema de solidificación típico consiste en una unidad de hormigonado, dotada de un sistema programado de alimentación de cemento y desechos y un mezclador blindado con cantidades preestablecidas de desechos. El producto mezclado se recoge en contenedores de desechos. El sistema está diseñado para ser accionado desde el panel de control de la unidad móvil, con enclavamientos de seguridad. Los desechos se trasiegan del tanque de almacenamiento del emplazamiento a la unidad mediante un sistema de bombeo. El aire efluente se captura y se dirige a un punto de descarga monitorizado y autorizado. A continuación se examinan dos ejemplos de unidades de solidificación de desechos líquidos acuosos. Los bidones numerados de la figura 25 representan la secuencia de la operación, en que el contenedor vacío se coloca en el medio transportador (1), se llena con desechos y cemento (2) y se deposita en una estación de curado (3) [32].

La unidad de hormigonado de la India ilustrada en la figura 26 está instalada enteramente dentro de un contenedor de 2,5 m × 6 m × 3 m, montado sobre un remolque. Se utiliza para inmovilizar desechos líquidos radiactivos de baja actividad. Los desechos se mezclan con cemento para formar una lechada, que puede verterse en un contenedor (modo de funcionamiento discontinuo o por lotes) o bombearse a zanjas de disposición final de desechos (modo de funcionamiento continuo). La capacidad de producción del sistema es de 500 L de lechada por hora en el funcionamiento por lotes, y de 1000 L/h en el modo continuo.

Un sistema de trasiego por vacío descarga cemento Portland ordinario seco en el depósito de cemento de la unidad móvil. El cemento es llevado a la tolva alimentadora en un transportador de tornillo. Los desechos, almacenados en el tanque de la unidad, se transfieren a un recipiente de mezcla por bombeo. Simultáneamente, la válvula rotatoria de la tolva alimentadora introduce en el recipiente una

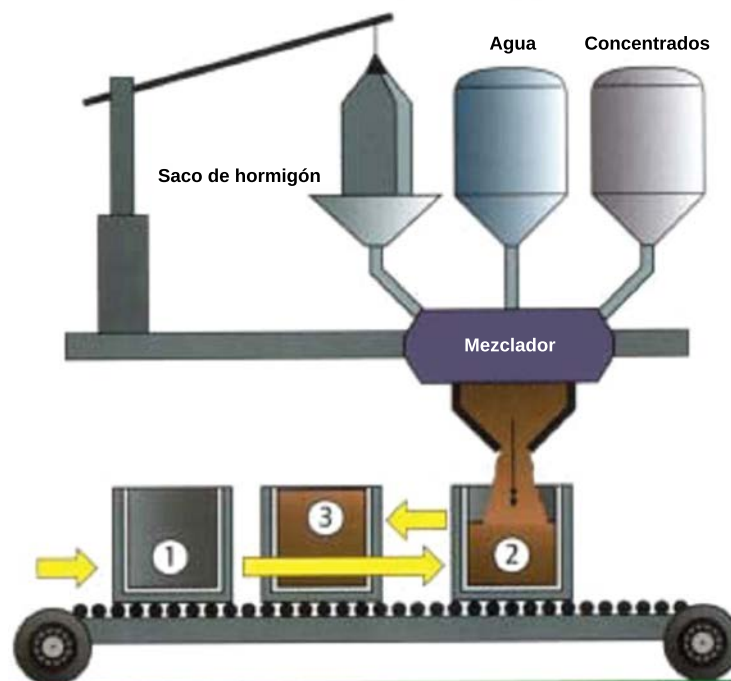


Fig. 25. Sistema móvil de hormigonado (cortesía de SOCODEI).

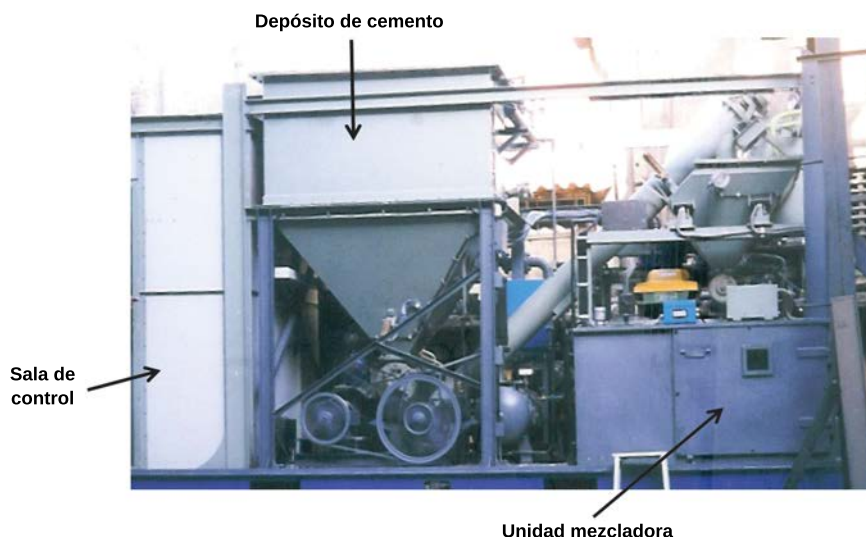


Fig. 26. Unidad móvil de hormigonado para desechos líquidos acuosos (cortesía de BARC).

cantidad dosificada de cemento. La lechada así creada se bombea a los contenedores de almacenamiento de desechos o las zanjas de disposición final. Todo el equipo que entra en contacto con materiales radiactivos se mantiene dentro de un recinto construido con chapas de acero al carbono de 25 mm de grosor, a una presión negativa de 25 mm de agua. La unidad se maneja desde una cabina de control mediante una computadora personal, un controlador lógico programable (PLC) o interruptores de botón. Hay dispositivos para la limpieza y descontaminación del sistema con agua.

5.2.1.2 Descripción de los componentes y elementos

- Medios de manipulación mecánica de los desechos y el cemento (bomba, transportador, bidón/ contenedor especial);
- Dispositivo de mezcla;
- Canalización, filtración y monitorización del efluente gaseoso;
- Instrumentos y mandos.

5.2.1.3 Ventajas particulares del sistema

- Facilidad de uso y mantenimiento;
- Sistema de trasiego del cemento por gravedad o vacío, que evita los problemas de formación de polvo;
- Capacidad moderada;
- Producto de buena calidad según una evaluación de laboratorio de la relación desecho-cemento requerida, compatible con los criterios de aceptación para el almacenamiento o la disposición final en la jurisdicción en que se tratarán los desechos;
- Posibilidad de modificar el diseño para tratar lodos de precipitación química;
- Manejo desde un panel de control;
- Posibilidad de fijar desechos sólidos en una matriz sólida;
- Disponibilidad de diseños con el sistema montado enteramente dentro de un contenedor.

5.2.1.4 Limitaciones particulares del sistema

- El sistema está diseñado para un intervalo de temperaturas de 10 a 45 °C y no es adecuado para temperaturas ambiente bajas.
- Los pequeños volúmenes de desechos secundarios generados deben ser tratados por separado.
- La cámara de procesamiento debe ventilarse con un sistema de aspiración especial durante el proceso para garantizar la gestión segura de la niebla cargada de polvo.
- La composición del desecho debe estar correctamente caracterizada, y es esencial realizar una evaluación de laboratorio para asegurarse de que el desecho solidificado tenga las características deseadas. Por ejemplo, los compuestos orgánicos pueden inhibir el curado del cemento y deben eliminarse por filtración con medios hidrófobos o carbono activado antes de añadir el cemento a los desechos. Algunos minerales inorgánicos, como los sulfatos y los materiales que contienen boro, también afectan a la resistencia del producto hormigonado final.

5.2.1.5 Principales consideraciones para el estudio técnico

Las principales consideraciones para el estudio técnico de los sistemas de hormigonado se recogen en el cuadro 16.

CUADRO 16. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE SOLIDIFICACIÓN (HORMIGONADO)

Descripción	Detalles del sistema de Francia	Detalles del sistema de la India
Características de los desechos y materiales tratados (volumen, tipo, actividad, forma)	— Concentrados de la evaporación de desechos líquidos, por lo general almacenados en un tanque; — B hasta 30 000 ppm; — Na hasta 120 000 ppm; — P hasta 20 000 ppm; — Actividad: según los requisitos de blindaje y disposición final.	— Desechos líquidos, por lo general almacenados en un tanque; — Hasta un 2 % (p/v) de sólidos en suspensión; — Actividad: desechos acuosos de baja actividad, según los requisitos de blindaje y disposición final.
Características de los desechos secundarios generados por el proceso (volumen, tipo, actividad, forma)	El sistema acondiciona también las soluciones de limpieza. El agua de enjuague utilizada para limpiar el sistema entre dos lotes sucesivos de desechos puede utilizarse en un lote ulterior, si es necesario.	
Características del cuerpo de desechos final (tipo de contenedor, actividad, forma)	Bloque de desechos solidificados en hormigón, con características que dependerán de los requisitos aplicables a la disposición final (en bidones o a granel).	
Consideraciones jurídicas y reglamentarias (nacionales, locales, internacionales, licencias, explotación, movimientos y transporte de desechos)	Salvo el acuerdo con respecto al bulto final, el despliegue de los sistemas no requiere procesos jurídicos o reglamentarios complejos.	
Requisitos relacionados con el transporte (explotación del sistema, envíos de desechos, caminos de acceso)	— Contenedor montado en un remolque; — Taller en un contenedor ISO; — Transporte de los contenedores de desechos solidificados al lugar de disposición final.	— Contenedor montado en un remolque; — Transporte de los contenedores de desechos solidificados al lugar de disposición final.

CUADRO 16. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE SOLIDIFICACIÓN (HORMIGONADO) (cont.)

Descripción	Detalles del sistema de Francia	Detalles del sistema de la India
Modo de uso: procesamiento por lotes o continuo (tipo de sistema, desechos secundarios)	Procesamiento por lotes de los desechos entrantes.	
Costo: arreglos contractuales (arriendo/compra); instalación periódica (mensual/anual/por campañas/por volumen); artículos fungibles; personal; retirada y disposición final del equipo; expedición; disposición final de los desechos	— Costo moderado, funcionamiento periódico (el costo típico de la unidad de la India es de <400 000 dólares de los Estados Unidos). — Artículos fungibles: cemento, agua para la depuración, piezas de recambio. — Personal capacitado. — Fácil retirada tras la desconexión de las tuberías de alimentación de desechos.	
Configuración del sistema (móvil o montado sobre plataforma)	Componentes montados en plataformas que se ensamblan en el emplazamiento.	Móvil.
Superficie en la base o tamaño físico del sistema móvil (dimensiones máximas, espacio para la manipulación /sustitución/repelación de los medios)	— Espacio para una unidad de 4 m × 9 m × 5 m; — Camino de acceso; — Acceso libre de por lo menos 2 m de ancho en torno a la unidad móvil.	— Espacio para un contenedor ISO de 6 m y el remolque; — Camino de acceso; — Acceso libre de por lo menos 2 m de ancho en torno a la unidad móvil; — Acordonamiento de la zona en que se mueva el producto para impedir el acceso de operadores no capacitados.
Peso total (carga de los pisos y movimientos)	Peso: <15 t.	
Personal requerido (número de operadores, personal por contrata, cualificaciones técnicas, operaciones, seguridad física, mantenimiento)	— Instalación, funcionamiento, desmovilización: cuatro operadores capacitados, uno de ellos para la grúa y la horquilla elevadora. — Experto en protección radiológica, cuando así lo exija el emplazamiento en cuestión.	— Dos operadores cualificados por turno; — Experto en protección radiológica, cuando así lo exija el emplazamiento en cuestión.
Capacidad y rendimiento máximos u óptimos, y reducción de volumen	<1 m ³ por turno.	0,5 a 1 m ³ por turno.
Necesidades de espacio (zona de almacenamiento de artículos fungibles, espacio de aparcamiento transitorio y almacenamiento de desechos)	100 m ² , incluido el mezclador (36 m ²), en una zona controlada.	Espacio para el almacenamiento del mínimo de cemento necesario para una semana de funcionamiento.
Lista de los artículos fungibles necesarios para el proceso (medios, contenedores, piezas, productos químicos)	— Paquetes de cal predosificados; — Cemento; — Áridos.	— Filtro para el sistema de aspiración; — Contenedores/bidones para el producto mezclado; — Cemento.

CUADRO 16. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE SOLIDIFICACIÓN (HORMIGONADO) (cont.)

Descripción	Detalles del sistema de Francia	Detalles del sistema de la India
Necesidades de servicios generales (aire, agua, vapor, electricidad, ventilación)	— Aire comprimido. — Agua desmineralizada. — Energía eléctrica: 25 kW. — Ventilación.	— Aire comprimido; — Agua; — Energía eléctrica: 25 kW.
Equipo de manipulación para la colocación, el procesamiento, y la manipulación y el embalaje de los desechos (grúas, horquillas elevadoras, capacidad de carga)	— Colocación: grúa y horquilla elevadora (10 t). — Funcionamiento: horquilla elevadora (artículos fungibles, bultos finales).	
Requisitos generales de seguridad industrial y radiológica (barreras, protección respiratoria, monitorización de la exposición del personal, controles de la contaminación, monitorización del aire)	— Ningún requisito particular, salvo la monitorización de la exposición del personal; — Monitores y de zona, equipo portátil de monitorización radiológica; — Barreras en la zona de transferencia de desechos y desplazamiento de productos para prevenir los movimientos no autorizados.	

5.2.2 Encapsulamiento de resinas de intercambio iónico gastadas en aglutinantes poliméricos

5.2.2.1 Descripción de un sistema típico

Esta tecnología requiere el bombeo de los desechos del tanque de almacenamiento del emplazamiento a la unidad. Los medios de intercambio iónico se deshidratan y se incorporan en una matriz de dos componentes poliméricos en bidones de 200 L blindados. El agua se devuelve al emplazamiento. Los efluentes gaseosos se captan y dirigen hacia un punto de descarga monitorizado y autorizado.

Un sistema típico consta de una unidad de encapsulamiento transportada en un remolque de carretera, una unidad de dos tanques para los reactivos del proceso (resina epoxi y endurecedor), una estación de control integrada en un contenedor ISO y un camión taller con las herramientas y las piezas de recambio (véanse las figuras 27 y 28) [33].

5.2.2.2 Descripción de los componentes y elementos

- Mandos de control;
- Manipulación mecánica;
- Sistema de pesaje;
- Canalización y monitorización de los efluentes gaseosos.

5.2.2.3 Ventajas particulares del sistema

- Relación costo-eficacia mucho mejor que la de un sistema fijo en cada planta;
- Cuadrillas de personal cualificado permanente;
- Campañas breves (de dos meses de duración) con largos intervalos entre medio (por ejemplo, de más de tres años);
- Diseños especiales para los diferentes tamaños de los edificios auxiliares de las instalaciones nucleares;
- Un único diseño para el funcionamiento y el mantenimiento;

- Procedimientos genéricos para la fijación en una matriz sólida y para la caracterización radiológica de los desechos (los resultados pueden ser más fáciles de comparar y de controlar);
- Documentación genérica (seguridad, sistema operativo y capacitación).

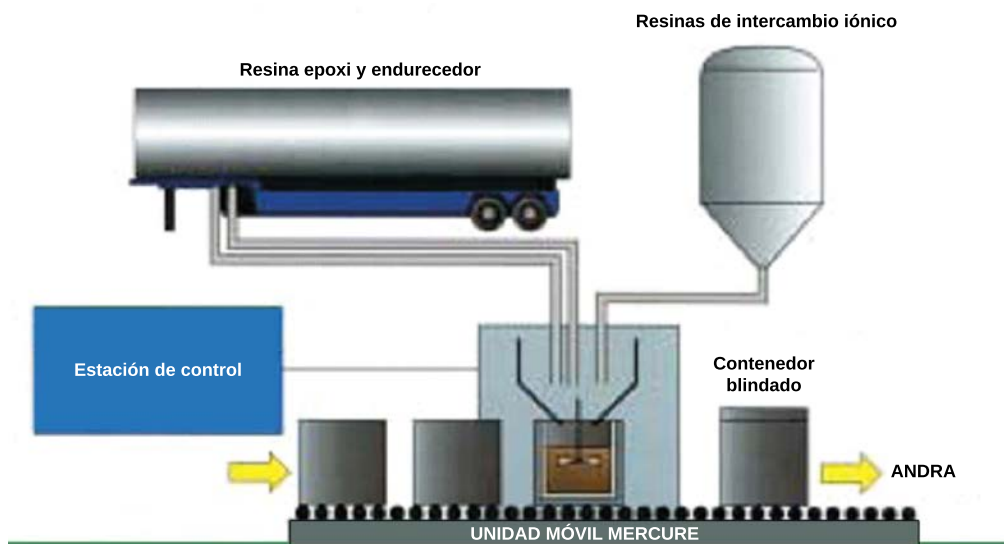


Fig. 27. Esquema del sistema móvil de encapsulamiento de resinas de intercambio iónico en polímeros (cortesía de SOCODEI).



Fig. 28. Sistema móvil de encapsulamiento de resinas de intercambio iónico en polímeros (cortesía de SOCODEI).

5.2.2.4 Limitaciones particulares del sistema

- Las campañas requieren una planificación prolongada (de alrededor de dos años), que tenga en cuenta las diferentes necesidades de las plantas sin experiencia anterior;
- El funcionamiento continuo requiere más de dos cuadrillas de siete operadores.

5.2.2.5 Principales consideraciones para el estudio técnico

Las principales consideraciones para el estudio técnico de un sistema de encapsulamiento de resinas de intercambio iónico gastadas en aglutinantes poliméricos se recogen en el cuadro 17.

CUADRO 17. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE UN SISTEMA DE ENCAPSULAMIENTO DE RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO GASTADAS EN AGLUTINANTES POLIMÉRICOS

Consideración	Descripción
Características de los desechos y materiales tratados (volumen, tipo, actividad, forma)	— Resinas de intercambio iónico procedentes de los sistemas de tratamiento de líquidos (sistemas de purificación de la refrigeración primaria, sistemas de purificación de las piscinas de almacenamiento de combustible gastado, plantas de tratamiento de desechos líquidos, etc.). — Medios de intercambio iónico almacenados en agua en un tanque del emplazamiento. — Redes de resinas de poliestireno, fenólicas, acrílicas o formofenólicas; perlas o granos de resina de 0,3 a 1,2 mm de diámetro; resinas catiónicas o aniónicas. — Los constituyentes químicos pueden incluir: boratos, Ca, Co, Cr, Fe, Li, Na y Ni. — Radionucleidos aceptables (por ejemplo, ^{110m}Ag, ^{57}Co, ^{58}Co, ^{60}Co, ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{54}Mn). — Criterios radiológicos: actividad total de los emisores β y γ $< 13\,500\text{ GBq/m}^3$.
Características de los desechos secundarios generados por el proceso (volumen, tipo, actividad, forma)	— Efluentes acuosos: agua de almacenamiento del intercambiador iónico devuelta al emplazamiento. — Desechos sólidos tecnológicos: bidones de polietileno (200 L, aproximadamente dos bidones para 40 m^3 de resinas). — Equipo de protección personal.
Características del cuerpo de desechos final (tipo de contenedor, actividad, forma)	— Por lo general, un contenedor metálico cilíndrico con blindaje; — Dependen de los requisitos para la disposición final.
Consideraciones jurídicas y reglamentarias (nacionales, locales, internacionales, licencias, explotación, movimientos y transporte de desechos)	Si el sistema se conecta a las tuberías del emplazamiento, estará sujeto a los requisitos establecidos para la planta por los reguladores locales, regionales o nacionales.
Requisitos relacionados con el transporte (explotación del sistema, envíos de desechos, caminos de acceso)	— Dos contenedores especiales que cumplan con el reglamento adecuado para el transporte de mercancías peligrosas; — Dos transportes ordinarios, no regulados.
Modo de uso: procesamiento por lotes o continuo (tipo de sistema, desechos secundarios)	Discontinuo, por campañas: típicamente, $0,3\text{ m}^3$ de desechos por lote, pero el volumen dependerá del tamaño del bulto final.

CUADRO 17. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE UN SISTEMA DE ENCAPSULAMIENTO DE RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO GASTADAS EN AGLUTINANTES POLIMÉRICOS (cont.)

Consideración	Descripción
Costo: arreglos contractuales (arriendo/compra); instalación periódica (mensual/anual/por campañas/por volumen); artículos fungibles; personal; retirada y disposición final del equipo; expedición; disposición final de los desechos	— El equipo puede comprarse o arrendarse como servicio; — La movilización, instalación y capacitación son normalmente un gasto no recurrente.
Configuración del sistema (móvil o montado sobre plataforma)	— Una unidad de encapsulamiento autopropulsada transportada sobre un remolque de carretera; — Una unidad con dos tanques para los reactivos del proceso (resina epoxi y endurecedor); — Una estación de control integrada en un contenedor ISO de 6,5 m; — Un camión taller con las herramientas y piezas de recambio.
Superficie en la base o tamaño físico del sistema móvil (dimensiones máximas, espacio para la manipulación/sustitución/repación de los medios)	— Unidad móvil: ~7 m × 2,5 m × 4 m. — Tanque de almacenamiento de polímeros: 13 m × 2,5 m de diámetro.
Peso total (carga de los pisos y movimientos)	37 t (unidad móvil).
Personal requerido (número de operadores, personal por contrata, cualificaciones técnicas, operaciones, seguridad física, mantenimiento)	Instalación, funcionamiento: grupo de siete operadores con altos niveles de cualificación.
Capacidad y rendimiento máximos u óptimos, y reducción de volumen	— <1 m³ de resina por turno de 8 h; — Factor de reducción de volumen: <1.
Necesidades de espacio (zona de almacenamiento de artículos fungibles, espacio de aparcamiento transitorio y almacenamiento de desechos)	— La unidad de encapsulamiento se instala típicamente en una zona con controles radiológicos o de seguridad física. La ubicación variará según la configuración del emplazamiento y los requisitos reglamentarios de seguridad física y los controles radiológicos aplicables. — Las otras unidades (tanque, estación de control, taller) deben instalarse cerca de la unidad de encapsulamiento.
Lista de los artículos fungibles necesarios para el proceso (medios, contenedores, piezas, productos químicos)	— Componentes poliméricos; — Contenedores de desechos.
Necesidades de servicios generales (aire, agua, vapor, electricidad, ventilación)	— Aire; — Agua desmineralizada; — Electricidad; — Ventilación.
Equipo de manipulación para la colocación, el procesamiento, y la manipulación y el embalaje de los desechos (grúas, horquillas elevadoras, capacidad de carga)	Embalaje: grúa u horquilla elevadora.

CUADRO 17. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE UN SISTEMA DE ENCAPSULAMIENTO DE RESINAS DE INTERCAMBIO IÓNICO GASTADAS EN AGLUTINANTES POLIMÉRICOS (cont.)

Consideración	Descripción
Requisitos generales de seguridad industrial y radiológica (barreras, protección respiratoria, monitorización de la exposición del personal, controles de la contaminación, monitorización del aire)	— Monitorización de la exposición del personal; — Controles de la contaminación.

6 SISTEMAS COMBINADOS DE TRATAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO DE DESECHOS

6.1 DESECHOS SÓLIDOS

6.1.1 Supercompactación

6.1.1.1 Descripción de un sistema típico

Los sistemas de compactación hidráulica de desechos sólidos en bidones o contenedores especiales de capacidad superior a 500 t se denominan en general supercompactadores. Típicamente, un supercompactador consiste en una unidad de compactación vertical con los mandos de control correspondientes, los sistemas de alimentación y retirada de los bidones de desechos, y los discos compactados. Hay supercompactadores móviles montados sobre plataformas o remolques. En la figura 29 se ilustra una unidad montada sobre una plataforma, y en la figura 30, una versión montada sobre un remolque. Los bidones destinados a la compactación avanzan en una cinta transportadora hasta la plataforma del compactador, donde se detienen bajo la prensa hidráulica. El sistema contiene asimismo un mecanismo de filtración del gas y ventilación direccional de la cámara de compactación, para controlar la emisión de partículas radiactivas. La compactación puede causar también la expulsión de agua del bidón de desechos en bruto, que deberá recogerse o transferirse a otro lugar para su tratamiento. Además, el sistema móvil requiere zonas de almacenamiento para la contención secundaria, tanques de recogida de los desechos líquidos y espacio para los filtros.

6.1.1.2 Descripción de los componentes y elementos

Los componentes típicos de un supercompactador móvil son:

- una prensa hidráulica y sus soportes estructurales montados en un remolque;
- una unidad motriz hidráulica;
- un sistema de control de los mecanismos hidráulicos;
- sistemas de manipulación de materiales para la alimentación de los bidones y la manipulación de los discos compactados, con inclusión de mecanismos de izado;
- un sistema de ventilación para la zona radiactiva;
- un sistema de aire acondicionado para la sala de control;

- medios de contención (fosos y bermas/muros de protección) para retener pequeños volúmenes de líquidos. El líquido puede extraerse mediante una aspiradora de residuos húmedos o una pequeña bomba para su tratamiento en un sistema de procesamiento de líquidos radiactivos.



Fig. 29. Supercompactador montado sobre una plataforma (cortesía de GNS Gesellschaft für Nuklear-Service mbH).



Fig. 30. Supercompactador móvil (cortesía de Nucleco).

6.1.1.3 Ventajas particulares del sistema

- Altas relaciones de reducción de volumen;
- Fuerzas de compactación importantes;
- Diseños especiales para contenedores de distintas dimensiones;
- Facilidad de mantenimiento;
- Eficacia ampliamente demostrada.

6.1.1.4 Limitaciones particulares del sistema

- La relación de reducción de volumen alcanzada puede depender de la naturaleza de los desechos.

6.1.1.5 Principales consideraciones para el estudio técnico

Las principales consideraciones para el estudio técnico de los supercompactadores se recogen en el cuadro 18.

CUADRO 18. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SUPERCOMPACTADORES

Consideración	Descripción
Características de los desechos y materiales tratados (volumen, tipo, actividad, forma)	Las formas o características de las corrientes de desechos asociadas más comúnmente con los sistemas móviles de supercompactación comprenden lo siguiente: — en general, desechos embalados previamente en bidones de 200 L con tasas de dosis de hasta 15 mSv/h (con herramientas de manipulación a distancia y blindaje); — desechos de baja densidad generados típicamente en las operaciones de instalaciones radiactivas (como papel, plástico y telas), y otros cuerpos de desechos de mayor densidad (por ejemplo, metales y escombros); — desechos sometidos a compactación de baja fuerza (en bidones), como paso de tratamiento previo; — es posible compactar asbesto y otros desechos de actividad más alta.
Características de los desechos secundarios generados por el proceso (volumen, tipo, actividad, forma)	— Líquidos o lodos extraídos del proceso de compactación; — Polvo generado durante las operaciones; — Los niveles de actividad serán los típicos de los desechos que se estén compactando, pudiendo concentrarse dentro y alrededor de la cámara de compactación como parte del proceso; — Debido a las fuerzas extremas aplicadas en el proceso de supercompactación, cabe prever la descarga de líquidos y aire durante la compactación.
Características del cuerpo de desechos final (tipo de contenedor, actividad, forma)	— El cuerpo de desechos final suele ser un cuerpo sólido comprimido (un bidón aplastado). — Los factores de reducción de volumen dependen del tipo de desecho de que se trate y pueden variar entre 3 y 8. — Los bidones compactados (conocidos también como discos compactados) suelen colocarse dentro de otro bidón o de una caja, a modo de sobreembalaje, después de la compactación.

CUADRO 18. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SUPERCOMPACTADORES (cont.)

Consideración	Descripción
Consideraciones jurídicas y reglamentarias (nacionales, locales, internacionales, licencias, explotación, movimientos y transporte de desechos)	El despliegue de un supercompactador no es normalmente un proceso jurídico o reglamentario complejo. Puede haber reglamentación local, regional y nacional que regule el transporte y uso del equipo, la monitorización de los efluentes y la disposición final de los desechos.
Requisitos relacionados con el transporte (explotación del sistema, envíos de desechos, caminos de acceso)	Los sistemas de supercompactación se transportan normalmente con tractores y remolques por carretera o en barcas. Por lo general, superan el peso y el tamaño reglamentarios y es preciso obtener permisos especiales o escoltas para el transporte.
Modo de uso: procesamiento por lotes o continuo (tipo de sistema, desechos secundarios)	Por lotes, según sea necesario.
Costo: arreglos contractuales (arriendo/compra); instalación periódica (mensual/anual/por campañas/por volumen); artículos fungibles; personal; retirada y disposición final del equipo; expedición; disposición final de los desechos	Los sistemas de supercompactación suelen ser caros y se han adoptado específicamente para las aplicaciones de gestión de desechos radiactivos. Su compra o arriendo y su mantenimiento requieren una inversión de dinero sustancial.
Configuración del sistema (móvil o montado sobre plataforma)	— Los sistemas de supercompactación están montados por lo general sobre remolques, en configuraciones de uno o dos remolques. — Los tiempos de instalación suelen ser de 1 a 2 semanas.
Superficie en la base o tamaño físico del sistema móvil (dimensiones máximas, espacio para la manipulación/sustitución/ reparación de los medios)	Los sistemas de supercompactación necesitan un espacio de trabajo considerable (por ejemplo, 20 m × 16 m) con un perímetro adicional de 5 m.
Peso total (carga de los pisos y movimientos)	— Típicamente de 30 a 50 t; — Para el funcionamiento se requiere una plataforma gruesa de hormigón.
Personal requerido (número de operadores, personal por contrata, cualificaciones técnicas, operaciones, seguridad física, mantenimiento)	— El personal de un sistema de supercompactación se limita por lo general a un operador para la manipulación de los materiales, que cargue y descargue el sistema, y un operador jefe del sistema que maneje el equipo. — Para las operaciones de control del sistema y de seguridad industrial se requiere capacitación. — Para el mantenimiento se necesitan conocimientos técnicos hidráulicos y otras habilidades mecánicas.
Capacidad y rendimiento máximos u óptimos, y reducción de volumen	— La capacidad o el rendimiento típicos de la supercompactación son del orden de varios minutos por ciclo de compactación, con tasas de producción de entre 10 y 15 bidones por hora. — Las fuerzas de compactación son fuerzas compresivas de ~750 a 2200 t.
Necesidades de espacio (zona de almacenamiento de artículos fungibles, espacio de aparcamiento transitorio y almacenamiento de desechos)	— Las necesidades de espacio para artículos fungibles son mínimas. — Para el aparcamiento transitorio de los contenedores de desechos antes y después del procesamiento se requieren normalmente entre 15 y 30 m².

CUADRO 18. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SUPERCOMPACTADORES (cont.)

Consideración	Descripción
Lista de los artículos fungibles necesarios para el proceso (medios, contenedores, piezas, productos químicos)	— Bidones u otros contenedores; — El fluido hidráulico se cambia periódicamente.
Necesidades de servicios generales (aire, agua, vapor, electricidad, ventilación)	— Energía eléctrica: 480 V, CA, trifásica, ~300 A; 110/120 V, CA, monofásica, 20 A. — Ventilación: ventilación HEPA para mantener una presión negativa dentro de la sala de compactación.
Equipo de manipulación para la colocación, el procesamiento, y la manipulación y el embalaje de los desechos (grúas, horquillas elevadoras, capacidad de carga)	— Mecanismo de izado o transporte de bidones; — Montacargas de horquilla.
Requisitos generales de seguridad industrial y radiológica (barreras, protección respiratoria, monitorización de la exposición del personal, controles de la contaminación, monitorización del aire)	— Los requisitos generales de protección del personal (industrial y radiológica) son determinados por el emplazamiento que recibe el equipo y pueden incluir ropa, barreras y monitorización radiológica del personal y de zonas. — Normalmente no se requiere protección respiratoria. — Por lo general, el diseño del sistema tiene medios de ventilación y muestreo del aire incorporados.

Nota: Filtro HEPA — filtro de aire particulado de alta eficiencia.

6.1.2 Reducción de volumen y embalaje de componentes activados

6.1.2.1 Descripción de un sistema típico

Un sistema típico de reducción de volumen y embalaje de componentes activados consiste en varios compactadores, cizallas, contenedores de desechos, cofres y recipientes blindados de transferencia accionados a distancia. Su principal aplicación es la reducción de volumen de los componentes de los reactores de agua en ebullición (BWR) de General Electric, consistentes en hojas de barras de control, monitores locales de rango de potencia, filtros y materiales varios. Los componentes utilizados en un proyecto típico comprenden, entre otras cosas:

- una prensa-cizalla avanzada;
- un extractor de cojinetes de estelita;
- un plegador de hojas de control;
- un cortador de monitores locales de rango de potencia;
- equipo de embalaje.

Varios componentes del sistema pueden utilizarse también en centrales con reactores de agua a presión, centros de investigación públicos, reactores de universidades y otros tipos de centrales nucleares comerciales.



Fig. 31. Prensa-cizalla avanzada junto a una piscina (cortesía de EnergySolutions).

6.1.2.2 Descripción de los componentes y elementos

a) Prensa-cizalla avanzada

Este dispositivo accionado a distancia comprime y corta los componentes físicos irradiados de las instalaciones nucleares. En la figura 31 se ilustra un sistema, suspendido junto a una piscina de combustible gastado, en preparación para su uso.

Las hojas de cizalla están diseñadas con múltiples superficies cortantes. Cuando estas superficies pierden el filo, las hojas pueden invertirse para exponer un nuevo borde cortante. Un sistema de suministro de potencia eléctrica/hidráulica alimenta la cizalla, utilizando agua desmineralizada como fluido hidráulico. El uso de agua desmineralizada en lugar de un fluido a base de petróleo evita la contaminación de la piscina de combustible gastado en caso de fuga.

La prensa-cizalla avanzada está diseñada con un sistema de filtración y aspiración extraíble a distancia. El sistema mantiene un flujo de agua en toda la cara activa de la cizalla. Todo material fino que se produzca durante el corte de los componentes irradiados será arrastrado por el flujo de agua y depositado en filtros de acero inoxidable. Los fragmentos demasiado pesados para ser arrastrados caen directamente en el contenedor de proceso. Una vez terminada una operación, o cuando los filtros se agotan, es fácil extraerlos y colocarlos en el contenedor de los componentes irradiados. Los filtros pueden procesar típicamente hasta 100 hojas de control antes de que sea necesario sustituirlos.

La prensa-cizalla avanzada se arma ensamblando dos componentes básicos, ambos de acero inoxidable. La unidad de cizalla se fija con pernos en la estructura de soporte, en que se encuentran el contenedor de trasiego y el sistema de aspiración, y se coloca en la piscina de combustible gastado como una unidad ensamblada.

Los componentes irradiados se introducen verticalmente por la parte superior de la unidad. Esta comprime y luego corta los componentes en trozos de la longitud deseada. Los componentes procesados caen directamente en el contenedor de proceso.

La cantidad de boro que se emite a la piscina de combustible gastado durante el procesamiento de las hojas de control es muy pequeña. La acción de cizalla sobre las hojas de control previamente corrugadas para retener los tubos de boro tiende a plegar los tubos metálicos sobre el material de B_4C .

en cada corte. El material particulado que se libera es captado por el sistema de aspiración bajo el agua proporcionado por la instalación.

La prensa-cizalla avanzada procesará una amplia variedad de componentes físicos de los reactores, como las hojas de barras de control, los monitores locales de rango de potencia, los canales de escurrimiento, las cortinas de veneno neutrónico y otros componentes varios.

b) Extractor de cojinetes de estelita

Un extractor de cojinetes de estelita (véase la figura 32) es un dispositivo de corte hidráulico accionado por hidroturbina que extrae los cojinetes de estelita y los pasadores en una sola pieza antes de procesar la porción restante de la hoja de control. Un soporte rígido y un cable de seguridad redundante permiten suspender el extractor del borde de la piscina durante el funcionamiento.

El troquel cortante, de 76,2 mm (3 pulgadas) de diámetro, está fijado a un cilindro hidráulico accionado por una unidad motriz hidráulica autónoma de aire comprimido situada sobre la plataforma de recarga. La unidad motriz emplea agua desmineralizada como fluido hidráulico y es capaz de generar hasta 36 t de fuerza en las superficies cortantes.

El trabajo de descontaminación del extractor de cojinetes de estelita es mínimo, gracias a las superficies electropulidas. Además, el troquel cortante puede extraerse y colocarse en una camisa para componentes físicos a fin de cumplir con los criterios ALARA (el valor más bajo que pueda razonablemente alcanzarse) y los requisitos para el transporte.

c) Plegador de hojas de control

El plegador de hojas de control, de accionamiento hidráulico por agua desmineralizada, se utiliza para corrugar la placa de tubos de la hoja de control antes del procesamiento (véase la figura 33). Cada aleta de la hoja de control se pliega en múltiples lugares para lograr que los tubos de B_4C se mantengan intactos durante el procesamiento. La corrugación se efectúa normalmente durante el proceso de extracción de los cojinetes de estelita. El plegador se embala junto con el extractor.

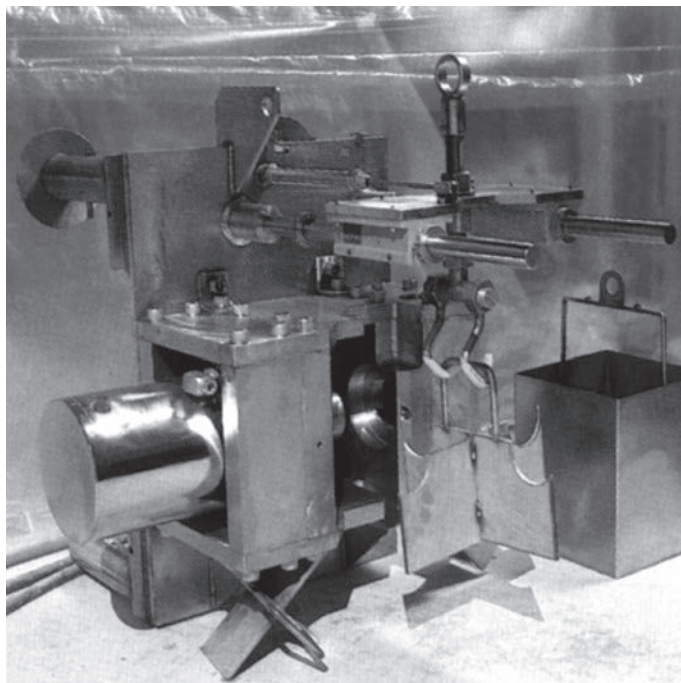


Fig. 32. Extractor de cojinetes de estelita (cortesía de EnergySolutions).

d) Cortador de monitores locales de rango de potencia

Este componente es un cabezal cortador de accionamiento hidráulico que se utiliza para dividir los monitores locales de rango de potencia y los tubos secos en segmentos de longitud aceptable para el embalaje (véase la figura 34). Este cortador utiliza agua desmineralizada como medio hidráulico.

El cortador se manipula a distancia y consiste en un yunque fijo y una hoja móvil que corta los tubos transversalmente. Durante el funcionamiento, el cortador está suspendido del borde de la piscina de combustible gastado con ayuda de un soporte de suspensión, y de varas articuladas de acero inoxidable para la conexión.

Una unidad motriz hidráulica autónoma, de aire comprimido, proporciona al cabezal cortador la presión requerida. La unidad motriz está provista de mangueras hidráulicas y conexiones para el aporte del agua desmineralizada y el aire de servicio.

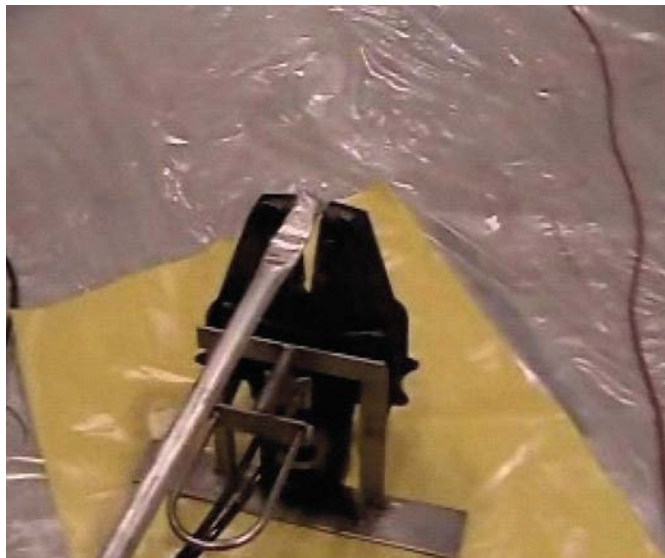


Fig. 33. Plegador de hojas de control (cortesía de EnergySolutions).



Fig. 34. Cortador de monitores locales de rango de potencia (cortesía de EnergySolutions).

e) Equipo de embalaje

Las herramientas para manipular y embalar los componentes físicos irradiados comprenden lo siguiente:

- garfios neumáticos;
- herramientas extensibles manuales y neumáticas;
- llaves inglesas accionadas a distancia;
- luces y sistemas de cámara sumergibles.

Estas herramientas permiten embalar los materiales sometidos a la reducción de volumen con una exposición mínima del personal. Los productos de desecho se colocan en uno de los diferentes tipos de contenedores de desechos que constituyen los cofres o recipientes blindados de transporte. La figura 35 muestra las herramientas y un tipo específico de contenedor de desechos.

6.1.2.3 *Ventajas particulares del sistema*

- El sistema es fiable.
- Los valores de reducción de volumen obtenidos son uniformes.
- El sistema cumple o supera los requisitos referentes a: las cargas pesadas (del Instituto Nacional de Normalización de los Estados Unidos y la NUREG 0612); la exclusión de materiales extraños (controla los materiales en la piscina del combustible gastado); y la química de la piscina (opera con agua desmineralizada).
- El sistema reduce los costos de disposición final y almacenamiento de los desechos resultantes.
- Puede ser accionado a distancia.
- Cuando es necesario, el diseño incluye el uso de blindaje.
- Las superficies cortantes se cambian debido al desgaste y a las tasas de exposición después de cada campaña.

6.1.2.4 *Limitaciones particulares del sistema*

- La prensa-cizalla avanzada fue diseñada específicamente para reducir el volumen de las hojas de control de las centrales de reactores de agua en ebullición de General Electric. Por consiguiente, el sistema no puede procesar elementos de un diámetro superior a 25 cm.
- El grosor del material no puede superar los 12,5 mm.



Fig. 35. Herramientas de manipulación a distancia bajo el agua (izquierda) y contenedor de componentes físicos irradiados (derecha) (cortesía de EnergySolutions).

6.1.2.5 Principales consideraciones para el estudio técnico

Las principales consideraciones para el estudio técnico de los sistemas de reducción de volumen y embalaje de componentes activados se recogen en el cuadro 19.

CUADRO 19. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE REDUCCIÓN DE VOLUMEN Y EMBALAJE DE COMPONENTES ACTIVADOS

Consideración	Descripción
Características de los desechos y materiales tratados (volumen, tipo, actividad, forma)	— Los tipos de corrientes de desechos asociados más comúnmente con el procesamiento de los componentes físicos de las piscinas de combustible irradiado tienen en general una dosis de radiactividad muy alta y están almacenados bajo el agua en la piscina de combustible gastado de las instalaciones de reactores nucleares. — La descripción física de los tipos de cuerpos de desechos comprende las hojas de control, la instrumentación intranuclear, los filtros, los tubos secos, los haces de bombas de chorro, los cojinetes de estelita y otros componentes físicos varios, así como fuentes radiactivas.
Características de los desechos secundarios generados por el proceso (volumen, tipo, actividad, forma)	Los cuerpos de desechos secundarios generados por el proceso se limitan normalmente a los filtros. El volumen y la actividad varían enormemente, según la cantidad de componentes físicos procesados y la calidad del agua de la piscina del combustible gastado. Otros desechos secundarios se relacionan con las medidas de protección radiológica (ropa protectora, suministros de descontaminación).
Características del cuerpo de desechos final (tipo de contenedor, actividad, forma)	— El cuerpo de desechos final es típicamente un cuerpo de metal comprimido o troceado o de metal segmentado de densidad intermedia. — Los factores de reducción de volumen dependen del tipo de desecho, pudiendo fácilmente ser de entre 3 y 5.
Consideraciones jurídicas y reglamentarias (nacionales, locales, internacionales, licencias, explotación, movimientos y transporte de desechos)	— Requisitos para el transporte de equipo contaminado; — Requisitos de caracterización y clasificación de desechos.
Requisitos relacionados con el transporte (explotación del sistema, envíos de desechos, caminos de acceso)	Transporte en un contenedor autónomo SCO o Tipo 7A de $\sim 3 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$.
Modo de uso: procesamiento por lotes o continuo (tipo de sistema, desechos secundarios)	Típicamente, en campañas (por lotes).
Costo: arreglos contractuales (arriendo/compra); instalación periódica (mensual/anual/por campañas/por volumen); artículos fungibles; personal; retirada y disposición final del equipo; expedición; disposición final de los desechos	El equipo móvil de procesamiento y segmentación bajo el agua suele ser caro, ya que ha sido adaptado específicamente para el trabajo en inmersión en piscinas de combustible de dosis altas. La construcción y el mantenimiento requieren una inversión de dinero sustancial, por lo que normalmente se arrienda para una campaña de procesamiento. Además, este equipo debe viajar acompañado de otros contenedores o cofres blindados de actividad alta que puedan ser sumergidos (entre otras cosas, para la carga y la descarga). La compra de este tipo de equipo también es posible, pero es poco frecuente.

CUADRO 19. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE REDUCCIÓN DE VOLUMEN Y EMBALAJE DE COMPONENTES ACTIVADOS (cont.)

Consideración	Descripción
Configuración del sistema (móvil o montado sobre plataforma)	— Móvil o montado sobre plataforma; — Instalado lo más cerca posible o dentro de la piscina del combustible gastado o la zona de recepción; — Deben preverse tiempos de instalación de entre 1 y 2 semanas.
Superficie en la base o tamaño físico del sistema móvil (dimensiones máximas, espacio para la manipulación/sustitución/ reparación de los medios)	— El espacio ocupado en la piscina por los distintos componentes va de 1 m o menos de longitud en el borde (herramientas en suspensión) a una base de 3 m × 3 m en el fondo de la piscina. — Las plataformas de control requieren una superficie adicional de 4 m × 4 m adyacente a la piscina. — Extractor de cojinetes de estelita: 0,3 m × 0,66 m × 0,3 m. — Cortador de monitores locales de rango de potencia: 0,3 m × 0,3 m × 1,8 m.
Peso total (carga de los pisos y movimientos)	— Prensa-cizalla avanzada en la piscina: 4100 kg. — Extractor de cojinetes de estelita: 340 kg. — Cortador de monitores locales de rango de potencia: 295 kg.
Personal requerido (número de operadores, personal por contrata, cualificaciones técnicas, operaciones, seguridad física, mantenimiento)	— El personal requerido para el sistema de procesamiento bajo el agua de los componentes físicos irradiados en la piscina del combustible se limita típicamente a un operador muy capacitado y especializado en manipulación de materiales, que carga y descarga los componentes irradiados, y un operador jefe del sistema, que maneja el equipo. — Además de las operaciones de control del sistema y de seguridad industrial, se requiere normalmente capacitación especial en el trabajo con tasas de dosis altas. — Con respecto al mantenimiento, se necesitan competencias técnicas en hidráulica y otras habilidades mecánicas para mantener las operaciones del sistema.
Capacidad y rendimiento máximos u óptimos, y reducción de volumen	— Las tasas de procesamiento varían, según los componentes físicos de que se trate y las limitaciones operacionales que existan. — La prensa-cizalla avanzada puede procesar componentes de hasta 254 mm de diámetro o 228 mm cuadrados, y de prácticamente cualquier longitud. — La unidad motriz de la prensa-cizalla avanzada genera 100 t de fuerza en el yunque de compresión y en la hoja de cizalla. — Los factores de reducción de volumen dependerán del tipo de desechos, pudiendo fácilmente ser de entre 3 y 5.
Necesidades de espacio (zona de almacenamiento de artículos fungibles, espacio de aparcamiento transitorio y almacenamiento de desechos)	Las necesidades de espacio para artículos fungibles son mínimas. Para el aparcamiento transitorio de los contenedores de desechos antes y después del procesamiento se requieren normalmente entre 15 y 30 m ² .
Lista de los artículos fungibles necesarios para el proceso (medios, contenedores, piezas, productos químicos)	Medios de los filtros de cartucho para el sistema de captura del material particulado.

CUADRO 19. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE REDUCCIÓN DE VOLUMEN Y EMBALAJE DE COMPONENTES ACTIVADOS (cont.)

Consideración	Descripción
Necesidades de servicios generales (aire, agua, vapor, electricidad, ventilación)	— Energía eléctrica: 480 V, CA, trifásica, 50 A; 120 V, CA, 20 A, monofásica (el sistema puede modificarse para funcionar con 380 V, CA, y 50 Hz). — Aire de servicio: 0,7 MPa como mínimo. — Agua: agua desmineralizada, <400 L. — Ventilación: ningún sistema adicional al de la planta.
Equipo de manipulación para la colocación, el procesamiento, y la manipulación y el embalaje de los desechos (grúas, horquillas elevadoras, capacidad de carga)	El equipo se carga y coloca en la piscina del combustible con un puente grúa (no incluido en el equipo del sistema móvil). Los artículos de desecho se cargan y descargan del equipo mediante un polipasto y una grúa. A menudo se utilizan montacargas de horquilla para transportar los bidones que entran al sistema y los bidones de sobreembalaje que salen de él.
Requisitos generales de seguridad industrial y radiológica (barreras, protección respiratoria, monitorización de la exposición del personal, controles de la contaminación, monitorización del aire)	— Los requisitos generales de protección del personal durante las operaciones incluyen el uso de ropa de protección radiológica estándar, dosimetría y protección de seguridad industrial (por ejemplo, gafas de protección y calzado de seguridad). — Normalmente no se requiere protección respiratoria, salvo en las raras ocasiones en que se descontamina el equipo.

6.1.3 Vitricación del suelo *in situ*

6.1.3.1 Descripción de un sistema típico

La vitricación *in situ* es un proceso de tratamiento térmico móvil disponible en el comercio que entraña la electrofusión de suelos, lodos u otros materiales, desechos y escombros contaminados a fin de destruir permanentemente, extraer o inmovilizar los contaminantes peligrosos y radiactivos [34, 35]. El proceso se aplica a todos los tipos de suelos y todas las clases de contaminantes, incluidos los compuestos orgánicos, los metales pesados y los radionucleidos. La vitricación *in situ* es un proceso discontinuo, que forma un charco de suelo fundido bajo la superficie en la zona de tratamiento, entre una red de electrodos (véanse las figuras 36 y 37).

El suelo fundido es el elemento calefactor del proceso, en que la energía eléctrica que lo atraviesa se convierte en calor por efecto Joule. Las temperaturas de fusión de la vitricación *in situ* se sitúan normalmente entre 1500 y 2000 °C. El bombeo continuo de energía profundiza y ensancha la porción de suelo fundido, hasta que se haya tratado el volumen deseado. Cuando se corta el suministro de energía eléctrica, la masa fundida se solidifica formando un monolito vítreo, con propiedades físicas, químicas y de meteorización particulares, imposibles de alcanzar con las otras tecnologías de solidificación y estabilización. En las operaciones comerciales se forman charcos de suelo fundido de hasta 7 m de profundidad y 15 m de diámetro. Los volúmenes grandes de materiales contaminados que requieren más de una operación de fusión se tratan fundiendo una serie de porciones de suelo adyacentes, lo que conduce a la formación de un gran monolito continuo. El proceso funciona sin interrupción y puede alcanzar tasas de tratamiento de hasta 150 t/d.

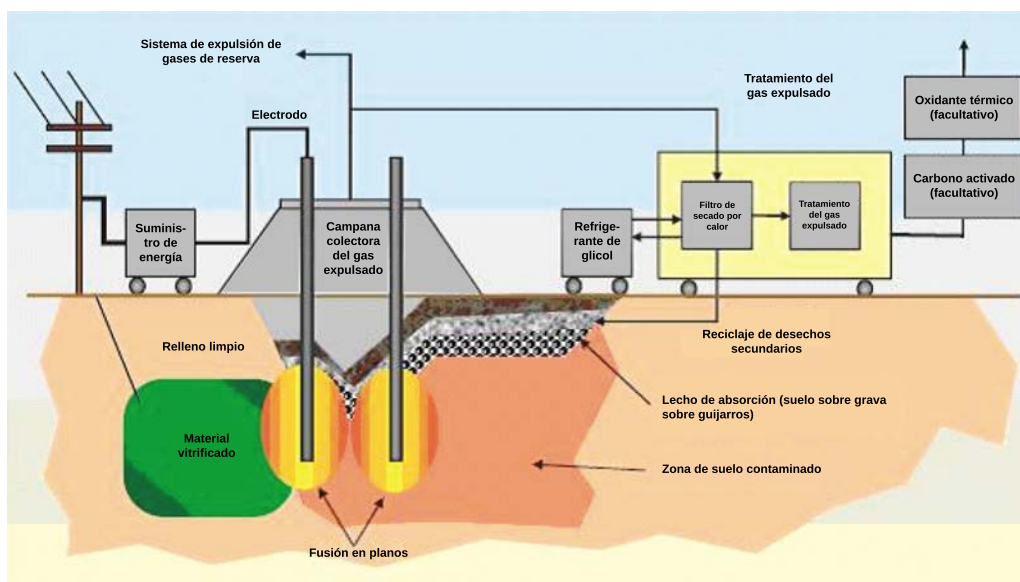


Fig. 36. Esquema del proceso de vitrificación *in situ*.



Fig. 37. Fotografía de un monolito vitrificado obtenido por vitrificación *in situ* (imagen tomada de la referencia [34]).

6.1.3.2 Descripción de los componentes y elementos

El sistema de tratamiento por vitrificación *in situ* consiste en un transformador de energía eléctrica, una campana colectora del gas expulsado, un sistema de tratamiento de ese gas y un sistema de control del proceso. Todo el equipo está montado en un remolque, salvo la campana colectora del gas, que se transporta al emplazamiento y se monta *in situ*. Esta campana recoge las emisiones que emanan de la zona de tratamiento y sostiene los electrodos de grafito utilizados en el proceso de fusión. La campana es una estructura abovedada que cubre completamente la zona tratada. El mantenimiento de un ligero vacío dentro de la campana retiene el gas expulsado, que se canaliza luego hacia el sistema de tratamiento correspondiente. Este sistema consta de un enfriador, un depurador, un desnebulizador, un calefactor, un filtro de partículas, un adsorbente de carbono activado, un ventilador aspirante y, facultativamente, una unidad de oxidación térmica. El gas expulsado se somete primero a un enfriamiento brusco, para bajar su temperatura, y a una depuración, para extraer los gases ácidos y el material particulado grande.

A continuación se deshidrata y se vuelve a calentar, para evitar la humidificación de los filtros de partículas. Luego se filtra para extraer el material particulado fino, y por último se trata con un adsorbente de carbono activado o en una unidad de oxidación térmica para eliminar las trazas de compuestos orgánicos. Un transformador de energía eléctrica suministra a los electrodos una corriente alterna bifásica de un voltaje y amperaje adecuados. El sistema completo de vitrificación *in situ* se vigila desde una sala de control del proceso, donde se observan y monitorizan el consumo de energía de los electrodos, la temperatura del gas expulsado, el vacío de la campana y otros parámetros del sistema.

Hay información sobre una modificación de este método que se basa en la vitrificación *in situ* convencional y emplea esencialmente el mismo sistema de alimentación eléctrica y los mismos controles del gas expulsado. La fusión ‘en planos’ utiliza vías de arranque inyectadas en una serie de agujeros muy cercanos entre sí perforados a lo largo de la zona que se ha de tratar —en planos a ambos lados de los desechos o por encima y por debajo de estos— hasta la convergencia de las dos porciones fundidas. Dado que la fusión en planos se realiza por lo general enteramente bajo la superficie, este método permite tratar zonas más profundas sin que aumenten las necesidades de energía. De hecho, el suelo no fundido que se encuentra sobre la zona de tratamiento actúa como aislante térmico, conservando la energía en la profundidad en que ocurre la fusión y manteniendo una temperatura mucho más baja en el equipo de la superficie. La fusión en planos puede aplicarse desde los costados de tanques enterrados, y es ideal para zonas de tratamiento estrechas, como las zanjas.

6.1.3.3 Ventajas particulares del sistema

- Disposición final *in situ*;
- Aplicabilidad a materiales peligrosos tanto radiactivos como convencionales;
- Baja exposición del personal;
- Tasa de lixiviación muy baja de la matriz de desechos (vidrio);
- Fácil descontaminación y desmovilización.

6.1.3.4 Limitaciones particulares del sistema

- El costo es alto;
- La vitrificación *in situ* está sujeta a un marco regulador complejo;
- El tratamiento del gas expulsado es complicado.

6.1.3.5 Principales consideraciones para el estudio técnico

Las principales consideraciones para el estudio técnico de los sistemas de vitrificación *in situ* se recogen en el cuadro 20.

CUADRO 20. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE VITRIFICACIÓN <i>IN SITU</i>	
Consideración	Descripción
Características de los desechos y materiales tratados (volumen, tipo, actividad, forma)	— Suelos radiactivos (<i>in situ</i>); — Actividad: sin limitaciones, salvo para los elementos que producen radionucleidos volátiles (como el Cs).
Consideraciones jurídicas y reglamentarias (nacionales, locales, internacionales, licencias, explotación, movimientos y transporte de desechos)	— Líquidos depuradores; — Filtros gastados; — Desechos de la descontaminación; — Desechos sólidos que pueden reciclarse en fusiones ulteriores.

CUADRO 20. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE VITRIFICACIÓN *IN SITU* (cont.)

Consideración	Descripción
Características del cuerpo de desechos final (tipo de contenedor, actividad, forma)	— Bloques vitrificados de hasta 1200 t, diámetro máximo de 12 m, altura máxima de 7 m; — Actividad ilimitada, porque el cuerpo es típicamente entre 5 y 100 veces más duradero que los vidrios borosilicatados.
Consideraciones jurídicas y reglamentarias (nacionales, locales, concesión de licencias, explotación, desplazamiento y transporte de desechos)	Puede haber reglamentación local, regional y nacional que regule el transporte, las operaciones, la monitorización de los efluentes, el control y la disposición final de los desechos.
Requisitos relacionados con el transporte (explotación del sistema, envíos de desechos, caminos de acceso)	Cuatro remolques y equipo elevador.
Modo de uso: procesamiento por lotes o continuo (tipo de sistema, desechos secundarios)	Procesamiento por lotes.
Costo: arreglos contractuales (arriendo/compra); instalación periódica (mensual/anual/por campañas/por volumen); artículos fungibles; personal; retirada y disposición final del equipo; expedición; disposición final de los desechos	— Costo fijo de movilización de entre 40 000 y 80 000 dólares de los Estados Unidos y costo de explotación de entre 450 y 900 dólares/m³ (valores del decenio de 1990). — El rango de costos estimado no incluye los costos indirectos como la dirección del proyecto, la labor de diseño e ingeniería, la selección del proveedor, el apoyo desde la sede principal, la preparación de los permisos y los honorarios, la interacción reglamentaria, la caracterización del emplazamiento, los ensayos de tratabilidad, la fianza de cumplimiento y los imprevistos. — 2 a 3 semanas para la movilización y otras tantas para la desmovilización.
Configuración del sistema (móvil o montado sobre plataforma)	Una parte es móvil y la otra está montada sobre una plataforma.
Superficie en la base o tamaño físico del sistema móvil (dimensiones máximas, espacio para la manipulación/sustitución/ reparación de los medios)	— >30 m × 12 m; — Campana colectora del gas expulsado: >150 m².
Peso total (carga de los pisos y movimientos)	> 100 t.
Personal requerido (número de operadores, personal por contrata, cualificaciones técnicas, operaciones, seguridad física, mantenimiento)	Dos personas para la operación.
Capacidad y rendimiento máximos u óptimos, y reducción de volumen	— De 3 a 6 t/h; — Hasta 1200 t/fusión; — Reducción de volumen de un 25 % a un 50 % para los suelos; de hasta un 75 % para los lodos húmedos y los desechos combustibles.

CUADRO 20. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE VITRIFICACIÓN *IN SITU* (cont.)

Consideración	Descripción
Necesidades de espacio (zona de almacenamiento de artículos fungibles, espacio de aparcamiento transitorio y almacenamiento de desechos)	> 150 m ² .
Lista de los artículos fungibles necesarios para el proceso (medios, contenedores, piezas, productos químicos)	Para una operación: — 150 t de grava (de uso repetido); — Agua (para los depuradores); — Filtros HEPA; — Electroodos.
Necesidades de servicios generales (aire, agua, vapor, electricidad, ventilación)	— Energía eléctrica: hasta 11 a 13,8 kV, trifásica; 900 a 3500 kW (0,5 a 0,8 kW·h por kg de material vitrificado). — Agua no potable.
Equipo de manipulación para la colocación, el procesamiento, y la manipulación y el embalaje de los desechos (grúas, horquillas elevadoras, capacidad de carga)	Horquilla elevadora y grúas de 35 t y 125 t.
Requisitos generales de seguridad industrial y radiológica (barreras, protección respiratoria, monitorización de la exposición del personal, controles de la contaminación, monitorización del aire)	— Ningún requisito especial; — Controles radiológicos determinados por los requisitos del emplazamiento, pudiendo incluir mediciones, barreras, bermas/muros de protección y la monitorización de los efluentes.

Nota: Filtro HEPA — filtro de aire particulado de alta eficiencia.

6.2 FUENTES SELLADAS EN DESUSO

6.2.1 Desmantelamiento y embalaje de fuentes en desuso de actividad alta

6.2.1.1 Descripción de un sistema típico

El OIEA ofrece a los Estados Miembros una instalación móvil de celda caliente para el acondicionamiento de las fuentes radiactivas en desuso de actividad alta. Los dispositivos en desuso se desmontan dentro de la celda caliente, y las fuentes se retiran y embalan. Una vez terminada la operación de acondicionamiento, la instalación puede transportarse a otro lugar en que se necesite. Esta instalación permite manipular y acondicionar las fuentes radiactivas en desuso de actividad alta en los Estados Miembros que no tienen una infraestructura apropiada para esas operaciones [36 a 38].

La instalación consta de un escudo biológico, con una ventana para ver el trabajo realizado en su interior (véase la figura 38). Utiliza manipuladores maestro-esclavo (MSM) y una grúa interna para manipular e izar diversos objetos dentro de la celda. Otra grúa, en el exterior, permite introducir o retirar los objetos pesados del escudo biológico. Un sistema de ventilación mantiene una presión negativa dentro de la celda, para evitar la propagación de la posible contaminación. El contenedor de almacenamiento a largo plazo de la fuente radiactiva en desuso de actividad alta se acopla a la pared del escudo biológico, para facilitar la retirada segura de las fuentes de la celda.



Fig. 38. Celda caliente móvil para el acondicionamiento de fuentes selladas de actividad alta.

6.2.1.2 Descripción de los componentes y elementos

- a) **Escudo biológico:** Esta es la pared de la celda en que se realiza la manipulación de las fuentes sin blindaje. Está diseñada para trabajar con niveles de radiación de hasta el equivalente de una fuente de ^{60}Co de 37 TBq (1000 Ci) por vez. El escudo biológico constituye la plataforma en que se montan los otros componentes de la instalación de acondicionamiento. Está constituido por una doble pared con una cavidad de 1,55 m de ancho, rellena de arena como material de blindaje. El volumen útil del escudo biológico es de 2,5 m de longitud, 1,6 m de anchura y 3,0 m de altura, lo que proporciona un espacio suficiente para la fuente blindada en desuso de actividad alta, el libre movimiento de los manipuladores y la grúa interna.
- b) **Mesa de trabajo:** Una mesa, que abarca todo el espacio interno de la celda a 800 mm del piso, ofrece una superficie de trabajo. Su altura es regulable, para brindar una mejor vista de la zona de operaciones.
- c) **Techo del escudo biológico:** El techo del escudo biológico está diseñado para limitar el efecto de la ‘radiación de cielo’ a niveles aceptables. La abertura superior sirve también de entrada para el personal y el equipo. El techo es básicamente una cubierta que debe colocarse antes de manipular una fuente sin blindaje. Consta de tres losas de hormigón de 230 mm de grosor con protectores esquineros de acero dulce y barras de refuerzo estándar.
- d) **Ventana:** La finalidad de la ventana es ofrecer al personal una visión suficiente de la zona de operaciones, con un blindaje equivalente al que proporcionan las paredes del escudo. La ventana se compone de un espacio interno lleno de un líquido pesado transparente (una solución de bromuro de cinc al 50 %), circundado por paneles transparentes.
- e) **Manipuladores maestro-esclavo:** Estos son manipuladores telescópicos capaces de levantar pesos de hasta 20 kg.
- f) **Grúas:** Una grúa interna eleva los objetos que son demasiado pesados para los manipuladores maestro-esclavo, como los cajones con fuentes de teleterapia o irradiadores de sangre. Es una grúa giratoria montada en la pared interna del escudo biológico. La grúa externa es una grúa pórtico, con cuatro grandes ruedas de caucho que permiten su desplazamiento sobre superficies planas.

- g) **Sistema de ventilación:** Todas las posibles fuentes de contaminación aerotransportada quedan atrapadas en los filtros HEPA. El sistema de ventilación es un sistema autónomo que consta de un ventilador, filtros previos provistos de supresores de llama, filtros HEPA y una manguera de escape. El sistema mantiene en la celda una presión interna de 200 Pa, con cinco renovaciones de aire por hora.
- h) **Cofre blindado de almacenamiento a largo plazo:** Este es un recipiente basado en el diseño de un contenedor de transporte ya existente y compatible con él. Está concebido para un período de duración de 75 años, con un blindaje que permite manipularlo sin necesidad de protección adicional.

6.2.1.3 Ventajas particulares del sistema

- Permite la retirada de fuentes β/γ en desuso de actividad alta de sus respectivos blindajes, y su acondicionamiento para un almacenamiento a largo plazo en condiciones de seguridad tecnológica y física.

6.2.1.4 Limitaciones particulares del sistema

- Debido al riesgo radiológico elevado de la manipulación de fuentes radiactivas de actividad alta, las operaciones de desmantelamiento y acondicionamiento deben ser realizadas por personal local bien capacitado o por un grupo especializado enviado desde el extranjero.
- El cofre blindado de almacenamiento a largo plazo debe estar certificado como contenedor de transporte, para que sea posible su repatriación o su transporte a un emplazamiento de disposición final operativo, cuando exista, sin necesidad de un acondicionamiento adicional.

6.2.1.5 Principales consideraciones para el estudio técnico

Las principales consideraciones para el estudio técnico de los sistemas de desmantelamiento y embalaje de fuentes en desuso se recogen en el cuadro 21.

CUADRO 21. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE DESMANTELAMIENTO Y EMBALAJE DE FUENTES EN DESUSO

Consideración	Descripción
Características de los desechos y materiales tratados (volumen, tipo, actividad, forma)	Fuentes radiactivas β/γ selladas en desuso de actividad alta, hasta el equivalente de una fuente de ^{60}Co de 37 TBq (1000 Ci).
Características de los desechos secundarios generados por el proceso (volumen, tipo, actividad, forma)	La producción previsible de desechos secundarios será pequeña, a menos que una fuente tenga pérdidas. Si durante las operaciones de desmantelamiento se descubre que una fuente tiene pérdidas, deberá interrumpirse el trabajo. La unidad se cerrará y se adoptarán nuevas disposiciones para proteger el cabezal o la unidad con un sobreembalaje especial. Esto será organizado por el OIEA.
Características del cuerpo de desechos final (tipo de contenedor, actividad, forma)	La fuente queda acondicionada para un almacenamiento a largo plazo de hasta 75 años.

CUADRO 21. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE DESMANTELAMIENTO Y EMBALAJE DE FUENTES EN DESUSO (cont.)

Consideración	Descripción
Consideraciones jurídicas y reglamentarias (nacionales, locales, internacionales, licencias, explotación, movimientos y transporte de desechos)	El usuario final: — preparará y efectuará la solicitud de toda licencia, permiso o autorización que se requiera para la operación de acondicionamiento; — preparará y efectuará la solicitud de toda licencia, permiso o autorización que se requiera para almacenar las fuentes acondicionadas en una instalación de almacenamiento local; — prestará asistencia en el despacho de aduana de todo el equipo y las herramientas necesarios; — se hará cargo de la manipulación, el almacenamiento o la disposición final de todo material radiactivo o no radiactivo generado por la operación; — definirá y aplicará las disposiciones de seguridad física para proteger a las personas y el equipo durante la operación; — informará al órgano regulador de los resultados de la operación al término de esta.
Requisitos relacionados con el transporte (explotación del sistema, envíos de desechos, caminos de acceso)	— Traslado de la fuente al lugar de las operaciones; — Preparación de un camino de acceso al lugar de las operaciones que permita el fácil movimiento de vehículos grandes; — Disposiciones para el transporte del personal del contratista.
Modo de uso: procesamiento por lotes o continuo (tipo de sistema, desechos secundarios)	Procesamiento por lotes.
Costo: arreglos contractuales (arriendo/compra); instalación periódica (mensual/anual/por campañas/por volumen); artículos fungibles; personal; retirada y disposición final del equipo; expedición; disposición final de los desechos	El costo variará según las condiciones locales, pero correrá a cargo del OIEA.
Configuración del sistema (móvil o montado sobre plataforma)	Montado sobre plataforma; deberá construirse una losa de hormigón de 120 mm de grosor (7,6 m × 8 m) con refuerzo de acero y perfectamente nivelada (horizontal).
Superficie en la base o tamaño físico del sistema móvil (dimensiones máximas, espacio para la manipulación/sustitución/ reparación de los medios)	15 m × 30 m.
Peso total (carga de los pisos y movimientos)	30 a 40 t.
Personal requerido (número de operadores, personal por contrata, cualificaciones técnicas, operaciones, seguridad física, mantenimiento)	— La operación es realizada por el contratista (una cuadrilla de cinco personas). — Se necesitan al menos 10 trabajadores locales que ayuden al contratista durante el montaje y desmontaje. — Se necesitan al menos dos operadores altamente especializados que hayan recibido capacitación en el uso de los manipuladores.

CUADRO 21. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE DESMANTELAMIENTO Y EMBALAJE DE FUENTES EN DESUSO (cont.)

Consideración	Descripción
Capacidad y rendimiento máximos u óptimos, factor de descontaminación y reducción de volumen	4 a 8 fuentes por día, según el tipo de fuente.
Necesidades de espacio (zona de almacenamiento de artículos fungibles, espacio de aparcamiento transitorio y almacenamiento de desechos)	7 m × 15 m.
Lista de los artículos fungibles necesarios para el proceso (medios, contenedores, piezas, productos químicos)	Artículos fungibles: — herramientas para desmontar los cabezales de teleterapia, construir y desmantelar el escudo biológico, y otras aplicaciones generales; — varillas de soldar; — 90 m³ de arena de río no tamizada para el escudo biológico; — una botella de gas Ar para soldar de alta pureza (99,999 %); — contenedores para los desechos domésticos y para los posibles desechos radiactivos (por ejemplo, cubos de la basura). Deberá preverse asimismo el siguiente equipo adicional: — equipo de soldadura totalmente automático; — equipo para ensayos de estanqueidad; — equipo de protección radiológica; — equipo de carga de arena; — contenedor de transporte; — vibradores; — aspiradora.
Necesidades de servicios generales (aire, agua, vapor, electricidad, ventilación)	— Agua corriente; — Energía eléctrica trifásica.
Equipo de manipulación para la colocación, el procesamiento, y la manipulación y el embalaje de los desechos (grúas, horquillas elevadoras, capacidad de carga)	Una grúa (de 3 a 5 t de capacidad) para el desplazamiento de las unidades y de las fuentes desde los respectivos depósitos y contenedores.
Requisitos generales de seguridad industrial y radiológica (barreras, protección respiratoria, monitorización de la exposición del personal, controles de la contaminación, monitorización del aire)	Ropa de protección personal y otros medios de control definidos por el emplazamiento en cuestión.

7 SISTEMAS DE CARACTERIZACIÓN DE DESECHOS

La caracterización de los desechos es una actividad esencial en cada etapa de la gestión de desechos radiactivos. Supone determinar las propiedades físicas, químicas y radiológicas de los desechos para decidir si requieren algún nuevo ajuste, tratamiento o acondicionamiento, y si son aptos para su ulterior manipulación, procesamiento, almacenamiento o disposición final [39, 40]. Existe una amplia variedad de técnicas destructivas y no destructivas para caracterizar los desechos en bruto, los cuerpos de desechos y los bultos de desechos. En esta sección se presentan una breve descripción y los principales elementos

de un análisis no destructivo realizado con los sistemas de gammagrafía empleados comúnmente en una configuración móvil para caracterizar los bultos de desechos. También existen sistemas móviles que utilizan la valoración neutrónica activa y pasiva para la determinación de los isótopos transuránicos [41].

7.1 ANÁLISIS NO DESTRUCTIVO

7.1.1 Sistema de gammagrafía

7.1.1.1 Descripción de un sistema típico

Los sistemas móviles de gammagrafía disponibles en el mercado son muy variados, pero típicamente consisten ya sea en un sistema detector rotatorio o en un módulo de mesa giratoria en que los que rotan son los bultos de desechos. Un aparato de gammagrafía, como el de gammagrafía tomográfica (TGS) ilustrado en la figura 39, mide la radiación γ emitida por los isótopos presentes en los bultos de desechos; los isótopos normales de interés son el ^{60}Co y el ^{137}Cs . Estos isótopos son relativamente ‘fáciles de medir’ y se emplean para estimar los radioisótopos ‘difíciles de medir’ aplicando el método del factor de escala [42]. Una caracterización completa de los desechos radiactivos requiere normalmente un análisis destructivo para determinar la correlación entre los emisores γ fáciles de medir y los emisores α o β . El TGS es una extensión del aparato de gammagrafía segmentada de uso más común, que permite medir bultos con un contenido heterogéneo de desechos.

Otra opción disponible se basa en una exploración integral del objeto. Este sistema de medición utiliza un equipo físico menos complicado (véase la figura 40). El detector, fijado junto al bidón que se desea analizar, mide, de una sola vez, la emisión total de los desechos contenidos en el bidón.

Otros sistemas parecidos están instalados dentro de un contenedor ISO estándar de 6 m, listos para ser transportados por carretera hasta el emplazamiento y provistos de todos los accionadores electromecánicos necesarios para la automatización del proceso (introducción del bidón, posicionamiento en la estación de pesaje, posicionamiento en la estación de medición, salida del bidón) (véase la figura 41).

7.1.1.2 Descripción de los componentes y elementos

- Un detector con un módulo de accionamiento;
- Un módulo de mesa giratoria para colocar los bidones;
- Un sistema de control del mecanismo;
- Los programas informáticos y los sistemas electrónicos;
- Un contenedor ISO estándar de 6 m;
- Un transportador de rodillos para la entrada y salida de los bidones;
- Un sistema automático controlado por un PLC para el posicionamiento de los bidones;
- Una estación de pesaje.

7.1.1.3 Ventajas particulares del sistema

- Es una solución de análisis no destructivo;
- El tamaño es pequeño;
- Puede manejarse manualmente o a distancia;
- Puede acoplarse con equipo móvil para la reducción de volumen o el acondicionamiento *in situ*.

7.1.1.4 Limitaciones particulares del sistema

- Mide un número limitado de isótopos; sin embargo, según las características de los desechos que se deban medir, podrá utilizarse un detector con un rango de energías diferente.



Fig. 39. Aparato de gammagrafía tomográfica WM2900 (cortesía de CANBERRA).



Fig. 40. Sistema móvil de análisis ISO-CART (cortesía de ORTEC).



Fig. 41. Sistema móvil de análisis gamma (cortesía de Nucleco).

7.1.1.5 Principales consideraciones para el estudio técnico

Las principales consideraciones para el estudio técnico de los sistemas de caracterización de desechos por determinación de la radiación gamma se recogen en el cuadro 22.

CUADRO 22. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE CARACTERIZACIÓN DE DESECHOS POR DETERMINACIÓN DE LA RADIACIÓN GAMMA

Consideración	Descripción
Características de los desechos y materiales tratados (volumen, tipo, actividad, forma)	Esta tecnología se aplica al embalaje de desechos líquidos y sólidos en bidones o cajas, o incluso en tuberías, botellas, pisos, paredes y suelos.
Características de los desechos secundarios generados por el proceso (volumen, tipo, actividad, forma)	Ningún desecho secundario previsto.
Características del cuerpo de desechos final (tipo de contenedor, actividad, forma)	Ningún cambio en el cuerpo del desecho entre antes y después del proceso de medición.
Consideraciones jurídicas y reglamentarias (nacionales, locales, internacionales, licencias, explotación, movimientos y transporte de desechos)	Ningún requisito de licencia especial.
Requisitos relacionados con el transporte (explotación del sistema, envíos de desechos, caminos de acceso)	Transporte convencional.
Modo de uso: procesamiento por lotes o continuo (tipo de sistema, desechos secundarios)	Procesamiento discontinuo (por bidones o bultos de desechos) o continuo, en el caso de los contenedores ISO de 6 m.
Costo: arreglos contractuales (arriendo/compra); instalación periódica (mensual/anual/por campañas/por volumen); artículos fungibles; personal; retirada y disposición final del equipo; expedición; disposición final de los desechos	Costo bajo, en comparación con los costos de transporte que entrañaría la caracterización en una instalación fija de gestión de desechos.

CUADRO 22. PRINCIPALES CONSIDERACIONES PARA EL ESTUDIO TÉCNICO DE LOS SISTEMAS DE CARACTERIZACIÓN DE DESECHOS POR DETERMINACIÓN DE LA RADIACIÓN GAMMA (cont.)

Consideración	Descripción
Configuración del sistema (móvil o montado sobre plataforma)	Móvil o montado sobre plataforma.
Superficie en la base o tamaño físico del sistema móvil (dimensiones máximas, espacio para la manipulación/sustitución/repación de los medios)	Variable, entre aproximadamente 4 y 15 m ³ , o las dimensiones de un contenedor ISO estándar de 6 m.
Peso total (carga de los pisos y movimientos)	Variable, entre 500 y 3000 kg.
Personal requerido (número de operadores, personal por contrata, cualificaciones técnicas, operaciones, seguridad física, mantenimiento)	Un operador cualificado, y un profesional para procesar los datos. En algunos casos, una misma persona podría cumplir las dos tareas.
Capacidad y rendimiento máximos u óptimos, factor de descontaminación y reducción de volumen	— Por lo general, los sistemas de exploración integral tienen períodos de ciclo de 10 min, y los aparatos de gammagrafía segmentada pueden necesitar hasta 1 h por bidón. — Los tiempos se ven afectados por diversas variables, como los niveles de radiación de fondo, el contenedor y los materiales de desecho, y el nivel más bajo de actividad que se desea medir.
Necesidades de espacio (zona de almacenamiento de artículos fungibles, espacio de aparcamiento transitorio y almacenamiento de desechos)	Espacio para el funcionamiento en el interior.
Lista de los artículos fungibles necesarios para el proceso (medios, contenedores, piezas, productos químicos)	Nitrógeno líquido para los detectores.
Necesidades de servicios generales (aire, agua, vapor, electricidad, ventilación)	Electricidad de bajo voltaje (110/220 V, CA).
Equipo de manipulación para la colocación, el procesamiento, y la manipulación y el embalaje de los desechos (grúas, horquillas elevadoras, capacidad de carga)	Posiblemente, horquillas elevadoras para mover los bidones.
Requisitos generales de seguridad industrial y radiológica (barreras, protección respiratoria, monitorización de la exposición del personal, controles de la contaminación, monitorización del aire)	En general, medios estándar de protección radiológica y de seguridad industrial.

8 CONCLUSIONES

Esta publicación ofrece información sobre los sistemas móviles que desde hace un tiempo se están utilizando en medida creciente para las aplicaciones de procesamiento de desechos radiactivos. Los ejemplos presentados comprenden algunas de las tecnologías de uso más común en las aplicaciones móviles y abarcan todas las formas de procesamiento de desechos, como la descontaminación, la filtración y el intercambio iónico, el hormigonado, la fijación polimérica de las resinas de intercambio iónico y la supercompactación. Estos sistemas están ahora disponibles en el mercado y pueden adquirirse de numerosos proveedores, o ser fabricados por encargo para atender necesidades específicas. Muchos de los nuevos sistemas móviles que han sido ensayados o desplegados en los últimos años podrían estar disponibles en el comercio en el futuro próximo. Vale la pena mencionar que los nuevos diseños de centrales nucleares (como los de la generación III+) están haciendo un uso creciente de sistemas móviles para el procesamiento de los desechos.

La tendencia a un mayor uso de sistemas móviles obedece a diversos factores, entre ellos:

- la conveniencia de evitar el transporte de los desechos fuera del emplazamiento, trasladando la tecnología de procesamiento al lugar en que se producen los desechos;
- las posibilidades de gestionar los desechos por campañas, en los casos en que múltiples instalaciones generan corrientes de desechos parecidas (como ocurre, por ejemplo, con el proceso de fijación de resinas gastadas en Francia o con la inmovilización de fuentes radiactivas selladas en desuso en la Federación de Rusia);
- las posibilidades de ensamblar y poner a prueba estos sistemas en la fábrica, instalarlos sin dificultad en el emplazamiento y sustituirlos o mejorarlos fácilmente con técnicas y procesos más avanzados;
- las posibilidades de aprovechar los servicios de proveedores experimentados en el procesamiento de ciertas corrientes de desechos radiactivos.

Hay casos con circunstancias particulares en que los sistemas móviles tienen claras ventajas, por ejemplo:

- a) cuando se requieren soluciones específicas basadas en una combinación de técnicas para tratar un volumen menor de desechos problemáticos no ordinarios;
- b) en situaciones de accidente o incidente, cuando es preciso desplegar sistemas en una emergencia;
- c) en los procesos de clausura, cuando no es el caso de construir nuevas instalaciones nucleares permanentes, como una instalación de procesamiento de desechos.

Esta publicación ofrece una recopilación sistemática de información y ejemplos de los sistemas de procesamiento móviles desplegados para el tratamiento previo, el tratamiento, el acondicionamiento, el tratamiento combinado con el acondicionamiento, y la caracterización de los desechos. Se presentan diversos ejemplos del procesamiento móvil de desechos sólidos, líquidos, gaseosos y multifásicos, para dar una idea de la aplicación real de los sistemas móviles. En cada ejemplo, la información comprende descripciones de un sistema típico y de sus componentes, y las ventajas y limitaciones particulares del sistema. Los principales factores que deberán tomarse en consideración para evaluar la aplicabilidad de cada sistema móvil se presentan en un cuadro normalizado.

La decisión de utilizar un sistema móvil en lugar de uno fijo situado dentro o fuera del emplazamiento requiere el uso de un enfoque iterativo, a fin de seleccionar la opción de procesamiento más adecuada para la aplicación de que se trate, determinar las posibles ventajas de un sistema móvil con respecto a una instalación fija y evaluar la viabilidad de su despliegue.

En esta publicación se propone una metodología para evaluar la posibilidad de utilizar un sistema móvil de procesamiento de desechos y para adoptar las decisiones que permitirán seleccionar un sistema que sea posible aplicar. La metodología ilustra los dos pasos distintos de la ejecución de la

evaluación iterativa. El paso 1 comprende la evaluación de todos los factores técnicos y no técnicos pertinentes, incluidos los objetivos del procesamiento, el marco regulador, los requisitos de seguridad, las características de la corriente de desechos, la selección y el estudio técnico de las tecnologías, la reglamentación de transporte, los requisitos y límites de diseño y operacionales, y los costos. Los datos para el estudio técnico preliminar de los sistemas móviles que se podrían utilizar se presentan en un cuadro que acompaña cada ejemplo, para ayudar a determinar si el uso de un sistema de ese tipo es una opción viable. El paso 2 comprende un estudio técnico detallado, seguido de un análisis económico minucioso, para justificar completamente el uso del sistema móvil desde los puntos de vista técnico y financiero. En los anexos I y II se ofrece información técnica detallada sobre dos aplicaciones móviles de amplio uso a fin de ilustrar los principales tipos de datos y contenidos que se necesitan para el análisis técnico-económico pormenorizado.

Para elaborar esta obra se recurrió a numerosas fuentes de información, incluidas las publicaciones pertinentes del OIEA, y a un grupo internacional de expertos en gestión de desechos radiactivos. También se consultaron otras normas e informes reconocidos del sector.

La presente publicación está destinada principalmente a los profesionales que trabajan en la gestión de desechos y tienen la responsabilidad de seleccionar, diseñar y desplegar los sistemas de procesamiento, para que puedan aprovechar los sistemas móviles ya existentes y nuevos. También podría ser de ayuda a los reguladores encargados de examinar y autorizar los sistemas móviles de procesamiento de desechos, así como los posibles acuerdos bilaterales para el uso compartido de esos sistemas.

REFERENCIAS

- [1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Policies and Strategies for Radioactive Waste Management, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-G-1.1, IAEA, Vienna (2009).
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Application of Thermal Technologies for Processing of Radioactive Waste, IAEA-TECDOC-1527, IAEA, Vienna (2006).
- [3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Innovative Waste Treatment and Conditioning Technologies at Nuclear Power Plants, IAEA-TECDOC-1504, IAEA, Vienna (2006).
- [4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Review of the Factors Affecting the Selection and Implementation of Waste Management Technologies, IAEA-TECDOC-1096, IAEA, Vienna (1999).
- [5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Status of Technology for Volume Reduction and Treatment of Low and Intermediate Level Solid Radioactive Waste, Technical Reports Series No. 360, IAEA, Vienna (1994).
- [6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Treatment and Conditioning of Radioactive Organic Liquids, IAEA-TECDOC-656, IAEA, Vienna (1992).
- [7] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Treatment and Conditioning of Radioactive Solid Wastes, IAEA-TECDOC-655, IAEA, Vienna (1992).
- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Options for the Treatment and Solidification of Organic Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 294, IAEA, Vienna (1989).
- [9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Techniques and Practices for Pretreatment of Low and Intermediate Level Solid and Liquid Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 272, IAEA, Vienna (1987).
- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Treatment of Low- and Intermediate-level Liquid Radioactive Wastes, Technical Reports Series No. 236, IAEA, Vienna (1984).
- [11] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Gestión previa a la disposición final de desechos radiactivos, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° GSR Part 5, OIEA, Viena, 2010.
- [12] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Reglamento para el Transporte Seguro de Materiales Radiactivos: Edición de 2012, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° SSR-6, OIEA, Viena, 2013.
- [13] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Clasificación de desechos radiactivos, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° GSG-1, OIEA, Viena, 2015.
- [14] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Gestión previa a la disposición final de desechos radiactivos de actividad baja e intermedia, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° WS-G-2.5, OIEA, Viena, 2009.
- [15] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Gestión previa a la disposición final de desechos radiactivos de actividad alta, Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° WS-G-2.6, OIEA, Viena (2009).
- [16] AMERICAN NUCLEAR SOCIETY, American National Standard: Mobile Low-Level Radioactive Waste Processing Systems, ANSI/ANS-40.37-2009, ANS, La Grange Park, IL (2009).
- [17] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, ANP LLW Management Review: Mobile Processing and Treatment Systems, EPRI, Palo Alto, CA (2005).
- [18] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Glosario de Seguridad Tecnológica del OIEA: Terminología empleada en seguridad tecnológica nuclear y protección radiológica, Edición de 2007*, OIEA, Viena, 2008.
- [19] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Categorizing Operational Radioactive Wastes, IAEA-TECDOC-1538, IAEA, Vienna (2007).
- [20] KRASZNAI, J.P., "Radioactive oil decontamination development: An overview", Proc. 12th Int. Conf. on Environ. Remediat. & Radioact. Waste Manag., Liverpool, 2009, Paper No. ICEM2009-16251, ASME, New York (2009) 177–183.
- [21] SAMANTA, S.K., RAMASWAMY, M., MISRA, B.M., Studies on cesium uptake by phenolic resins, *Separ. Sci. Technol.* **27** 2 (1992) 255–267.
- [22] OZARDE, P.D., SAMANTA, S.K., RAJ, K., "Management of intermediate level wastes from past reprocessing using Cs-specific resorcinol formaldehyde", *Issues and Trends in Radioactive Waste Management (Proc. Int. Conf. Vienna, 2002)*, IAEA-CN-90/51, IAEA, Vienna (2002) 267–271.
- [23] SREENIVAS, V., SAMANTA, S.K., PUSHPARAJA, RAJ, K., Operational radiation hazards control experience during treatment of intermediate level waste, *Radiat. Prot. Environ.* **24** 1&2 (2001) 475–480.
- [24] BANERJEE, D., SAMANTA, S.K., "Process chemistry and resin performance in the treatment of alkaline

- intermediate level reprocessing waste by selective ion exchange”, Proc. 14th Ann. Conf. of Indian Nuclear Society, Kalpakkam, India, 2003, Indira Gandhi Centre for Atomic Research, Kalpakkam (2003).
- [25] KARLIN, Y., et al., “Management of liquid radioactive waste from non-power applications at MosNPO ‘Radon’”, Management of Radioactive Waste from Non-Power Applications: Sharing the Experience (Proc. Int. Conf. Malta, 2001), IAEA-CN-87/68P, IAEA, Vienna (2001) 431–435.
 - [26] KARLIN, Y., DMITRIEV, S., ILJIN, V., OJOVAN, M., BURCL, R., “Elaboration of not large mobile modular installation ‘Aqua-Express’ (300 L/h) for LRW cleaning”, Proc. WM’03 Conf. Tucson, AZ, 2003 (2003).
 - [27] TUSA, E., HARJULA, R., YARNELL, P., “Fifteen years of operation with inorganic highly selective ion exchange materials”, Proc. WM’07 Conf. Tucson, AZ, 2007 (2007).
 - [28] SOBOLEV, I.A., et al., Mobile unit for enclosing hot solid waste in a metal matrix, Atomic Energy **74** 6 (1993) 499–501.
 - [29] OJOVAN, M.I., et al., Safety assessment of bore-hole repositories for sealed radiation sources disposal, Mat. Res. Soc. Proc. **608** (2000) 141–146.
 - [30] OJOVAN, M.I., LEE, W.E., SOBOLEV, I.A., KARLINA, O.K., ARUSTAMOV, A.E., “Metal matrix immobilization of sealed radioactive sources for safe storage, transportation and disposal”, Proc. WM’04 Conf. Tucson, AZ, 2004 (2004).
 - [31] KARLINA, O., Spent ionizing radiation sources conditioning, Environ. Safety **1** (2007) 38.
 - [32] SOCIÉTÉ POUR LE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS ET DES EFFLUENTS INDUSTRIELS, On Site Conditioning: Mobile Machine for Concentrates Encapsulation, SOCODEI, Bagnols-sur-Cèze, France (2010).
 - [33] SOCIÉTÉ POUR LE CONDITIONNEMENT DES DÉCHETS ET DES EFFLUENTS INDUSTRIELS, On Site Conditioning: Mobile Machine for Ion Exchangers Embedding, SOCODEI, Bagnols-sur-Cèze, France (2010).
 - [34] THOMPSON, L., OMBRELLARO, P., MEGALOS, N., OSBORNE, D., TIMMONS, D., “Final results from the in situ vitrification treatment at Maralinga”, Proc. WM’00 Conf. Tucson, AZ, 2000 (2000).
 - [35] FARNSWORTH, R.K., KUHN, D.J., MICHAEL, D.L., HANSEN, J.E., LOWERY, P.S., “Application of a new in situ vitrification technology for the remediation of underground storage tanks”, Proc. WM’99 Conf. Tucson, AZ, 1999 (1999).
 - [36] LIEBENBERG, G.R., AL-MUGHRABI, M., “The development of a mobile hot cell facility for the conditioning of spent high activity radioactive sources (SHARS) – 8436”, Proc. WM’08 Conf. Phoenix, AZ, 2008 (2008).
 - [37] POTIER, J.-M., AL-MUGHRABI, M., SHARS: *Una solución compartida para las fuentes radiactivas peligrosas*, Boletín del OIEA, **49** 1 (2007) 56–58.
 - [38] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Management of Spent High Activity Radioactive Sources (SHARS), IAEA-TECDOC-1301, IAEA, Vienna (2002).
 - [39] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Characterization of Radioactive Waste Forms and Packages, Technical Reports Series No. 383, IAEA, Vienna (1997).
 - [40] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Strategy and Methodology for Radioactive Waste Characterization, IAEA-TECDOC-1537, IAEA, Vienna (2007).
 - [41] CALDWELL, J.T. et al., “High sensitivity imaging passive and active neutron (IPAN) transuranic assay system”, Proc. 14th Ann. ESARDA Symp., Salamanca, Spain, 1992 (1992).
 - [42] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Determination and Use of Scaling Factors for Waste Characterization in Nuclear Power Plants, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.18, IAEA, Vienna (2009).

Anexo I

EJEMPLO DE LOS DETALLES DE UN SISTEMA DE PROCESAMIENTO MÓVIL: SUPERCOMPACTACIÓN DE SÓLIDOS

En los cuadros I-1 a I-7 se ilustran los tipos de información recopilados en el proceso de determinación de la aplicabilidad que pueden utilizarse en el marco del estudio técnico y para elaborar las especificaciones técnicas de un supercompactador.

CUADRO I-1. PANORAMA GENERAL DE LA TECNOLOGÍA

Consideración	Descripción o valor(es)
Rendimiento, capacidad, factor de descontaminación y reducción de volumen	— Rendimiento: hasta 10 bidones de 200 L por hora. — Capacidad: entre 750 y 2200 t. — Factores de reducción de volumen: hasta 10, según el tipo de desechos.
Características de los desechos tratados (actividad, forma)	— Bidones de 200 L llenos de materiales de desecho; — Tasas de dosis de hasta 15 mGy/h (para tasas de dosis más altas se requeriría blindaje y manipulación a distancia); — Todos los tipos de desechos de densidad de baja a mediana, desechos compactados dentro de un bidón, asbesto y desechos de actividad alta.
Características del desecho final (actividad, forma, química)	— Cuerpos de desechos de densidad de mediana a alta con bidones aplastados; — Los discos compactados pueden tener que ser reembalados para contener la actividad.
Criterios de aceptación del cuerpo del desecho final y limitaciones para su disposición final o almacenamiento	— Criterios de aceptación de desechos de los distintos Estados u organismos reguladores; — La compactación es un proceso ampliamente aceptado para la reducción de volumen, y en la mayoría de los casos el producto se acepta como un cuerpo de desechos apto para la disposición final.
Características de los desechos secundarios generados por el proceso (actividad, forma, química)	Líquidos o lodos producidos por el proceso de compactación, o polvo generado durante esas operaciones. Los líquidos se recogen y se bombean a los tanques de almacenamiento de la instalación, y el polvo del aire de salida se filtra. El diseño de la unidad ofrece contención para los líquidos y el aire generados localmente.
Necesidades de apoyo externo (equipo o recursos)	Los sistemas de supercompactación pueden estar montados en plataformas o en remolques. Es esencial que la instalación sea adecuada para transmitir el peso de la unidad y la carga por choque generada durante las operaciones de compactación. Los sistemas móviles están diseñados para transmitir las cargas, pero tendrá que haber una plataforma rígida en el emplazamiento.
Personal requerido (tiempos de trabajo, número de empleados, personal por contrata, cualificaciones requeridas para manejar la tecnología, operaciones, seguridad física, mantenimiento)	Un operador de sistemas para la unidad móvil, un operador para el sistema de manipulación de materiales y un asistente de seguridad radiológica a tiempo parcial. Para el mantenimiento correctivo y ordinario se necesitará un mecánico. Los operadores deben recibir una capacitación mínima.

CUADRO I-1. PANORAMA GENERAL DE LA TECNOLOGÍA (cont.)

Consideración	Descripción o valor(es)
Seguridad industrial y radiológica (barreras, protección respiratoria, monitorización de la exposición del personal, controles de la contaminación, monitorización del aire)	— La operación de compactación tiene normalmente una contención local, con ventilación para evitar que se propague la contaminación. — Monitorización radiológica de la zona y monitorización continua del aire, según sea necesario. — Monitores del personal y ropa protectora, por ejemplo, según los requisitos del emplazamiento. — Puede requerirse protección respiratoria para la descontaminación y el mantenimiento. — La protección de seguridad industrial incluye gafas de protección y calzado de seguridad.
Consideraciones jurídicas y reglamentarias (nacionales, locales, internacionales, licencias, explotación, movimientos y transporte de desechos)	Por lo general, la supercompactación no se ve afectada por procesos jurídicos o reglamentarios. Los aspectos de ingeniería y de seguridad radiológica del proceso se conocen a fondo y están normalizados, y el tiempo requerido para las aprobaciones reglamentarias del despliegue de un sistema de este tipo puede ser mínimo. La forma final del cuerpo del desecho puede estar dictada por los requisitos nacionales o locales. El traslado de los desechos deberá ser conforme con los requisitos nacionales y locales.
Costo: arreglos contractuales (arriendo/compra); instalación periódica (mensual/anual/por campañas/por volumen); artículos fungibles; personal; retirada y disposición final del equipo; expedición; disposición final de los desechos	— Los sistemas de supercompactación son caros. — Es importante sopesar la opción de un arriendo con la de una compra. — La carga financiera puede reducirse examinando la posibilidad de compartir el sistema con otros usuarios. — El equipo es grande y pesado, lo que genera altos costos de movilización/desmovilización y de transporte.
Impacto en la protección contra incendios y en la carga de fuego	— El uso general no plantea riesgos particulares de incendios. Aun así, tiene que haber medios de protección contra incendios a disposición. — Deben considerarse la carga del equipo y la carga transitoria del combustible. — La compresión de un contenido de desechos desconocido puede desencadenar reacciones exotérmicas.
Medios nuevos	
Cantidad o volumen por año	La tasa de aumento de la presión diferencial de los medios de filtración del aire depende de los desechos y del comportamiento del bidón durante la compactación. El diseño del equipo reduce la actividad aerotransportada. Un conjunto de dos filtros estándar (filtro previo y filtro HEPA) debería bastar para dos o tres meses de funcionamiento. Habrá que vigilar el comportamiento específico de la corriente de desechos para determinar la frecuencia de sustitución.
Espacio de almacenamiento	Típicamente, 2 m ³ de espacio para el almacenamiento de los medios de filtración.
Contenedores de desechos nuevos	
Cantidad o volumen por año	Varía según el volumen de desechos, e incluye los bidones y el sobreembalaje.

CUADRO I-1. PANORAMA GENERAL DE LA TECNOLOGÍA (cont.)

Consideración	Descripción o valor(es)
Espacio de almacenamiento	Variable: 1000 m ³ deberían ser suficientes para la mayoría de las aplicaciones, suponiendo que los tiempos de entrega en la compra de nuevos contenedores sean cortos.
Otros artículos fungibles	
Cantidad o volumen por año	— El aceite hidráulico debe recogerse y tratarse con arreglo a los requisitos del emplazamiento. — Para algunos tipos de compactadores pueden necesitarse separadores y discos de retención.
Espacio de almacenamiento	Mínimo.
Recogida, aparcamiento transitorio y almacenamiento de los desechos relacionados con el proceso (por año): considerar los contenedores llenos y en servicio	
Cantidad o volumen por año	Los volúmenes de desechos sólidos de actividad baja tratados por supercompactación variarán según el emplazamiento. Pueden necesitarse zonas de almacenamiento o aparcamiento transitorio de los desechos sin tratar y de los discos compactados de desechos ya tratados o los sobreembalajes. Los desechos secundarios de actividad baja que se forman incluyen, por ejemplo, el agua liberada por la masa compactada, las soluciones de descontaminación, y los productos de descontaminación del personal y de limpieza.
Espacio de almacenamiento	— Varía según el emplazamiento, en función del volumen que se deba tratar y del factor de reducción alcanzado en el proceso. — Los desechos líquidos deberán recogerse y almacenarse en bidones o tanques antes del tratamiento.
Información final integrada sobre el sistema	
Móvil o montado sobre plataforma	Ambas versiones están disponibles.
Dimensiones totales	Para un sistema móvil típico se necesita una superficie de 20 m × 16 m, con un perímetro de trabajo de 5 m.
Volumen total	Típicamente, un sistema montado en un remolque tiene una altura de 4,5 m, una longitud de 11,3 m y una anchura de 2,5 m; la base del compactador es de ~2 m × 2 m.
Peso total	La unidad del compactador pesa entre 35 y 60 t; con el remolque y los accesorios, el peso total puede situarse entre 55 y 80 t.

Nota: Filtro HEPA — filtro de aire particulado de alta eficiencia.

CUADRO I-2. COMPONENTES DEL SISTEMA

Subsistemas y componentes	Detalles técnicos (características, parámetros, valores)	Observaciones
Tuberías	— Tubería hidráulica continua de DN 50; — Presión nominal: 60 MPa; — Longitud: ~50 m.	Los valores consignados son los típicos.
Válvulas	— Válvulas incluidas en la unidad motriz hidráulica; — Comprenden válvulas de control, de regulación de la presión y de seguridad.	Ninguna.
Mandos de control	— Mandos para el accionamiento del compactador y otros sistemas conexos (como la ventilación, las pantallas de la instrumentación nuclear, las alarmas); — Incluyen el control de los sistemas de manipulación de materiales.	El equipo comprende el sistema informático de adquisición de datos. Los mandos del PLC prevén la posibilidad de la neutralización manual. Los sistemas de seguridad están incluidos. El sistema de manipulación de materiales puede accionarse localmente desde los pulsantes de un estativo.
Vasijas (de filtros, de intercambio iónico)	No se aplica.	No se aplica.
Bombas	— Bombas hidráulicas de desplazamiento positivo lubricadas con aceite: 40 MPa; — Bomba centrífuga de trasiego de desechos de actividad baja: presión de descarga = 0,3 MPa. — Tubería de DN 25.	— Incluidas en el sistema móvil; — Deberán establecerse conexiones temporales con el tanque del emplazamiento.
Mangueras	Mangueras de alta presión para los sistemas hidráulicos.	Suministradas como parte del sistema hidráulico.
Tanques (de alimentación y recogida, del producto y el efluente, químicos, de mezcla)	De acero inoxidable para la recogida de 1 m ³ de efluente.	El líquido del tanque de recogida del sistema móvil se trasiega a los bidones o el tanque de desechos del emplazamiento. El tubo de recogida de líquidos del sistema móvil puede también conectarse directamente a los sistemas del emplazamiento.
Conductos de ventilación	Sistema filtrante con filtros previos/filtros HEPA de 600 mm × 600 mm.	Parte del sistema móvil.
Otros	Ninguno.	Ninguna.

Nota: El usuario debería modificar el cuadro según sea necesario para los componentes múltiples. DN — diámetro nominal; PLC — controlador lógico programable; filtro HEPA — filtro de aire particulado de alta eficiencia.

CUADRO I-3. INTERCONEXIONES DE LOS COMPONENTES FÍSICOS

Servicio	Tipo	Detalles técnicos (características, parámetros, valores)	Observaciones
Electricidad	Alimentación eléctrica.	480 V, CA, 300 A, trifásica; 110 V, CA, 20 A, monofásica.	— Energía eléctrica para el compactador y los mandos del sistema hidráulico y el funcionamiento del sistema móvil. — El sistema móvil incluye la unidad motriz completa. En el emplazamiento solo se efectúan las conexiones eléctricas. — La potencia requerida dependerá del tonelaje.
Agua	Agua de servicio.	— Utilizada para la depuración; — Hasta 1000 L/d; — 0,2 a 0,3 MPa.	Agua para la descontaminación de la cámara de compactación y el equipo, según sea necesario.
Aire	Aire de servicio.	Exento de aceite y agua.	Ninguna.
Tubo(s) de suministro de líquidos al proceso	No se aplica.	No se aplica.	No se aplica.
Tubo(s) de retorno de líquidos para la disposición final	No se aplica.	No se aplica.	No se aplica.
Desagüe de líquidos	Agua de drenaje de la compactación y la descontaminación.	Flujo por gravedad en tuberías de DN 25 a 40.	Cantidad pequeña.
Transferencia de los desechos procesados (por ejemplo, de los discos de desechos compactados) a un contenedor de desechos	Mecanismos de izado y horquillas elevadoras para el desplazamiento de los discos y el contenedor.	— Horquilla elevadora de 2 t de capacidad; — Peso típico de los discos compactados: 200 a 250 kg.	Disponibilidad de pinzas para la manipulación de los discos compactados.
Transferencia y desplazamiento de desechos secundarios a un proceso secundario o un contenedor de desechos, recogida, canalización y monitorización del efluente gaseoso	— Desechos líquidos; — Desechos sólidos, tales como mopas.	— Tanque de 1 m³ para el drenaje del efluente por gravedad; — Bidones de 200 L.	— Se conectará al tanque de desechos líquidos del emplazamiento; — Menos de un bidón por mes.
Ventilación (calor, captura de aire, aire acondicionado)	Zona de control con aire acondicionado.	Típicamente, sistema de aire acondicionado de 1 t montado en la pared, según el tamaño de la sala.	Puede requerirse calefacción en algunos lugares.

CUADRO I-3. INTERCONEXIONES DE LOS COMPONENTES FÍSICOS (cont.)

Servicio	Tipo	Detalles técnicos (características, parámetros, valores)	Observaciones
Recogida, canalización y monitorización del efluente gaseoso, monitorización radiológica (tasa de dosis, personal, aire)	Ventilación aspirante de la cámara de compactación.	Sistema de ventilador/filtro de flujo direccional: — Presión negativa de 50 mm de columna de agua en la cámara; — 10 renovaciones del volumen de aire por hora. Combinación de un filtro previo/filtro HEPA antes de la descarga de aire local o de la descarga al sistema del emplazamiento.	— La ventilación de la cámara debe revisarse para cada aplicación. — Hay diseños con mandos de control por relé. — Si se prevé la formación de niebla, deberá añadirse un desnebulizador antes del filtro.
Comunicación (teléfono, Internet, captura de datos, controles)	Control y comunicación.	— Proceso de compactación programable para la compactación progresiva de diferentes tipos de desechos; — Teléfono en la sala de control.	Si es necesario, puede establecerse una interconexión con los mandos de control de la planta.
Monitorización radiológica (tasa de dosis, personal, aire)	— Monitor γ de zona; — Monitor continuo de aire; — Dosímetro termoluminiscente.	— Monitor γ de zona de hasta 0,01 Sv/h; — Dosímetro termoluminiscente para monitorizar la exposición del personal.	Vigilancia ordinaria por personal de protección radiológica y apoyo a actividades de mantenimiento y descontaminación.
Necesidades de sistemas y servicios externos para el equipo y los sistemas de apoyo (energía eléctrica, equipo de mezcla, captura de aire)	No se aplica.	No se aplica.	Ninguna.
Protección contra incendios	Equipo fijo de extinción de incendios para el caso de inflamación del aceite hidráulico	Extintores locales y de gas de CO ₂ .	Proporcionada por el emplazamiento.
Otros elementos varios	Ninguno.	No se aplica.	Ninguna.

Nota: DN — diámetro nominal; filtro HEPA — filtro de aire particulado de alta eficiencia.

CUADRO I-4. CONSIDERACIONES DE ESPACIO

Consideración	Detalles técnicos (características, parámetros, valores)	Observaciones
Funcionamiento	Espacio libre de trabajo de por lo menos 3 m en torno al sistema móvil.	— Movimiento alrededor del bidón y del sistema de manipulación de los discos compactados; — El compactador se acciona generalmente desde la estación de control del sistema móvil.
Sustitución de los medios	— Movimiento alrededor del conjunto de filtros; — Manipulación de los filtros con un mecanismo de izado.	Plataformas especiales para la manipulación de los filtros contaminados, incluido el embalaje para el transporte a la zona o el contenedor de desechos.
Mantenimiento	— Mantenimiento preventivo ordinario y correctivo; — Cambios del aceite hidráulico y los filtros.	— El mantenimiento ordinario está previsto en el espacio de trabajo arriba mencionado; — Las obras de mantenimiento importantes no se realizarán en el emplazamiento.
Sustitución de componentes	No se aplica.	No se aplica.
Movimientos de desechos	Perímetro de 5 m en torno al compactador.	El espacio para el movimiento de la horquilla elevadora está previsto en la superficie indicada para el sistema.
Tendido y espacios libres del cableado eléctrico, las tuberías de agua, y las tuberías de aire de servicio o de los instrumentos	El tendido del cableado eléctrico, las tuberías de drenaje y los conductos de ventilación debe realizarse teniendo en cuenta los movimientos de materiales y del personal.	Ninguna.
Barreras (personal, seguridad física, líquidos, control de la contaminación)	Barreras para impedir la entrada de personal no autorizado al lugar de trabajo.	Ninguna.
Equipo o estaciones de monitorización de protección radiológica	Ninguna necesidad de espacio particular.	Ninguna.

CUADRO I-5. DISTRIBUCIÓN DE LOS PESOS

Consideración	Detalles técnicos (características, parámetros, valores)	Observaciones
Sistema de proceso (sobre plataforma o componentes integrados)	Plataforma de hormigón para el compactador de 16 m × 5 m. Carga de los pisos: — general = 2000 kg/m ² ; — base del compactador = 15 000 kg/m ² .	Ninguna.
Aumento de peso fuera de la norma	No se aplica.	No se aplica.
Controles del acceso (puertas, portales, vallas y muros)	Ninguno.	Ninguna.
Blindaje	Ninguno.	Puede requerirse blindaje para los desechos de actividad más alta.
Peso colectivo de los desechos antes y después del procesamiento (desechos y contenedores)	150 a 200 kg por bidón.	Ninguna.
Superficie de colocación del equipo	20 m × 16 m.	Perímetro de 5 m.

CUADRO I-6. CONTROLES FÍSICOS

Consideración	Detalles técnicos (características, parámetros, valores)	Observaciones
Controles del acceso		
Puertas o portales	Ninguno.	Ninguna.
Vallas o muros	Ninguno.	Ninguna.
Barreras de control de la contaminación líquida y transitoria		
Berma/muro de protección, bordillos o pared	Barrera local en torno al sistema.	— Barreras para la seguridad radiológica e industrial. — En algunos emplazamientos pueden necesitarse bermas para contener la contaminación o los líquidos.

CUADRO I-7. MOVIMIENTOS DE DESECHOS Y MATERIALES

Operación	Equipo (tipo, requisitos de acceso, capacidad)	Espacio de carga y descarga	Altura de carga y descarga
Suministro del equipo	— El equipo principal está montado en un remolque. — Los accesorios se transportan en dos camiones de plataforma elevada.	— Espacio para el remolque. — Zona de almacenamiento de 50 m².	— La plataforma del camión está a 2 m de altura. — La altura máxima del equipo es normalmente de 2,5 m.
Configuración del equipo	— Remolque de plataforma elevada. — Grúa de 10 t de capacidad.	Calzada de acceso de 3 m de ancho.	Instalación y configuración sobre una plataforma de hormigón a nivel del suelo.
Funcionamiento ordinario del sistema de proceso	Horquilla elevadora, 2 t de capacidad, para el acceso lateral.	Radio de giro del equipo.	Altura de elevación del equipo.
Superficie de colocación del equipo para el ensamblaje y la instalación	20 m × 16 m.	Superficie de 20 m × 10 m.	Ninguna.
Suministro y retirada de los desechos del emplazamiento (cofre de transporte y componentes como cubiertas o tapas)	Desplazamiento de los bidones de desechos con horquilla elevadora.	Según los requisitos de la horquilla elevadora, el contenedor y el embalaje.	Según los requisitos de la horquilla elevadora, el contenedor y el embalaje.
Permisos especiales de circulación por carretera o requisitos de notificación de organismos nacionales y locales (anchura, peso y tamaño superiores a la norma)	— De conformidad con la reglamentación nacional y local. — El peso y el tamaño del transporte deben estudiarse cuidadosamente. — No debería haber problemas con este equipo.		
Consideraciones de seguridad física del transporte (describir)	Normalmente no se requiere ninguna medida de seguridad física especial.		

Nota: El usuario debería modificar el cuadro según sea necesario para los componentes múltiples.

Anexo II

EJEMPLO DE LOS DETALLES DE UN SISTEMA DE PROCESAMIENTO MÓVIL: FILTRACIÓN E INTERCAMBIO IÓNICO

En los cuadros II-1 a II-7 se ilustran los tipos de información recopilados en el proceso de determinación de la aplicabilidad que pueden utilizarse en el marco del estudio técnico y para elaborar las especificaciones técnicas del sistema de filtración e intercambio iónico.

CUADRO II-1. PANORAMA GENERAL DE LA TECNOLOGÍA

Consideración	Descripción o valor(es)
Rendimiento, capacidad, factor de descontaminación y reducción de volumen	— El rendimiento está determinado por el volumen procesado y los requisitos relativos al volumen de lecho. — Típicamente, de 10 a 20 volúmenes de lecho por hora.
Características de los desechos tratados (actividad, forma)	— La tecnología se aplica a una amplia variedad de volúmenes de desechos acuosos. — Concentraciones de impurezas químicas de bajas a altas. — Conductividad típica de 50 a 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pero con medios de intercambio iónico especiales pueden obtenerse valores más altos. — Actividad de hasta varios centenares de MBq/L, con una alta proporción de ^{134}Cs y ^{137}Cs. — Desechos líquidos trasvasables por bombeo a la unidad móvil.
Características del desecho final (actividad, forma, química)	Líquido acuoso de proceso limpio, que requiere una disposición final monitorizada, ya sea directamente o después de un tratamiento ulterior: — Actividad muy baja; — pH de 6 a 9.
Criterios de aceptación del cuerpo del desecho final y limitaciones para su disposición final o almacenamiento	— Varían según el lugar y la disposición final prevista; — Los medios de intercambio iónico y filtración gastados pueden requerir un acondicionamiento a fin de cumplir los criterios para la disposición final.
Características de los desechos secundarios generados por el proceso (actividad, forma, química)	— Medios de los filtros de cartucho cilíndricos: tamaños variables (típicamente de no más de 150 mm de diámetro $\times$ 760 mm de longitud). — Medios de intercambio iónico en perlas y en polvo en suspensión acuosa. — Los medios de intercambio iónico pueden tener tasas de dosis de muy bajas a altas (0,1 a 150 mSv/h). — Los medios catiónicos tienen normalmente una actividad más alta que las resinas aniónicas (lo mismo se aplica a algunos medios selectivos para isótopos particulares). — Los volúmenes de todos los desechos variarán según las impurezas químicas del agua afluente y los niveles de actividad, la configuración del sistema, los tipos de medios y la calidad del efluente deseada.
Necesidades de apoyo externo (equipo o recursos)	— Normalmente, ninguna (basta la capacidad existente en la instalación nuclear); — Los desechos sólidos secundarios necesitan acondicionamiento y embalaje en un cuerpo final de desechos adecuado; — Se requieren medios de recambio, contenedores de desechos y transporte.

CUADRO II-1. PANORAMA GENERAL DE LA TECNOLOGÍA (cont.)

Consideración	Descripción o valor(es)
Personal requerido (tiempos de trabajo, número de empleados, personal por contrata, cualificaciones requeridas para manejar la tecnología, operaciones, seguridad física, mantenimiento)	— Varía según el volumen y la tasa de procesamiento y los requisitos específicos de la aplicación; — Tres operadores pueden trabajar en el sistema en turnos de 8 h, si el tiempo o los volúmenes así lo exigen.
Seguridad industrial y radiológica (barreras, protección respiratoria, monitorización de la exposición del personal, controles de la contaminación, monitorización del aire)	— Se requieren barreras radiológicas en torno al equipo de interconexión con la planta. — No debe haber contaminación transitoria. — Por lo general no hay actividad aerotransportada. — Normalmente se requiere blindaje alrededor de las vasijas de filtración y de intercambio iónico. — Debe analizarse también la radiación de cielo para la aplicación en cuestión.
Consideraciones jurídicas y reglamentarias (nacionales, locales, internacionales, licencias, explotación, movimientos y transporte de desechos)	En la fabricación del equipo deben tenerse en cuenta los requisitos de diseño nacionales y del emplazamiento y los controles de garantía de calidad. Los reglamentos nacionales y locales pueden contener variaciones importantes en relación con los líquidos y los desechos secundarios. La reglamentación puede poner límites o restricciones al agua efluente del sistema con respecto a: — la actividad; — las impurezas químicas; — la tasa de descarga; — el período de descarga (cuándo puede descargarse el líquido); — la prohibición de la descarga. El transporte de los desechos secundarios puede incluir requisitos relacionados con: — la actividad; — el tipo de bulto; — el uso de cofres blindados (autorizados con 450 a 600 mm de acero y plomo); — el tipo de transporte (normalmente por camión); — las tasas de dosis generales de la zona y por contacto.
Costo: arreglos contractuales (arriendo/compra); instalación periódica (mensual/anual/por campañas/por volumen); artículos fungibles; personal; retirada y disposición final del equipo; expedición; disposición final de los desechos	Arriendo (típicamente por una tarifa mensual fija o una tarifa por volumen de líquido procesado) o compra. Los sistemas pueden costar de 50 000 a 500 000 dólares de los Estados Unidos. El costo dependerá de la complejidad del sistema: — número de vasijas; — tipos de medios; — tasa de proceso requerida; — materiales de construcción; — grado de automatización; — requisitos de blindaje; — configuración sobre plataforma o instalación independiente (con los distintos componentes colocados directamente sobre el piso).

CUADRO II-1. PANORAMA GENERAL DE LA TECNOLOGÍA (cont.)

Consideración	Descripción o valor(es)
	Además: — el costo es bajo en comparación con una instalación fija; — el sistema puede arrendarse o explotarse en campañas periódicas, según el volumen que sea necesario tratar; — se requiere personal capacitado y cualificado; — en general, no se requieren competencias o conocimientos especializados; — se precisa apoyo técnico, químico y radiológico; — el sistema es fácil de limpiar, dismantelar y retirar; — puede transportarse en remolques y camiones. Los costos de los medios de sustitución variarán según el diseño del sistema, las características del líquido de entrada, los requisitos aplicables al líquido efluente y los requisitos de tratamiento previo, tratamiento, acondicionamiento, transporte y disposición final de los desechos secundarios.
Impacto en la protección contra incendios y en la carga de fuego	Los medios nuevos pueden requerir un análisis de la carga de fuego (particularmente en el caso de las resinas).
Medios nuevos	
Cantidad o volumen por año	— Varía de 1 a 30 elementos de filtro; — El volumen de resinas puede ser de entre 1 y 3 m³; — Los volúmenes dependen grandemente de la química y la actividad del líquido entrante y de los requisitos aplicables al efluente.
Espacio de almacenamiento	28 m ³ como máximo (superficie de 3 m × 3 m).
Contenedores de desechos nuevos	
Cantidad o volumen por año	— Depende del uso de medios; — Depende de los requisitos referentes al cuerpo de desechos final; — Hasta 20 bidones (200 L por bidón).
Espacio de almacenamiento	28 m ³ como máximo (superficie de 3 m × 3 m).
Otros artículos fungibles	
Cantidad o volumen por año	Piezas de recambio.
Espacio de almacenamiento	Mínimo.
Recogida, aparcamiento transitorio y almacenamiento de los desechos relacionados con el proceso (por año): considerar los contenedores llenos y en servicio	
Cantidad o volumen por año	Igual que para los contenedores de desechos nuevos.
Espacio de almacenamiento	60 m ³ como máximo (teniendo en cuenta el blindaje y el acceso de los mecanismos de elevación).

CUADRO II-1. PANORAMA GENERAL DE LA TECNOLOGÍA (cont.)

Consideración	Descripción o valor(es)
Información final integrada sobre el sistema	
Móvil o montado sobre plataforma	Típicamente sobre el suelo o sobre una plataforma.
Dimensiones totales	28 m ² .
Volumen total	90 m ³ .
Peso total	Hasta 4500 kg (según el tamaño y el número de las vasijas y los requisitos de blindaje).

CUADRO II-2. COMPONENTES DEL SISTEMA

Subsistemas y componentes	Detalles técnicos (características, parámetros, valores)	Observaciones
Tuberías	Presión: 1,0 MPa.	Valor típico.
Válvulas	Presión: 1,0 MPa.	Valor típico.
Mandos de control	Los requisitos de energía eléctrica y aire varían según el tipo de mandos y la aplicación.	Ninguna.
Vasijas (filtro, intercambio iónico)	— Presión: 1,0 MPa. — Caudal: 114 L/min.	Varía de valores mucho más bajos a mucho más altos.
Bombas	— Presión: 1,0 MPa. — Caudal: 114 L/min.	Varía de valores mucho más bajos a mucho más altos.
Mangueras	— Presión: 1,0 MPa. — Resistentes a los rayos UV y al aceite.	— Varía de valores mucho más bajos a mucho más altos; — Ningún valor para los factores de resistencia.
Tanques (de alimentación y recogida, del producto y el efluente, químicos, de mezcla)	Volumen: 0,010 a 227 m ³ .	Los tanques más grandes se encuentran normalmente en el emplazamiento, como parte del equipo de la instalación. Las aplicaciones más pequeñas y los tanques de administración de productos químicos suelen ser recipientes de volumen menor.
Conductos de ventilación	Ninguno.	Ninguna.
Otros	Ninguno.	Ninguna.

Nota: El usuario debería modificar el cuadro según sea necesario para los componentes múltiples.

CUADRO II-3. INTERCONEXIONES DE LOS COMPONENTES FÍSICOS

Servicio	Tipo	Detalles técnicos (características, parámetros, valores)	Observaciones
Electricidad	Energía eléctrica	— 220 V, CA — 200 A — Trifásica — 60 Hz	Bombas y controladores
Agua	Desmineralizada	1,0 MPa	Medios de limpieza y enjuague
Aire	Exento de aceite y agua	1,7 m ³ /min	Medios de enjuague y purga de las carcassas de filtros
Tubo(s) de suministro de líquidos al proceso	Agua de entrada	— 1,0 MPa — 114 L/min	Ninguna
Tubo(s) de retorno de líquidos para la disposición final	Agua efluente	— 100 kPa — 114 L/min	Ninguna
Desagüe de líquidos	Recogida de fugas, purga de las vasijas	Uno, o una berma o muro de protección	Atmosférico
Transferencia de desechos procesados (por ejemplo, de los discos de desechos compactados) a un contenedor de desechos	No se aplica	No se aplica	Tubería del agua efluente hasta el punto de descarga (igual que arriba)
Transferencia/desplazamiento de desechos secundarios a un proceso secundario o un contenedor de desechos	Enjuague de los medios de intercambio iónico gastados	— 1,0 MPa — 65 mm	Diámetro mínimo requerido para la transferencia de los lodos del intercambio iónico
Ventilación (calor, captura de aire, aire acondicionado)	Ninguno	Ninguno	— Normalmente no se necesita — Dependerá del entorno y la reglamentación locales
Recogida, canalización y monitorización de efluentes gaseosos	Ninguno	Ninguno	— Normalmente no se necesita — Dependerá del entorno y la reglamentación locales
Comunicación (teléfono, Internet, captura de datos, controles)	Teléfono	Uno o varios	Conexión a la instalación
Monitorización radiológica (tasa de dosis, personal, aire)	— Radiación γ — Radiación β	— Uno o varios — Uno o varios	— Para monitorizar la acumulación de actividad en los medios — Para monitorizar la contaminación del personal y de la zona

CUADRO II-3. INTERCONEXIONES DE LOS COMPONENTES FÍSICOS (cont.)

Servicio	Tipo	Detalles técnicos (características, parámetros, valores)	Observaciones
Monitorización química	Ninguno	Ninguno	— Conductividad de entrada y salida, pH, composición de la solución
Necesidades de sistemas y servicios externos de apoyo (electricidad, equipo de mezcla, captura de aire)	Ninguno	Ninguno	— Normalmente, ninguna — Puede necesitarse energía eléctrica para extraer el agua residual de los medios gastados o para el procesamiento de los cuerpos de desechos secundarios — Véanse los detalles del encapsulamiento y la solidificación en la sección 5
Protección contra incendios	Ninguno	Ninguno	— Normalmente no se necesita — Dependerá de los requisitos nacionales y locales
Otros elementos varios	Ninguno	Ninguno	Disponibilidad de un laboratorio en el emplazamiento

CUADRO II-4. CONSIDERACIONES DE ESPACIO

Consideración	Detalles técnicos (características, parámetros, valores)	Observaciones
Funcionamiento	2 m	A cada lado para facilitar la monitorización
Sustitución de los medios	2 m	A cada lado para facilitar la sustitución
Mantenimiento	2 m	Ninguna
Sustitución de componentes	2 m	Ninguna
Movimientos de desechos	3 m	Ninguna
Tendido y espacios libres del cableado eléctrico, las tuberías de agua y las tuberías de aire de servicio o de los instrumentos	Mínimo, se recomienda utilizar haces o una bandeja portacables	Ninguna
Barreras (personal, seguridad física, líquidos, control de la contaminación)	Para delimitar zonas según las tasas de dosis y los límites específicos de la aplicación	Ninguna
Equipo o estaciones de monitorización de protección radiológica	4 m ²	Zona de monitorización del personal

CUADRO II-5. DISTRIBUCIÓN DE LOS PESOS

Consideración	Detalles técnicos (características, parámetros, valores)	Observaciones
Sistema de proceso (sobre plataforma o componentes integrados)	680 kg/m ²	Ninguna
Aumento de peso fuera de la norma	Varía	Horquilla elevadora para desplazar los contenedores de desechos o los medios nuevos
Controles del acceso (puertas, portales, vallas y muros)	Ninguno	Insignificantes
Blindaje (permanente, adicional al ordinario)	1360 kg/m ²	Blindaje adicional, si es necesario
Peso colectivo de los desechos antes y después del procesamiento (desechos y contenedores)	200 kg/m ²	Ninguna
Superficie de colocación del equipo	Ninguna	Varía

CUADRO II-6. CONTROLES FÍSICOS

Consideración	Detalles técnicos (características, parámetros, valores)	Observaciones
Controles del acceso	Ninguno	Ninguna
Puertas o portales	Uno	Portal de control del acceso
Vallas o muros	De uno a cuatro	Para controlar completamente el acceso al equipo de proceso
Barreras de control de la contaminación líquida y transitoria	Ninguna	Ninguna
Berma/muros de protección, bordillos o pared	De uno a cuatro	Para retener completamente todo derrame, fuga o líquido drenado

CUADRO II-7. MOVIMIENTOS DE DESECHOS Y MATERIALES

Operación	Equipo (tipo, requisitos de acceso, capacidad)	Espacio para la carga/descarga	Altura para la carga/descarga
Suministro del equipo	Preferiblemente, camión de carga trasera o lateral.	100 a 350 m ² .	10 m (si se utiliza una grúa).
Configuración del equipo	Horquilla elevadora o grúa de 5 a 10 t de capacidad.	37 m ² .	7 m (más si se utiliza una grúa).
Uso ordinario del sistema de proceso	Horquilla elevadora o portapalés de 1 t de capacidad	Radio de giro del equipo.	Altura de elevación del equipo.
Superficie de colocación del equipo requerida para el montaje y la instalación	No se aplica.	37 m ² .	7 m (más si se utiliza una grúa).
Entrega y retirada de los desechos del emplazamiento (cofre de transporte y componentes como cubiertas o tapas)	— Horquilla elevadora o grúa; — La capacidad varía según la reglamentación nacional y local y el tipo de contenedor de desechos.	Según el tipo de camión, el contenedor, el cofre y los requisitos de embalaje.	10 m (si se utiliza una grúa).
Permisos especiales de circulación por carretera o requisitos de notificación de organismos nacionales y locales (anchura, peso y tamaño superiores a la norma)	— De conformidad con los reglamentos nacionales y locales; — Los desechos de actividad alta pueden requerir un permiso por sobrepeso; — Típicamente, el tamaño y la anchura no superan la norma.		
Consideraciones relativas a la seguridad física del transporte	Estos desechos suelen ser de actividad baja. Pueden requerirse medidas de seguridad física adicionales para determinados tipos de desechos o en caso de concentraciones de ciertos isótopos en los desechos expedidos. Varían según los reglamentos nacionales y locales.		

COLABORADORES EN LA REDACCIÓN Y LA REVISIÓN

Abakumova, A.	Centro Científico y Tecnológico de Seguridad Nuclear y Radiológica (Federación de Rusia)
Álvarez, D.E.	Autoridad Regulatoria Nuclear (Argentina)
Braud, C.B.	SOCODEI (Francia)
Drace, Z.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Johnson, A.	EnergySolutions (Estados Unidos de América)
Karlin, Y.	MosNPO Radon (Federación de Rusia)
Krasznai, J.	Kinectrics (Canadá)
Martínez, F.	Nusim S.A. (España)
Mujumdar, A.	Centro Bhabha de Investigaciones Atómicas (India)
Nair, K.N.S.	Centro Bhabha de Investigaciones Atómicas (India)
Pöppinghaus, J.	GNS Gesellschaft für Nuklear-Service mbH (Alemania)
Rives, J.-F.	SOCODEI (Francia)
Rizzo, S.	Nucleco (Italia)
Samanta, S.K.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Saunders, P.D.	Suncoast Solutions (Estados Unidos de América)
Tsyplenkov, V.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Tusa, E.	Fortum Nuclear Services (Finlandia)
Vaught, D.	Duke Energy (Estados Unidos de América)

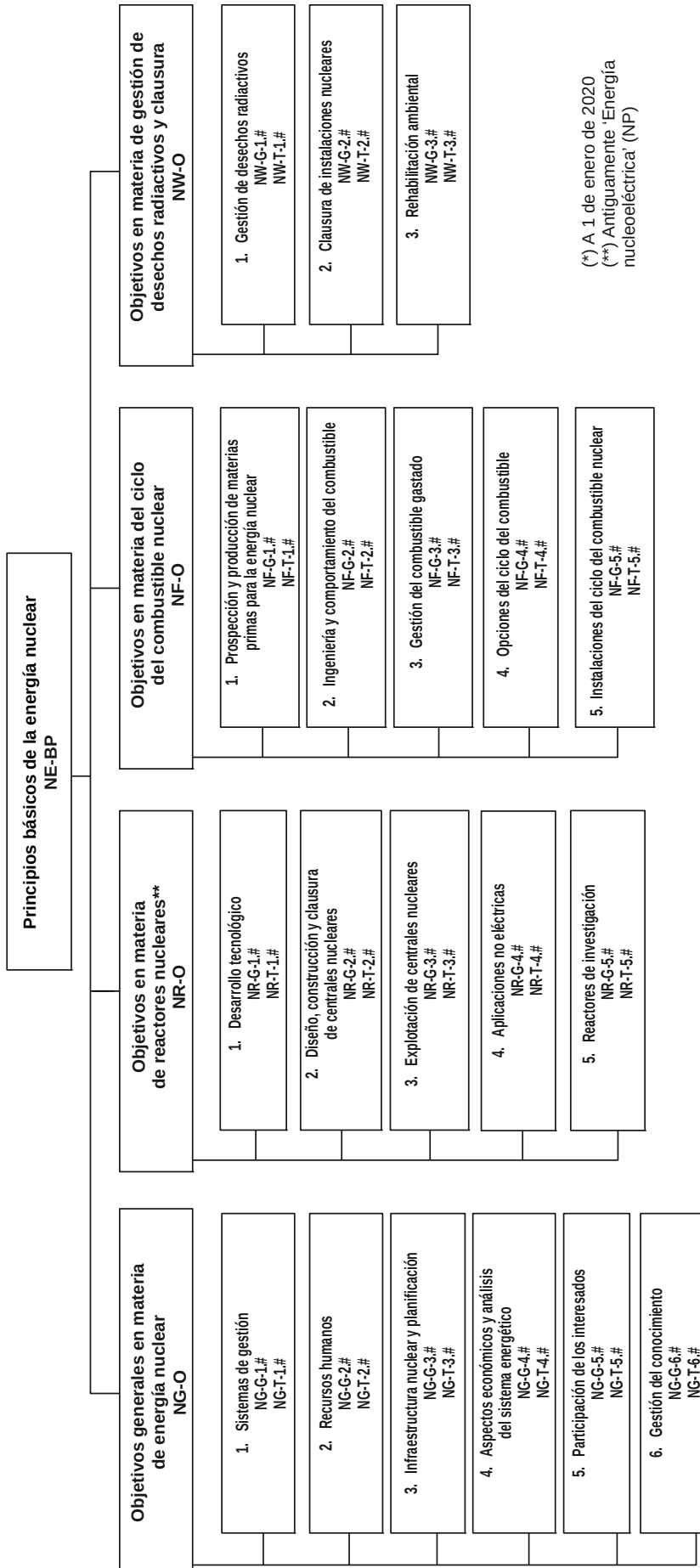
Reuniones de consultores

Viena (Austria): 31 de marzo a 4 de abril de 2008; 10 a 14 de mayo de 2010

Reunión técnica

Viena (Austria): 28 de septiembre a 2 de octubre de 2009

Estructura de la Colección de Energía Nuclear del OIEA*



(*) A 1 de enero de 2020
(**) Antiguamente 'Energía nucleoelectrónica' (NP)

Leyenda

BP: Principios básicos
O: Objetivos
G: Guías y metodologías
T: Informes técnicos
Nºs 1 a 6: Designación de temas
#: Número de guía o informe

Ejemplos

NG-G-3.1: Energía nuclear general (NG), Guías y metodologías (G), Infraestructura nuclear y planificación (tema 3), #1
NR-T-5.4: Reactores nucleares (NR), Informe técnico (T), Reactores de investigación (tema 5), #4
NF-T-3.6: Combustible nuclear (NF), Informe técnico (T), Gestión del combustible gastado (tema 3), #6
NW-G-1.1: Gestión de desechos radiactivos y clausura (NW), Guías y metodologías (G), Gestión de desechos radiactivos (tema 1) #1



IAEA

Organismo Internacional de Energía Atómica

Nº 26

PEDIDOS DE PUBLICACIONES

Las publicaciones de pago del OIEA pueden adquirirse a través de los proveedores que se indican a continuación o en las principales librerías locales.

Los pedidos de publicaciones gratuitas deben hacerse directamente al OIEA. Al final de la lista de proveedores se proporcionan los datos de contacto.

AMÉRICA DEL NORTE

Bernan / Rowman & Littlefield

15250 NBN Way, Blue Ridge Summit, PA 17214, EE. UU.

Teléfono: +1 800 462 6420 • Fax: +1 800 338 4550

Correo electrónico: order@renoufbooks.com • Sitio web: www.renoufbooks.com

Renouf Publishing Co. Ltd

22-1010 Polytek Street, Ottawa, ON K1J 9J1, CANADÁ

Teléfono: +1 613 745 2665 • Fax: +1 613 745 7660

Correo electrónico: order@renoufbooks.com • Sitio web: www.renoufbooks.com

RESTO DEL MUNDO

Póngase en contacto con su proveedor local de preferencia o con nuestro distribuidor principal:

Eurospan Group

Gray's Inn House

127 Clerkenwell Road

Londres EC1R 5DB

Reino Unido

Pedidos comerciales y consultas:

Teléfono: +44 (0)176 760 4972 • Fax: +44 (0)176 760 1640

Correo electrónico: eurospan@turpin-distribution.com

Pedidos individuales:

www.eurospanbookstore.com/iaea

Para más información:

Teléfono: +44 (0)207 240 0856 • Fax: +44 (0)207 379 0609

Correo electrónico: info@eurospangroup.com • Sitio web: www.eurospangroup.com

Los pedidos de publicaciones, tanto de pago como gratuitas, pueden enviarse directamente a:

Dependencia de Mercadotecnia y Venta

Organismo Internacional de Energía Atómica

Vienna International Centre, PO Box 100, 1400 Viena, Austria

Teléfono: +43 1 2600 22529 o 22530 • Fax: +43 1 26007 22529

Correo electrónico: sales.publications@iaea.org • Sitio web: <https://www.iaea.org/es/publicaciones>

