

Colección de Energía Nuclear del OIEA

Nº NW-T-1.4

Principios
básicos

Objetivos

Guías

Informes
técnicos

Diseño modular de instalaciones de procesamiento y almacenamiento de volúmenes pequeños de desechos radiactivos de actividad baja e intermedia, incluidas las fuentes selladas en desuso



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.

DISEÑO MODULAR DE INSTALACIONES DE
PROCESAMIENTO Y ALMACENAMIENTO
DE VOLÚMENES PEQUEÑOS DE
DESECHOS RADIACTIVOS DE ACTIVIDAD
BAJA E INTERMEDIA, INCLUIDAS LAS
FUENTES SELLADAS EN DESUSO

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

AFGANISTÁN	FILIPINAS	PAKISTÁN
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	SAMOA
BURKINA FASO	KENYA	SAN MARINO
BURUNDI	KIRGUISTÁN	SAN VICENTE Y
CAMBOYA	KUWAIT	LAS GRANADINAS
CAMERÚN	LESOTHO	SANTA LUCÍA
CANADÁ	LETONIA	SANTA SEDE
COLOMBIA	LÍBANO	SENEGAL
COMORAS	LIBERIA	SERBIA
CONGO	LIBIA	SEYCHELLES
COREA, REPÚBLICA DE	LIECHTENSTEIN	SIERRA LEONA
COSTA RICA	LITUANIA	SINGAPUR
CÔTE D'IVOIRE	LUXEMBURGO	SRI LANKA
CROACIA	MACEDONIA DEL NORTE	SUDÁFRICA
CUBA	MADAGASCAR	SUDÁN
CHAD	MALASIA	SUECIA
CHILE	MALAWI	SUIZA
CHINA	MALÍ	TAILANDIA
CHIPRE	MALTA	TAYIKISTÁN
DINAMARCA	MARRUECOS	TOGO
DJIBOUTI	MAURICIO	TRINIDAD Y TABAGO
DOMINICA	MAURITANIA	TÚNEZ
ECUADOR	MÉXICO	TURKMENISTÁN
EGIPTO	MÓNACO	TURQUÍA
EL SALVADOR	MONGOLIA	UCRANIA
EMIRATOS ÁRABES UNIDOS	MONTENEGRO	UGANDA
ERITREA	MOZAMBIQUE	URUGUAY
ESLOVAQUIA	MYANMAR	UZBEKISTÁN
ESLOVENIA	NAMIBIA	VANUATU
ESPAÑA	NEPAL	VENEZUELA, REPÚBLICA
ESTADOS UNIDOS	NICARAGUA	BOLIVARIANA DE
DE AMÉRICA	NÍGER	VIET NAM
ESTONIA	NIGERIA	YEMEN
ESWATINI	NORUEGA	ZAMBIA
ETIOPÍA	NUEVA ZELANDIA	ZIMBABWE
FEDERACIÓN DE RUSIA	OMÁN	
FIJI	PAÍSES BAJOS	

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”.

DISEÑO MODULAR DE
INSTALACIONES DE PROCESAMIENTO
Y ALMACENAMIENTO DE VOLÚMENES
PEQUEÑOS DE DESECHOS
RADIATIVOS DE ACTIVIDAD BAJA
E INTERMEDIA, INCLUIDAS LAS
FUENTES SELLADAS EN DESUSO

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 para incluir la propiedad intelectual de obras electrónicas y virtuales. Es preciso obtener autorización para utilizar textos completos, o parte de ellos, que figuren en publicaciones del OIEA, en formato impreso o electrónico, y, por lo general, esta estará sujeta a un acuerdo sobre regalías. Se aceptan propuestas relativas a la reproducción y la 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

Mayo de 2022

STI/PUB/1628

DISEÑO MODULAR DE INSTALACIONES
DE PROCESAMIENTO Y ALMACENAMIENTO
DE VOLÚMENES PEQUEÑOS DE DESECHOS
RADIATIVOS DE ACTIVIDAD BAJA E INTERMEDIA,
INCLUIDAS LAS FUENTES SELLADAS EN DESUSO

OIEA, VIENA, 2022

STI/PUB/1628

ISBN 978-92-0-325520-2 (papel)

ISBN 978-92-0-325620-9 (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, entre las que figuran 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* comprende 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 de utilidad a los propietarios y explotadores de empresas de servicios públicos de los Estados Miembros y a 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*.

Una serie de Estados Miembros del OIEA generan cantidades relativamente pequeñas de desechos radiactivos, que comprenden las fuentes selladas en desuso procedentes de las investigaciones y aplicaciones nucleares. La presente publicación es una respuesta a la necesidad de seguir apoyando a esos Estados Miembros en el establecimiento de nuevas instalaciones, o la mejora de las ya existentes, para que puedan procesar y almacenar sus desechos radiactivos de manera segura y eficaz en relación con el costo. Presenta un enfoque modular del diseño de esas instalaciones, flexible y adecuado para volúmenes relativamente pequeños de desechos con diferentes características, y ofrece orientaciones para la selección de las opciones técnicas y la formulación de las especificaciones de diseño y los procedimientos operacionales. La publicación se basa en el trabajo realizado por Nuvia Ltd, una empresa de ingeniería del Reino Unido contratada por el OIEA. Se espera que este enfoque de diseño modular sea útil a los Estados Miembros que estén planificando el establecimiento o la mejora de instalaciones de procesamiento y almacenamiento de desechos radiactivos derivados principalmente de aplicaciones no nucleoelectricas.

El OIEA da las gracias a quienes participaron en la elaboración y revisión de esta obra, en particular a D. Keene (Reino Unido), que coordinó los trabajos de Nuvia Ltd. Se recibieron aportaciones útiles de diversos talleres organizados para presentar el enfoque del diseño modular a los Estados Miembros en el marco del programa de cooperación técnica del OIEA. Agradecemos, en particular, las contribuciones de V. Tsyplenkov y Z. Drace. El funcionario del OIEA a cargo de esta publicación fue S.K. Samanta, de la División del Ciclo del Combustible Nuclear y de Tecnología de los Desechos.

NOTA EDITORIAL

Este informe ha sido editado por el personal de los servicios editoriales del OIEA en la medida en que se ha juzgado necesario para facilitar su lectura. En él no se abordan 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 el trazado de sus fronteras.

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

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 este libro 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.....	3
2.	TIPOS Y CANTIDADES DE CORRIENTES DE DESECHOS	5
3.	MÓDULOS DE PROCESAMIENTO DISPONIBLES	8
4.	SELECCIÓN DE LOS MÓDULOS DE PROCESAMIENTO ADECUADOS	12
4.1.	Consideraciones sobre la estrategia de gestión de desechos radiactivos.....	12
4.2.	Categorización de los desechos radiactivos	13
4.3.	Gestión de las fuentes selladas en desuso	17
4.3.1.	Fuentes de período corto	17
4.3.2.	Fuentes de período largo	18
4.4.	Gestión de desechos sólidos	18
4.4.1.	Desechos de materiales comprimibles o compactables	18
4.4.2.	Desechos de materiales biológicos.....	18
4.4.3.	Desechos de materiales no compactables	20
4.5.	Gestión de bajos volúmenes de desechos líquidos	20
4.5.1.	¿Hay suficiente volumen para el procesamiento inmediato?	20
4.6.	Gestión de altos volúmenes de desechos líquidos.....	21
4.6.1.	¿Hay suficiente volumen para el procesamiento inmediato?	21
4.6.2.	¿Existe una vía de descarga de desechos líquidos con límites autorizados? ...	21
4.6.3.	¿Es posible someter los desechos líquidos a un tratamiento que reduzca la contaminación a niveles acordes con los límites de descarga autorizados?....	21
4.6.4.	¿Contienen los desechos líquidos restos de aceites o disolventes?	23
4.6.5.	¿Procede la actividad principalmente de componentes insolubles, o tienen los desechos líquidos una composición química y radioisotópica muy compleja?	23
4.6.6.	¿Tienen los desechos líquidos una composición química y radioisotópica muy compleja?	23
4.6.7.	¿Tienen los radionucleidos solubles hidróxidos insolubles?	23
4.6.8.	¿Tienen los desechos líquidos un alto contenido de sales disueltas?	23
4.6.9.	¿Tienen los desechos líquidos un pH bajo (pH <6)?	24
4.6.10.	¿Requiere el residuo líquido algún otro tratamiento?	24
4.7.	Gestión de desechos líquidos orgánicos	24
4.7.1.	¿Hay suficiente volumen para el procesamiento inmediato?	24
4.7.2.	¿Existe una vía de descarga de desechos líquidos orgánicos con límites autorizados?	24
4.7.3.	¿Es posible someter los desechos líquidos orgánicos a una filtración que reduzca la contaminación a niveles acordes con los límites de descarga autorizados?	26

5.	INFORMACIÓN SOBRE EL DISEÑO Y LAS ESPECIFICACIONES DE LOS MÓDULOS DE PROCESAMIENTO	27
5.1.	Módulo A6—Solidificación	27
5.1.1.	Módulo A6 — Consideraciones generales	27
5.1.2.	Módulo A6 — Base de diseño	28
5.1.3.	Módulo A6 — Diagrama de flujo del proceso	28
5.1.4.	Módulo A6 — Lista del equipo	28
5.1.5.	Módulo A6 — Descripción del equipo	30
5.1.6.	Módulo A6 — Consideraciones relativas a la instalación	34
5.1.7.	Módulo A6 — Requisitos	35
5.1.8.	Módulo A6 — Descripción y funcionamiento del proceso	36
5.1.9.	Módulo A6 — Inconvenientes del proceso	37
5.1.10.	Módulo A6 — Requisitos de interconexión e integración	37
5.2.	Módulo B1—Tratamiento químico	37
5.2.1.	Módulo B1 — Consideraciones generales	37
5.2.2.	Módulo B1 — Base de diseño	37
5.2.3.	Módulo B1 — Diagrama de flujo del proceso	38
5.2.4.	Módulo B1 — Lista del equipo	40
5.2.5.	Módulo B1 — Descripción del equipo	42
5.2.6.	Módulo B1 — Consideraciones relativas a la instalación	45
5.2.7.	Módulo B1 — Requisitos	45
5.2.8.	Módulo B1 — Descripción y funcionamiento del proceso	46
5.2.9.	Módulo B1 — Inconvenientes del proceso	47
5.2.10.	Módulo B1 — Requisitos de interconexión e integración	48
5.3.	Módulo B2—Intercambio iónico	48
5.3.1.	Módulo B2 — Consideraciones generales	48
5.3.2.	Módulo B2 — Base de diseño	48
5.3.3.	Módulo B2 — Diagrama de flujo del proceso	49
5.3.4.	Módulo B2 — Lista del equipo	51
5.3.5.	Módulo B2 — Descripción del equipo	52
5.3.6.	Módulo B2 — Consideraciones relativas a la instalación	55
5.3.7.	Módulo B2 — Requisitos	55
5.3.8.	Módulo B2 — Descripción y funcionamiento del proceso	56
5.3.9.	Módulo B2 — Inconvenientes del proceso	57
5.3.10.	Módulo B2 — Requisitos de interconexión e integración	57
5.4.	Módulo B3—Ósmosis inversa	57
5.4.1.	Módulo B3 — Consideraciones generales	57
5.4.2.	Módulo B3 — Base de diseño	58
5.4.3.	Módulo B3 — Diagrama de flujo del proceso	59
5.4.4.	Módulo B3 — Lista del equipo	59
5.4.5.	Módulo B3 — Descripción del equipo	62
5.4.6.	Módulo B3 — Consideraciones relativas a la instalación	65
5.4.7.	Módulo B3 — Requisitos	65
5.4.8.	Módulo B3 — Descripción y funcionamiento del proceso	66
5.4.9.	Módulo B3 — Consideraciones operacionales adicionales	67
5.4.10.	Módulo B3 — Inconvenientes del proceso	67
5.4.11.	Módulo B3 — Requisitos de interconexión e integración	68
5.5.	Módulo B4—Filtración de flujo tangencial	68
5.5.1.	Módulo B4 — Consideraciones generales	68
5.5.2.	Módulo B4 — Base de diseño	69

5.5.3.	Módulo B4 — Diagrama de flujo del proceso	71
5.5.4.	Módulo B4 — Lista del equipo	71
5.5.5.	Módulo B4 — Descripción del equipo	73
5.5.6.	Módulo B4 — Consideraciones relativas a la instalación	76
5.5.7.	Módulo B4 — Requisitos	76
5.5.8.	Módulo B4 — Descripción y funcionamiento del proceso	77
5.5.9.	Módulo B4 — Inconvenientes del proceso	78
5.5.10.	Módulo B4 — Requisitos de interconexión e integración	78
5.6.	Módulo B5—Filtración	78
5.6.1.	Módulo B5 — Consideraciones generales	78
5.6.2.	Módulo B5 — Base de diseño	79
5.6.3.	Módulo B5 — Diagrama de flujo del proceso	81
5.6.4.	Módulo B5 — Lista del equipo	81
5.6.5.	Módulo B5 — Descripción del equipo	82
5.6.6.	Módulo B5 — Consideraciones relativas a la instalación	84
5.6.7.	Módulo B5 — Requisitos	84
5.6.8.	Módulo B5 — Descripción y funcionamiento del proceso	85
5.6.9.	Módulo B5 — Inconvenientes del proceso	85
5.6.10.	Módulo B5 — Requisitos de interconexión e integración	86
5.7.	Módulo B6—Solidificación	86
5.7.1.	Módulo B6 — Consideraciones generales	86
5.7.2.	Módulo B6 — Base de diseño	88
5.7.3.	Módulo B6 — Diagrama de flujo del proceso	88
5.7.4.	Módulo B6 — Lista del equipo	90
5.7.5.	Módulo B6 — Descripción del equipo	91
5.7.6.	Módulo B6 — Consideraciones relativas a la instalación	93
5.7.7.	Módulo B6 — Requisitos	94
5.7.8.	Módulo B6 — Descripción y funcionamiento del proceso	94
5.7.9.	Módulo B6 — Inconvenientes del proceso	95
5.7.10.	Módulo B6 — Requisitos de interconexión e integración	96
5.8.	Módulo D2—Compactación de baja fuerza	96
5.8.1.	Módulo D2 — Consideraciones generales	96
5.8.2.	Módulo D2 — Base de diseño	96
5.8.3.	Módulo D2 — Descripción del equipo	97
5.8.4.	Módulo D2 — Consideraciones relativas a la instalación	99
5.8.5.	Módulo D2 — Requisitos	99
5.8.6.	Módulo D2 — Descripción y funcionamiento del proceso	100
5.8.7.	Módulo D2 — Inconvenientes del proceso	100
5.8.8.	Módulo D2 — Requisitos de interconexión e integración	100
5.9.	Módulo D3—Cabina sin blindaje	101
5.9.1.	Módulo D3 — Consideraciones generales	101
5.9.2.	Módulo D3 — Base de diseño	102
5.9.3.	Módulo D3 — Descripción del equipo	103
5.9.4.	Módulo D3 — Consideraciones relativas a la instalación	104
5.9.5.	Módulo D3 — Requisitos	104
5.9.6.	Módulo D3 — Descripción y funcionamiento del proceso	105
5.9.7.	Módulo D3 — Inconvenientes	105
5.9.8.	Módulo D3 — Integración con otros módulos de proceso	105
5.10.	Módulo E1—Encapsulamiento	106
5.10.1.	Módulo E1 — Consideraciones generales	106
5.10.2.	Módulo E1 — Base de diseño	107
5.10.3.	Módulo E1 — Diagrama de flujo del proceso	109
5.10.4.	Módulo E1 — Lista del equipo	109
5.10.5.	Módulo E1 — Descripción del equipo	110

5.10.6.	Módulo E1 — Consideraciones relativas a la instalación	111
5.10.7.	Módulo E1 — Requisitos	112
5.10.8.	Módulo E1 — Descripción y funcionamiento del proceso	112
5.10.9.	Módulo E1 — Inconvenientes del proceso	113
5.10.10.	Módulo E1 — Requisitos de interconexión e integración	114
5.11.	Módulo L4—Celda caliente	114
5.11.1.	Módulo L4 — Consideraciones generales	114
5.11.2.	Módulo L4 — Base de diseño	115
5.11.3.	Módulo L4 — Descripción del equipo	116
5.11.4.	Módulo L4 — Descripción y funcionamiento del proceso	121
5.11.5.	Otras consideraciones operacionales	122
6.	INTEGRACIÓN DE LOS MÓDULOS DE PROCESAMIENTO	124
6.1.	Módulos de procesamiento de desechos sólidos	124
6.2.	Módulos de procesamiento de bajos volúmenes de desechos líquidos orgánicos y acuosos	125
6.3.	Módulos de procesamiento de altos volúmenes de desechos acuosos	126
6.4.	Contenedores ISO	128
7.	TIPOS Y CANTIDADES DE BULTOS DE DESECHOS ACONDICIONADOS PARA EL ALMACENAMIENTO	130
7.1.	Criterios de aceptación de desechos	130
7.1.1.	Tamaño/peso de los bultos	130
7.1.2.	Características radiológicas	130
7.2.	Número de bultos	131
8.	MÓDULOS DE ALMACENAMIENTO DISPONIBLES	133
8.1.	Determinación de las opciones	133
8.2.	Examen y evaluación de las opciones	133
8.2.1.	Armario blindado	133
8.2.2.	Sala destinada a ese fin	134
8.2.3.	Contenedores de hormigón	134
8.2.4.	Contenedores ISO	135
8.2.5.	Tubería de hormigón	136
8.2.6.	Búnker o zanja de hormigón	137
8.2.7.	Cámaras acorazadas o tubos subterráneos	138
8.2.8.	Grutas, minas y túneles	139
8.2.9.	Edificio industrial construido para ese fin	139
8.2.10.	Edificio ya existente	140
8.2.11.	Almacenamiento al aire libre, sobre una superficie dura (climas secos)	140
9.	SELECCIÓN DE LOS MÓDULOS DE ALMACENAMIENTO ADECUADOS	142
9.1.	Consideraciones sobre la estrategia de almacenamiento	142
9.1.1.	¿Hay desechos en muchas partes del país?	142
9.2.	Selección del tipo de instalación de almacenamiento	142
9.2.1.	¿Se conocen el inventario total y la clasificación de los desechos que se almacenarían en una nueva instalación?	142
9.2.2.	¿Hay fuentes de radiación de actividad alta que deban almacenarse?	145
9.2.3.	¿Se trata de un número reducido de bultos de desechos pequeños?	145
9.2.4.	¿Se prevé un inventario total de bultos de desechos inferior a 20 bidones? ...	145

9.2.5.	¿Se recibe típicamente un volumen anual de desechos superior a 50 bidones?	145
9.2.6.	¿Se prevé un período de almacenamiento superior a 10 años?	145
9.2.7.	¿Habrá visitas de inspección periódicas de los bultos de desechos?	145
9.3.	Requisitos de ventilación.	146
9.3.1.	¿Comprenden las condiciones ambientales del lugar períodos prolongados de humedad relativa alta?	146
9.3.2.	¿Es posible embalar los desechos en bidones de acero inoxidable?	148
9.3.3.	¿Es probable que se liberen nucleidos volátiles o gases peligrosos?	148
9.3.4.	¿Se requerirá ventilación para reducir la exposición?	148
9.3.5.	¿Es posible lograr la ventilación necesaria por medios naturales?	148
9.4.	Requisitos de blindaje	148
9.4.1.	¿Tienen las superficies de los bultos de desechos tasas de dosis aceptables para la manipulación por contacto?	149
9.4.2.	¿Serán las tasas de dosis resultantes del conjunto de bultos de desechos inferiores a los límites reglamentarios para el trabajo en la instalación de almacenamiento?	149
9.4.3.	¿Se han optimizado las tasas de dosis resultantes del conjunto de bultos de desechos para los operadores de la instalación de almacenamiento?	149
9.5.	Requisitos de manipulación mecánica.	151
9.5.1.	¿Será posible manipular manualmente los bultos de desechos en condiciones de seguridad?	152
9.5.2.	¿Exigirán el tamaño y la cantidad de los bultos de desechos el uso de dispositivos de manipulación eléctricos?	152
9.5.3.	¿Existirá un suministro de electricidad para el equipo de manipulación eléctrica?	152
9.6.	Ejecución del proyecto de la instalación de almacenamiento	153
9.6.1.	Instalación de almacenamiento nueva o ya existente.	153
9.6.2.	¿Se ha seleccionado el emplazamiento?	153
9.6.3.	¿Se ha concedido la aprobación reglamentaria para el emplazamiento de la instalación de almacenamiento en el lugar seleccionado?	155
9.6.4.	¿Se ha concedido el permiso de obra para crear la instalación de almacenamiento en el emplazamiento seleccionado?	155
10.	INFORMACIÓN SOBRE EL DISEÑO Y LAS ESPECIFICACIONES DE LOS MÓDULOS DE ALMACENAMIENTO.	156
10.1.	Edificio nuevo construido para el almacenamiento.	156
10.1.1.	Requisito funcional general	156
10.1.2.	Alcance de la obra	156
10.1.3.	Ubicación del edificio de almacenamiento	157
10.1.4.	Descripción de los desechos.	157
10.1.5.	Período de almacenamiento	157
10.1.6.	Requisitos operacionales (condiciones normales y anormales).	157
10.1.7.	Información y registros	159
10.1.8.	Requisitos funcionales de la construcción	159
10.1.9.	Requisitos referentes a la manipulación mecánica	165
10.1.10.	Requisitos referentes al equipo mecánico	166
10.1.11.	Requisitos referentes al equipo eléctrico	166
10.1.12.	Control ambiental.	167
10.1.13.	Condiciones ambientales	168
10.1.14.	Sismicidad	168
10.1.15.	Requisitos referentes a la calefacción, la ventilación y el aire acondicionado — optativos	168

10.1.16.	Requisitos de seguridad radiológica	169
10.1.17.	Requisitos de seguridad industrial	170
10.1.18.	Requisitos de protección/seguridad físicas	171
10.1.19.	Requisitos de mantenimiento e inspección	171
10.1.20.	Fiabilidad	171
10.1.21.	Normas aplicables	171
10.1.22.	Sistema de gestión	172
10.1.23.	Capacitación	173
10.1.24.	Garantía	173
11.	DIRECTRICES OPERACIONALES PARA UNA INSTALACIÓN DE PROCESAMIENTO Y ALMACENAMIENTO DE DESECHOS	174
11.1.	Responsabilidades del explotador	174
11.2.	Sistema de gestión	175
11.2.1.	Gestión y dotación de personal	175
11.2.2.	Procedimientos de control de las operaciones	176
12.	PLANIFICACIÓN Y PREPARACIÓN PARA LA CREACIÓN DE UNA INSTALACIÓN DE PROCESAMIENTO Y ALMACENAMIENTO DE DESECHOS	181
12.1.	Política y estrategia nacionales	181
12.2.	Marco jurídico y reglamentario	181
12.3.	Planificación y selección de las opciones de procesamiento.	182
12.4.	Diseño y construcción de las instalaciones	182
12.5.	Autorización y concesión de la licencia	183
12.6.	Seguridad	184
	CONCLUSIONES	186
ANEXO I:	ORIENTACIONES SOBRE LA PREPARACIÓN DE LOS PLIEGOS DE CONDICIONES TÉCNICAS PARA LA ADQUISICIÓN	187
ANEXO II:	EJEMPLOS DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA ADQUISICIÓN DE MÓDULOS DE PROCESAMIENTO	191
	COLABORADORES EN LA REDACCIÓN Y LA REVISIÓN	207
	ESTRUCTURA DE LA COLECCIÓN DE ENERGÍA NUCLEAR DEL OIEA	209

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Una serie de Estados Miembros del OIEA generan cantidades relativamente pequeñas de desechos radiactivos y/o fuentes selladas en desuso en la aplicación de técnicas nucleares en la medicina, la industria y la investigación, y en los centros de estudios nucleares que poseen pequeños reactores de investigación. Como parte de sus actividades para ayudar a estos Estados Miembros a gestionar sus desechos radiactivos de manera segura y eficaz en relación con el costo, el OIEA elaboró en los años noventa un diseño de referencia para la construcción de una instalación de procesamiento y almacenamiento de desechos centralizada [1.1]. Más o menos por la misma época, el OIEA desarrolló también un diseño de referencia para una instalación centralizada dedicada a las fuentes selladas gastadas [1.2]. Este diseño, consistente en una instalación de acondicionamiento y un edificio de almacenamiento provisional, estaba destinado a los países que producían pequeñas cantidades de desechos, principalmente fuentes selladas y otros desechos sólidos de las aplicaciones nucleares.

Esos diseños de referencia han sido utilizados desde entonces por algunos Estados Miembros en sus procesos encaminados a establecer instalaciones nacionales para el procesamiento y almacenamiento de desechos radiactivos, incluidas las fuentes selladas en desuso. Sin embargo, la realidad actual es que algunos Estados Miembros del OIEA, especialmente aquellos que generan cantidades muy pequeñas de desechos radiactivos, aún no tienen instalaciones adecuadas para procesar y almacenar esos desechos. En el caso de otros Estados Miembros, las instalaciones de procesamiento y almacenamiento de desechos que existen necesitan distintos grados de mejoras para hacer frente a las nuevas corrientes de desechos, incorporar nuevas tecnologías de procesamiento o ampliar su capacidad de almacenamiento provisional. Por consiguiente, es necesario seguir apoyando a esos Estados Miembros en el establecimiento de nuevas instalaciones de ese tipo o en la mejora de las ya existentes.

Debido a la amplia variación de los tipos y cantidades de desechos radiactivos, los diseños fijos, como los elaborados en el pasado, pueden no ser adecuados para atender a las diferentes necesidades de esos Estados Miembros. Un modo muy eficaz de introducir la flexibilidad requerida en el procesamiento de los desechos es concebir una instalación de procesamiento y almacenamiento que se base en una variedad de módulos que realicen diferentes procesos de tratamiento y acondicionamiento de las corrientes de desechos. Cada módulo podrá construirse localmente o recibirse prefabricado, montado sobre una plataforma, y combinarse luego con otros módulos, en función de las necesidades específicas de cada país. De igual forma, los diferentes conceptos de módulos de almacenamiento, que abarcan desde simples armarios hasta edificios diseñados para ese fin, permitirán seleccionar la solución más adecuada, teniendo en cuenta el volumen de desechos que se deba almacenar.

La presente publicación es fruto de un esfuerzo por responder a las necesidades de los Estados Miembros con un enfoque de diseño modular, más flexible y adecuado que los dos diseños de referencia anteriores, para volúmenes relativamente pequeños de desechos de diferentes características. Está destinada principalmente a los profesionales que trabajan en la gestión de desechos y tienen la responsabilidad de seleccionar, diseñar y desplegar sistemas de procesamiento y almacenamiento. También podrá ser de ayuda a los reguladores encargados de examinar estos sistemas y de otorgar las licencias correspondientes en esos Estados Miembros.

1.2. OBJETIVO

El objetivo principal de esta publicación es presentar un enfoque de diseño modular para las instalaciones de procesamiento y almacenamiento de los volúmenes relativamente pequeños de desechos de diferentes características que se generan en la investigación y las aplicaciones nucleares. La publicación ofrece orientaciones sobre los requisitos generales para el establecimiento de esas

instalaciones, la selección de las opciones técnicas de procesamiento y almacenamiento, y la formulación de las especificaciones de diseño y los procedimientos operacionales.

1.3. ÁMBITO DE APLICACIÓN

Esta publicación está destinada a los Estados Miembros que producen volúmenes pequeños de desechos radiactivos de actividad baja e intermedia, con inclusión de fuentes radiactivas selladas en desuso. En particular, está dirigida a:

- los Estados Miembros que no tienen instalaciones para procesar y almacenar sus desechos radiactivos;
- otros Estados Miembros que tienen instalaciones de ese tipo, pero que necesitan mejorarlas, en distinto grado, para tratar nuevas corrientes de desechos, incorporar nuevas tecnologías de procesamiento o ampliar su capacidad de almacenamiento provisional.

La información sobre el diseño y las especificaciones presentada en esta publicación debería permitir a los usuarios determinar lo que necesitan, especificar sus requisitos para la adquisición de los módulos de procesamiento y almacenamiento adecuados, instalar esos módulos y, por último, explotarlos. No incluye diseños de ingeniería detallados de las plantas modulares de tratamiento de desechos, ni de los módulos de almacenamiento de desechos.

El conjunto de diseños presentado en esta publicación no se aplica a los desechos especiales generados en un número reducido de países ni a los desechos presentes en grandes cantidades (como los materiales radiactivos naturales (NORM), los desechos de la extracción y el tratamiento de minerales y los desechos de las centrales nucleares).

1.4. ESTRUCTURA

Después de esta introducción, la sección 2 ofrece un resumen de los tipos y cantidades de corrientes de desechos líquidos y sólidos, incluidas las fuentes selladas en desuso, que sirvieron de base para elaborar las especificaciones de los módulos de tratamiento y acondicionamiento y los diseños de concepto de los módulos.

En la sección 3 se describen brevemente los diversos tipos de módulos de procesamiento examinados en esta obra. La sección 4 proporciona orientaciones sobre la selección de los módulos de procesamiento adecuados para aplicaciones particulares con ayuda de diagramas de decisiones.

La sección 5 contiene orientaciones detalladas para el diseño y la especificación de los diferentes módulos de procesamiento, con información sobre la base de diseño, diagramas de flujo de los procesos, listas y descripciones de los equipos, información sobre los servicios e instalaciones requeridos y descripciones de los procesos, entre otras cosas, todo ello presentado en formatos que pueden adaptarse a los pliegos de condiciones para la adquisición. La información contenida en cada módulo se puede utilizar con total independencia del resto de la publicación.

La sección 6 ofrece orientaciones sobre la integración de los módulos de proceso.

En la sección 7 se resumen los tipos y cantidades de bultos de desechos acondicionados que resultarán del procesamiento y que será preciso almacenar.

En la sección 8 se describen brevemente los distintos tipos de módulos de almacenamiento examinados en esta obra, y la sección 9 ofrece orientaciones sobre la selección de las opciones de almacenamiento adecuadas para determinadas aplicaciones con ayuda de diagramas de decisiones.

La sección 10 contiene orientaciones detalladas sobre el diseño y las especificaciones de los módulos de almacenamiento, utilizando como ejemplo un edificio de almacenamiento construido específicamente para ese fin. Comprende información sobre los requisitos funcionales de la construcción y sobre los

requisitos referentes a la explotación, la manipulación mecánica, el equipo mecánico y eléctrico, el control ambiental, la sismicidad, la seguridad radiológica e industrial, el mantenimiento y la inspección, y la protección física, entre otras cosas, presentada en descripciones que pueden adaptarse a los pliegos de condiciones para la adquisición.

En la sección 11 se describen a grandes rasgos las directrices operacionales aplicables a una instalación de procesamiento y almacenamiento de desechos, y la sección 12 brinda una visión de conjunto de los principales requisitos para el establecimiento de una instalación de ese tipo. En la sección 13 se presentan las conclusiones.

En el anexo I se resumen los epígrafes y el contenido típicos de un pliego de condiciones técnicas para la adquisición. El anexo II ofrece al usuario orientaciones sobre la forma de indicar los requisitos para la adquisición de los distintos módulos, con ejemplos de las especificaciones para la compra de uno de ellos.

1.5. DEFINICIONES IMPORTANTES

A continuación se definen algunos términos importantes que se utilizan en la presente publicación [1.3].

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.

Almacenamiento. Colocación de fuentes radiactivas, combustible gastado o desechos radiactivos en una instalación dispuesta para su contención, con la intención de recuperarlos.

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.

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.

Fuente en desuso. Fuente radiactiva que ya no se utiliza, ni se tiene la intención de utilizar, en la práctica para la cual se otorgó la autorización.

Fuente sellada. Material radiactivo que está a) permanentemente sellado en una cápsula, o b) fuertemente consolidado y en forma sólida.

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.

Procesamiento. Cualquier operación que modifique las características de los desechos, incluidos el tratamiento previo, el tratamiento y el acondicionamiento.

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.

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.

Sobreembalaje. Contenedor secundario (o adicional) externo para uno o más bultos de desechos, empleado para la manipulación, el transporte, el almacenamiento o la disposición final.

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: a) la reducción del volumen; b) la extracción de los radionucleidos presentes en los desechos; c) 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.

REFERENCIAS DE LA SECCIÓN 1

- [1.1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Reference Design for a Centralized Waste Processing and Storage Facility, IAEA-TECDOC-776, IAEA, Vienna (1994).
- [1.2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Reference Design for a Centralized Spent Sealed Sources Facility, IAEA-TECDOC-806, IAEA, Vienna (1995).
- [1.3] 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.

2. TIPOS Y CANTIDADES DE CORRIENTES DE DESECHOS

Como se mencionó en la sección 1, la presente publicación aborda las necesidades de los Estados Miembros que generan cantidades relativamente pequeñas de desechos de actividad baja e intermedia y fuentes selladas en desuso. En otros trabajos del OIEA se han examinado las corrientes de desechos típicas generadas por esos Estados Miembros y se han determinado sus características principales. El cuadro 2.1 ofrece un resumen de esas corrientes de desechos. Se parte del supuesto de que estas corrientes requerirán un procesamiento para producir bultos de desechos acondicionados, que se almacenarán, si no hay otras opciones de gestión disponibles. Cabe señalar que no todos los Estados Miembros generarán necesariamente todas estas corrientes de desechos.

La información sobre las corrientes de desechos proporcionada en este cuadro sirvió de base para elaborar las especificaciones de los módulos de tratamiento y acondicionamiento de desechos, así como los diseños de concepto de esos módulos. Cada corriente de desechos está identificada por una letra (A: bajos volúmenes de líquidos acuosos; B: altos volúmenes de líquidos acuosos, etc.); esas letras se utilizan también para identificar los distintos módulos de tratamiento y acondicionamiento de desechos.

La presente publicación no se ocupa específicamente de los desechos y las fuentes selladas en desuso que tienen radionucleidos de período muy corto y pueden almacenarse a la espera de su desintegración radiactiva. Esos desechos no se incluyen en el cuadro 2.1, ya que bastará almacenarlos en condiciones de seguridad hasta que alcancen los niveles de dispensa.

CUADRO 2.1. DESCRIPCIÓN DE LAS CORRIENTES DE DESECHOS

Letra de referencia en la matriz ^a	Corriente de desechos	Cantidad que se procesará anualmente	Tipo y origen de los desechos ^b	Características de los desechos
A	Bajos volúmenes de líquidos acuosos.	Típicamente hasta 0,5 m ³ ; para el diseño de referencia debería emplearse un valor de 0,1 m ³ .	Laboratorios, hospitales, etc.	Principalmente de bajos niveles de actividad, un único o varios radionucleidos, y composición química de simple a compleja.
B	Altos volúmenes de líquidos acuosos.	Típicamente entre 0,5 m ³ y 10 m ³ ; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 5 m ³ .	Laboratorios, celdas calientes, piscinas de almacenamiento del combustible gastado de reactores de investigación, descontaminación, líquidos de sumideros y enjuagues, etc.	Principalmente de bajos niveles de actividad, un único o varios radionucleidos, y composición química de simple a compleja.
C	Líquidos orgánicos.	Típicamente menos de 0,3 m ³ ; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 0,1 m ³ .	Soluciones de centelleo, aceites (p. ej., de bombas), disolvente de extracción, etc.	Principalmente de bajos niveles de actividad y un único o varios radionucleidos.

CUADRO 2.1. DESCRIPCIÓN DE LAS CORRIENTES DE DESECHOS (cont.)

Letra de referencia en la matriz ^a	Corriente de desechos	Cantidad que se procesará anualmente	Tipo y origen de los desechos ^b	Características de los desechos
D	Sólidos compactables.	Típicamente menos de 20 m ³ ; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 5 m ³ .	Papel, cartón, plásticos, caucho, guantes, etc.	De una actividad total típicamente inferior a 50 GBq y sin cantidades importantes de radionucleidos de período largo.
E	Sólidos no compactables.	Típicamente menos de 5 m ³ ; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 1 m ³ .	Materiales de vidrio, elementos metálicos, chatarra, etc.; las fuentes selladas en desuso se consideran una corriente de desechos aparte.	De una actividad total típicamente inferior a 10 GBq y sin cantidades importantes de radionucleidos de período largo.
F	Resinas de intercambio iónico.	Típicamente menos de 0,5 m ³ ; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 0,1 m ³ .	Resinas de intercambio iónico: tanque y piscina de almacenamiento del combustible gastado de un reactor de investigación, desecho secundario del tratamiento por intercambio iónico, etc.	De una actividad total típicamente inferior a 1 GBq y sin cantidades importantes de radionucleidos de período largo.
G	Lodos.	Típicamente menos de 0,5 m ³ ; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 0,1 m ³ .	Lodos: desechos secundarios de la evaporación y el tratamiento químico, etc.	De una actividad total típicamente inferior a 1 GBq y sin cantidades importantes de radionucleidos de período largo.
H	Fuentes selladas en desuso con isótopos de período corto. ^c	Amplia variación en el número de fuentes; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 20.	Aplicaciones médicas, industriales y de investigación, etc.	A este respecto, de período corto significa de un período de semidesintegración inferior o igual a 30 años.
J	Fuentes selladas en desuso con isótopos de período largo. ^b	Amplia variación en el número de fuentes; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 20.	Aplicaciones médicas, industriales y de investigación, etc.	A este respecto, de período largo significa de un período de semidesintegración superior a 30 años.
K	Desechos biológicos (animales muertos).	Típicamente hasta 0,5 m ³ ; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 0,1 m ³ .	Aplicaciones e investigaciones médicas. Tipo: esqueletos, tejidos y fluidos corporales de animales muertos.	Típicamente, pequeñas cantidades de ³ H o ¹⁴ C. Los peligros se deben principalmente a los materiales biológicos y patológicos.

CUADRO 2.1. DESCRIPCIÓN DE LAS CORRIENTES DE DESECHOS (cont.)

Letra de referencia en la matriz ^a	Corriente de desechos	Cantidad que se procesará anualmente	Tipo y origen de los desechos ^b	Características de los desechos
L	Fuentes selladas en desuso de actividad alta.	Típicamente, 1 o 2 fuentes por año.	Aplicaciones médicas, industriales y de investigación, etc.	Típicamente, de las categorías 1 y 2 definidas en la publicación N° RS-G-1.9 de la <i>Colección de Normas de Seguridad del OIEA</i> [2.2]. Los radionucleidos comunes comprenden el ¹³⁷ Cs y el ⁶⁰ Co.

^a Véase la sección 3.

^b Véanse más detalles sobre algunas de estas corrientes de desechos en la referencia [2.1].

^c Las fuentes de actividad más alta, típicamente de las categorías 1 y 2 definidas en la publicación N° RS-G-1.9 de la *Colección de Normas de Seguridad del OIEA* [2.2], se tratan por separado en la corriente de desechos L y, por lo tanto, no están incluidas en estas corrientes de desechos.

REFERENCIAS DE LA SECCIÓN 2

- [2.1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Handling and Processing of Radioactive Waste from Nuclear Applications, Technical Reports Series No. 402, IAEA, Vienna (2001).
- [2.2] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Clasificación de las fuentes radiactivas*, *Colección de Normas de Seguridad del OIEA* N° RS-G-1.9, OIEA, Viena, 2009.

3. MÓDULOS DE PROCESAMIENTO DISPONIBLES

Se han definido 11 módulos de proceso diferentes para el tratamiento y acondicionamiento de las distintas corrientes de desechos examinadas en la sección 2. La matriz de corrientes de desechos y procesos que se presenta en el cuadro 3.1 indica las tecnologías de procesamiento de desechos o los ‘módulos de procesamiento’ más comunes que utilizarán probablemente los Estados Miembros, y correlaciona esos procesos con las corrientes de desechos.

Obsérvese que cada corriente de desechos está identificada en la columna de la izquierda por la letra que se utilizó en el cuadro 2.1 para su descripción. Además, cada módulo de proceso está identificado por la letra de la corriente de desechos, seguida de un designador numérico del proceso (por ejemplo, el Módulo A6 corresponde a la corriente de desechos A y el módulo 6, que designa la tecnología de procesamiento por ‘solidificación’).

El abanico de tecnologías de procesamiento de desechos disponible es amplio [3.1 a 3.6]. Sin embargo, no todas esas tecnologías se consideran adecuadas para las aplicaciones incluidas en el conjunto de diseños presentado en esta publicación. Por ejemplo, algunas de ellas, como la evaporación y la incineración, que pueden utilizarse para tratar desechos radiactivos en otras circunstancias, han sido evaluadas y consideradas no idóneas, por ser demasiado costosas y complejas para los volúmenes relativamente pequeños de desechos previstos en este contexto.

Partiendo de la matriz de las corrientes de desechos y los procesos, el siguiente cuadro 3.2 presenta una descripción resumida de los distintos módulos de proceso y la principal corriente de desechos a la que están destinados.

Cabe señalar que varias de las tecnologías de procesamiento de desechos pueden aplicarse a diferentes corrientes de desechos; por ejemplo, el módulo de ‘encapsulamiento’ para desechos no compactables será capaz de encapsular también fuentes selladas en desuso y cadáveres de animales. Por lo tanto, no es necesario utilizar un módulo de proceso diferente para cada corriente de desechos. En el cuadro 3.2 se resumen las corrientes de desechos para las que puede ser adecuado cada módulo de procesamiento.

CUADRO 3.1. MATRIZ DE LAS CORRIENTES DE DESECHOS Y LOS PROCESOS

		Módulo de procesamiento									
		Desechos líquidos y sólidos húmedos						Desechos sólidos			
Letra de referencia	Corriente de desechos	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4
		Tratamiento químico	Intercambio iónico	Ósmosis inversa	Filtración de flujo tangencial	Filtración	Solidificación	Encapsulamiento	Compactación de baja fuerza	Uso de una cabina sin blindaje	Uso de un módulo de celda caliente
A	Bajos volúmenes de líquidos acuosos						A6				
B	Altos volúmenes de líquidos acuosos	B1	B2	B3	B4	B5	B6				
C	Líquidos orgánicos				Igual que B4	Igual que B5	Igual que A6				
D	Sólidos comprimibles / compactables								D2	D3	
E	Sólidos no compactables							E1		Igual que D3	
F	Resinas de intercambio iónico						Igual que A6				
G	Lodos						Igual que A6				
H	Fuentes selladas en desuso con isótopos de período corto (período de semidesintegración ≤ 30 años)							Igual que E1		Igual que D3	
J	Fuentes selladas en desuso con isótopos de período largo (período de semidesintegración > 30 años)							Igual que E1		Igual que D3	
K	Desechos biológicos (animales muertos)							Igual que E1			
L	Fuentes selladas en desuso de actividad alta										L4

CUADRO 3.2. DESCRIPCIÓN RESUMIDA DE LOS MÓDULOS DE PROCESAMIENTO Y LAS CORRIENTES DE DESECHOS A LAS QUE SE APLICAN

Núm. del módulo	Nombre y descripción del módulo	Corriente de desechos principal	Otras corrientes de desechos compatibles
A1	Solidificación Hormigonado de cantidades limitadas de desechos líquidos en contenedores pequeños (típicamente <20 L).	Lodos (volúmenes pequeños); bajos volúmenes de líquidos acuosos; resinas de intercambio iónico (volúmenes pequeños).	Líquidos orgánicos.
B1	Tratamiento químico Tratamiento de líquidos acuosos por lotes (típicamente <500 L) para ajustar el pH o para descontaminarlos por precipitación de radionucleidos.	Altos volúmenes de líquidos acuosos.	
B2	Intercambio iónico Tratamiento de líquidos acuosos por lotes (típicamente <500 L) para descontaminarlos eliminando radionucleidos solubles por intercambio iónico.	Altos volúmenes de líquidos acuosos.	
B3	Ósmosis inversa Tratamiento de líquidos acuosos por lotes (típicamente <500 L) para descontaminarlos eliminando radionucleidos solubles e insolubles por ósmosis inversa.	Altos volúmenes de líquidos acuosos.	
B4	Filtración de flujo tangencial Tratamiento de líquidos acuosos por lotes (típicamente <500 L) para descontaminarlos eliminando radionucleidos solubles e insolubles por filtración de membrana.	Altos volúmenes de líquidos acuosos.	Líquidos orgánicos.
B5	Filtración Tratamiento de líquidos acuosos por lotes (típicamente <500 L) para descontaminarlos eliminando los sólidos por filtración de cartucho.	Altos volúmenes de líquidos acuosos.	Líquidos orgánicos.
B6	Solidificación Hormigonado de lodos residuales o desechos líquidos dentro de un bidón para generar un producto de desecho sólido.	Altos volúmenes de líquidos acuosos.	Lodos (volúmenes grandes). Medios de intercambio iónico (volúmenes grandes).
D2	Compactación de baja fuerza Compactación de desechos ‘blandos’ dentro de un bidón para reducir el volumen de desechos.	Sólidos compactables.	
D3	Cabina sin blindaje Recinto para la clasificación y segregación manuales de desechos sólidos antes del procesamiento o acondicionamiento.	Sólidos compactables.	Sólidos no compactables. Fuentes selladas en desuso (bajas tasas de dosis).

CUADRO 3.2. DESCRIPCIÓN RESUMIDA DE LOS MÓDULOS DE PROCESAMIENTO Y LAS CORRIENTES DE DESECHOS A LAS QUE SE APLICAN (cont.)

Núm. del módulo	Nombre y descripción del módulo	Corriente de desechos principal	Otras corrientes de desechos compatibles
E1	Encapsulamiento Encapsulamiento de desechos en una lechada de cemento.	Sólidos no compactables.	Fuentes selladas en desuso en condiciones especiales.
L4	Módulo de celda caliente Celda blindada con dispositivos de manipulación a distancia para el desmantelamiento y reembalaje de fuentes de actividad alta.	Fuentes selladas en desuso de actividad alta.	

REFERENCIAS DE LA SECCIÓN 3

- [3.1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Handling and Processing of Radioactive Waste from Nuclear Applications, Technical Reports Series No. 402, IAEA, Vienna (2001).
- [3.2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Selection of Efficient Options for Processing and Storage of Radioactive Waste in Countries with Small Amounts of Waste Generation, IAEA-TECDOC-1371, IAEA, Vienna (2003).
- [3.3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Treatment and Conditioning of Radioactive Organic Liquids, IAEA-TECDOC-656, IAEA, Vienna (1992).
- [3.4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Treatment and Conditioning of Radioactive Solid Wastes, IAEA-TECDOC-655, IAEA, Vienna (1992).
- [3.5] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Handling and Treatment of Radioactive Aqueous Wastes, IAEA-TECDOC-654, IAEA, Vienna (1992).
- [3.6] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Techniques and Practices for Pretreatment of Low and Intermediate Level Solid and Liquid Radioactive Wastes, IAEA Technical Reports Series No. 272, IAEA, Vienna (1987).

4. SELECCIÓN DE LOS MÓDULOS DE PROCESAMIENTO ADECUADOS

En la sección 3 se señalan varias opciones de procesamiento que podrían ser adecuadas para las corrientes de desechos examinadas en esta publicación. A fin de orientar la determinación de las opciones de gestión posibles para esas corrientes de desechos, se han elaborado una serie de diagramas de decisiones. El que se presenta en la figura 4.1 ayuda a decidir si es necesario proceder al procesamiento y almacenamiento, con vistas a la disposición final, o si hay otra opción disponible. Los diagramas de las figuras 4.2, 4.3 y 4.5 a 4.7 ayudan a determinar la tecnología de procesamiento de desechos más adecuada para una corriente de desechos particular. El examen que figura a continuación debería leerse conjuntamente con esas figuras.

4.1. CONSIDERACIONES SOBRE LA ESTRATEGIA DE GESTIÓN DE DESECHOS RADIATIVOS

Es importante establecer la estrategia de gestión de desechos antes de poner en marcha una actividad de procesamiento de los desechos. La estrategia tiene que ser coherente con los objetivos y las limitaciones de la instalación que genere los desechos. También debería ser compatible con la política y la estrategia nacionales, a menos que, por circunstancias excepcionales, sea aceptable una desviación de la postura nacional en un caso particular. Idealmente, la política y estrategia nacionales deberían comprender un marco regulador que permita elaborar una estrategia de gestión de desechos local y obtener las aprobaciones de los diseños, la construcción y la explotación [4.1].

Al elaborar una estrategia de gestión de desechos, es importante tomar en consideración el ciclo de vida completo, desde la generación de los desechos hasta su disposición final, incluidas las responsabilidades relacionadas con la clausura. Los elementos clave que se deben considerar al formular una estrategia comprenden lo siguiente:

- a) seguridad: optimización de la dosis recibida por los operadores y el público, seguridad industrial;
- b) protección ambiental: descargas líquidas y gaseosas, volúmenes de desechos, volúmenes de desechos secundarios, disponibilidad de instalaciones de disposición final;
- c) régimen reglamentario: marco regulador existente o en desarrollo;
- d) tecnología: flexibilidad y robustez, facilidad de aplicación y mantenimiento, disponibilidad de equipo o instalaciones ya existentes, incluso en otros Estados Miembros;
- e) aspectos económicos: costos de adquisición, costos de funcionamiento, responsabilidades relacionadas con la clausura, momentos en que se incurrirá en los costos;
- f) calendario: justificación y evaluación de la seguridad, obtención de la licencia, desarrollo de la tecnología, aplicación.

Los objetivos genéricos de la gestión de desechos son los siguientes:

- i) Garantizar la seguridad de los desechos teniendo en cuenta:
 - su radiotoxicidad intrínseca (emisores α y β , emisores γ de alta energía):
 - mediante la contención y el blindaje;
 - las malas condiciones en que puedan encontrarse:
 - mediante la contención y el blindaje;
 - su movilidad, por ejemplo en el caso de los líquidos y lodos:
 - mediante la inmovilización y estabilización del cuerpo del desecho;

- otras propiedades físicas, químicas o biológicas, por ejemplo en el caso de los desechos corrosivos, pirofóricos, explosivos, putrescibles o patógenos:
 - mediante la inmovilización y estabilización del cuerpo del desecho.
- ii) Mejorar la seguridad física de los desechos:
 - para la no proliferación y la lucha contra el terrorismo.
- iii) Reducir/minimizar el volumen de desechos:
 - para optimizar las instalaciones de almacenamiento y disposición final.
- iv) Reducir/controlar las descargas radiológicas al medio ambiente:
 - para minimizar el impacto ambiental y las exposiciones a la radiación.
- v) Preparar los desechos para:
 - el almacenamiento provisional;
 - el transporte hacia/desde la zona de almacenamiento;
 - el transporte al emplazamiento de disposición final;
 - el almacenamiento a largo plazo;
 - la disposición final;
 - la disposición final o el almacenamiento a largo plazo tras un período de almacenamiento provisional;
 - la optimización de la manipulación, el transporte y la colocación.

El diagrama de flujo de la figura 4.1 comienza pidiendo al lector que examine la estrategia para los desechos radiactivos, la estrategia de reglamentación y las normas y directrices de apoyo existentes a nivel nacional. Si no existe nada de ello, debería solicitarse asesoramiento a los órganos nacionales competentes; también podrá solicitarse el apoyo del OIEA.

Una vez establecida una estrategia de gestión de desechos adecuada y pertinente, la tarea siguiente consiste en determinar si los desechos están debidamente caracterizados. Es fundamental entender el tipo de desechos de que se trata para poder encontrar soluciones apropiadas. El diagrama de flujo indica la clase de información que se requerirá para determinar si alguna de las infraestructuras de gestión de desechos ya existentes podría ser adecuada, a la luz de las limitaciones y restricciones pertinentes que se apliquen. Por ejemplo, es posible que los desechos puedan quedar exentos de los controles radiológicos reglamentarios por tener una actividad de radionucleidos suficientemente baja. La mayoría de los países prevén exenciones de ese tipo en su reglamentación radiológica. Un ejemplo de ello es la disposición final de ciertas categorías de detectores de humo, que en muchos casos contienen fuentes radiactivas. Asimismo, numerosos países permiten la incineración de grandes volúmenes de desechos de baja actividad. En algunos casos, los desechos podrán enviarse de vuelta a los fabricantes del producto en cuestión.

La construcción de una instalación nueva debería tomarse en consideración solo cuando los desechos no puedan ser tratados por ninguno de los medios o vías ya existentes.

4.2. CATEGORIZACIÓN DE LOS DESECHOS RADIATIVOS

Una vez decidido que los desechos deben ser tratados y acondicionados, será necesario categorizarlos y clasificarlos para determinar las opciones adecuadas a ese respecto. El diagrama de flujo de la figura 4.2 y las secciones siguientes ofrecen una metodología para evaluar cada tipo de desecho a fin de determinar el tratamiento más adecuado.

A estas alturas, ya se habrá realizado una cierta caracterización de los desechos radiactivos para determinar la necesidad de instalaciones de tratamiento y acondicionamiento. El paso siguiente será demostrar que los desechos cumplirán los criterios de aceptación de la instalación de procesamiento y decidir cómo procesarlos. Los criterios de aceptación se establecerán durante el diseño de la instalación, como parte de la justificación de la seguridad, para asegurarse de que la instalación pueda manipularlos de forma segura (lo que significa, por ejemplo, que los bultos no deberán ser demasiado grandes ni

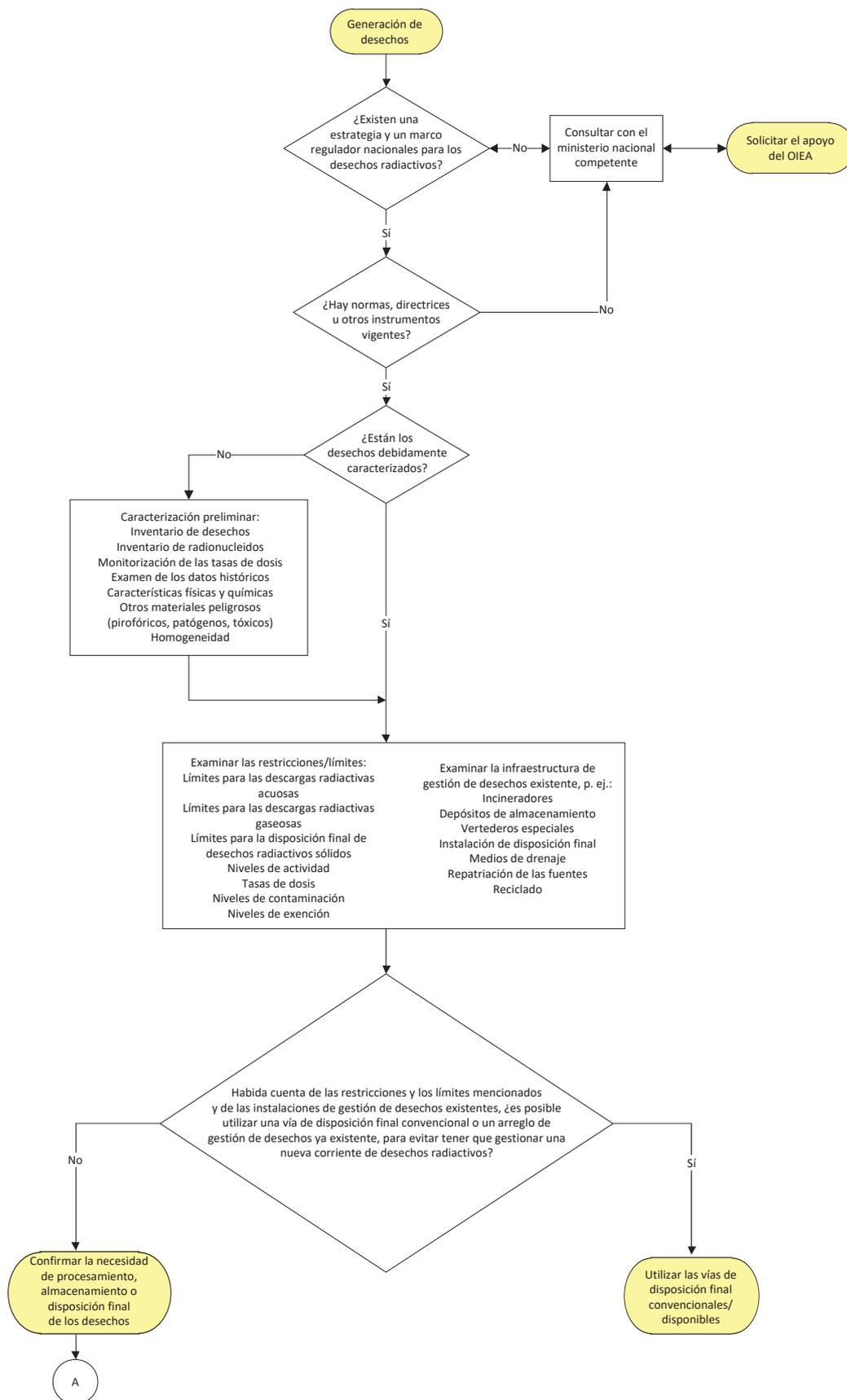


Fig. 4.1. Consideraciones sobre la estrategia de gestión de desechos radiactivos.

demasiado pesados; las tasas de dosis externas tendrán que ser aceptables; el embalaje habrá de ser adecuado (sin fugas ni contaminación); y las soluciones técnicas adoptadas por la instalación deberán ser efectivamente capaces de tratar esos desechos (habida cuenta de su naturaleza química y física, de los otros materiales peligrosos presentes, etc.).

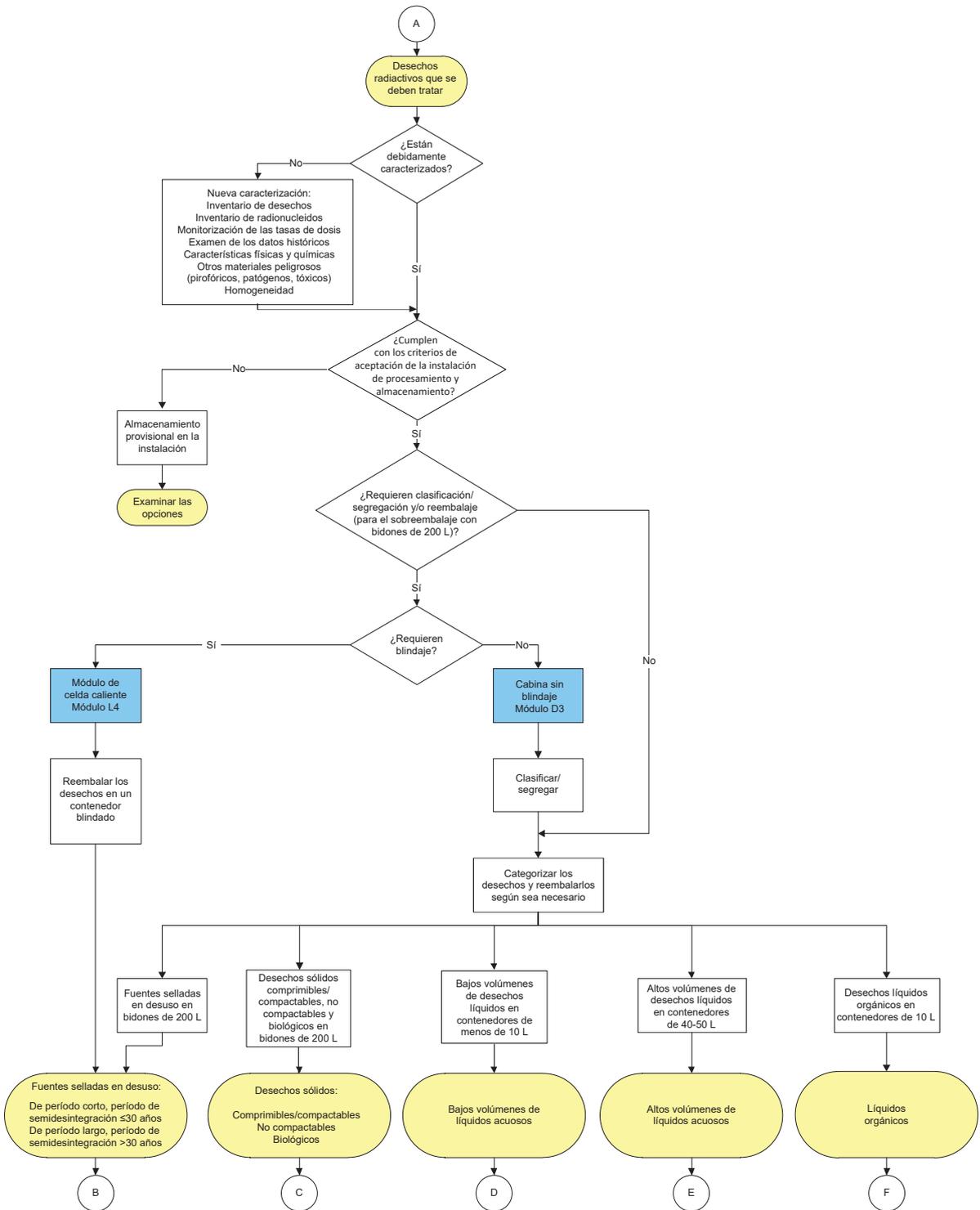


Fig. 4.2. Categorización de los desechos radiactivos.

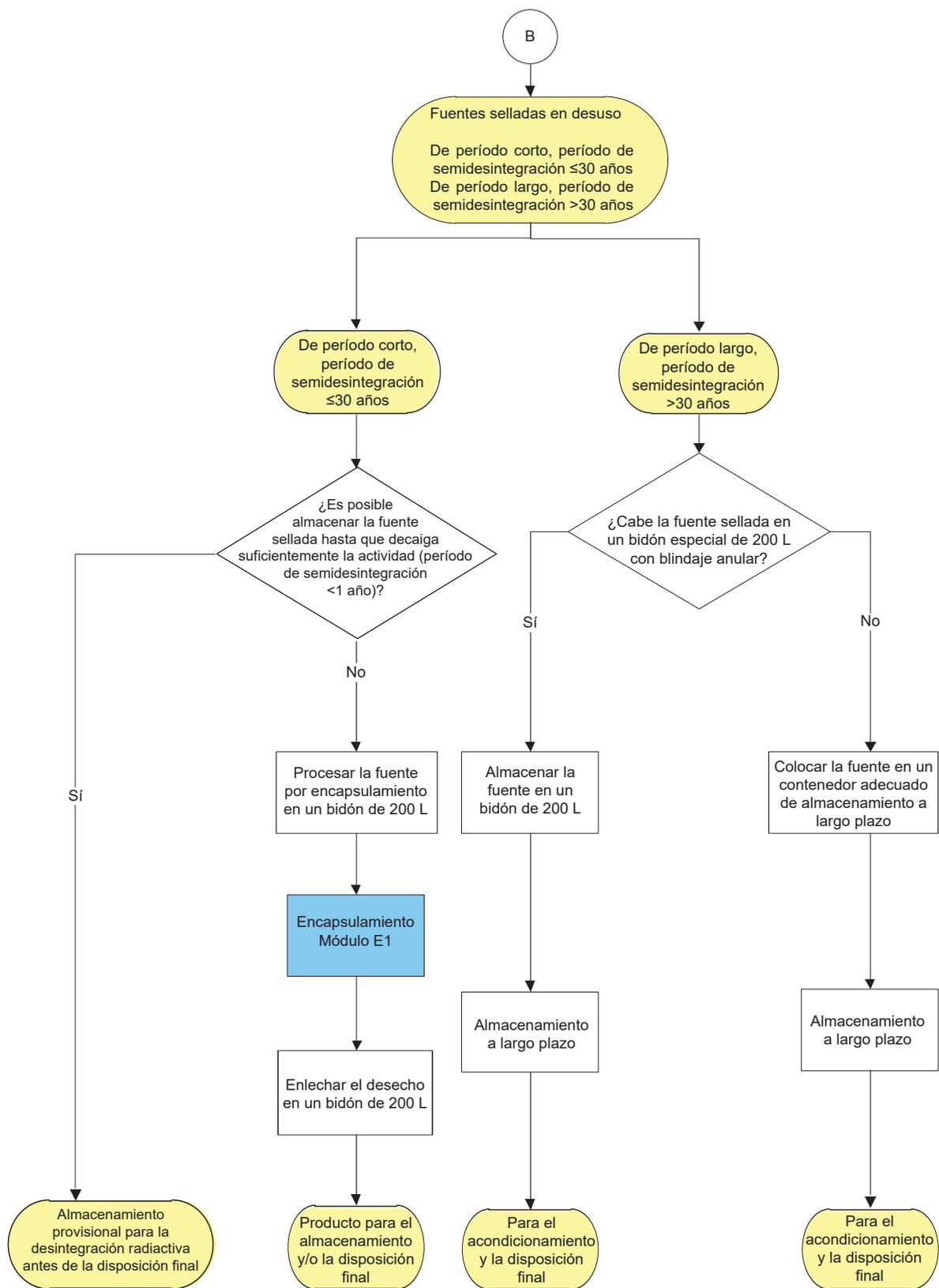


Fig. 4.3. Gestión de las fuentes selladas en desuso.

No obstante, es un hecho que en el diseño de la instalación de procesamiento y almacenamiento no será posible prever todos los tipos de desechos que puedan recibirse. Si llegan desechos que no cumplen los criterios de aceptación establecidos, la instalación tendrá que poder recibirlos igualmente y almacenarlos en condiciones de seguridad mientras se busca asesoramiento sobre la mejor forma de tratarlos. Por lo tanto, se supone que antes de llegar a la instalación los desechos habrán sido debidamente caracterizados, para verificar que cumplen los criterios de aceptación vigentes. La descripción de las corrientes de desechos en el cuadro 2.1 ilustra algunas de las características fundamentales que se han tomado como puntos de partida al elaborar los diseños de concepto de los módulos de proceso.

Lo ideal es que la segregación de los desechos se efectúe en el punto de origen, con arreglo al régimen de gestión planificado, es decir, separando:

- a) los desechos blandos y comprimibles/compactables de los no compactables y de los desechos biológicos;
- b) los contenedores de desechos líquidos de los desechos sólidos;
- c) los líquidos orgánicos de los líquidos acuosos;
- d) las fuentes de período largo (período de semidesintegración >30 años) de las de período corto (período de semidesintegración ≤ 30 años). (La intención al fijar el valor del período de semidesintegración es que las fuentes de ^{137}Cs queden comprendidas en la categoría de período corto).

Sin embargo, esto no siempre es posible, ni tampoco fiable. Por consiguiente, se parte del supuesto de que se requerirá una nueva inspección y segregación de los desechos a su llegada a la instalación de procesamiento y almacenamiento. Si se trata de desechos de baja actividad, esa labor podrá realizarse en una cabina sin blindaje (Módulo D3), en que los desechos se clasificarán y segregarán manualmente, o con pinzas de mano, y se colocarán en los bidones apropiados.

En el caso de los desechos con tasas de dosis más altas, especialmente de las fuentes selladas en desuso, se requerirá un blindaje para la manipulación y la inspección. También puede ser necesario reembalar los desechos, por ejemplo si se requiere un contenedor blindado más adecuado, o en el caso de las fuentes con fugas o contaminación. A tal efecto, el OIEA ha desarrollado un módulo de celda caliente móvil.

4.3. GESTIÓN DE LAS FUENTES SELLADAS EN DESUSO

En el diagrama de flujo anterior se vio que las fuentes selladas en desuso deberían segregarse con arreglo a su período de semidesintegración y, de ser necesario, reembalarse en contenedores adecuados. En la figura 4.3 se presenta el diagrama de flujo para la gestión de las fuentes selladas en desuso.

Primero se consideran las fuentes de período corto, y luego las de período largo.

4.3.1. Fuentes de período corto

Como se señaló anteriormente, la mejor opción en el caso de los radionucleidos de período muy corto (período de semidesintegración <1 año) es el almacenamiento para la desintegración radiactiva.

Las fuentes de período corto que no correspondan a esta categoría se colocarán en bidones de 200 L con un revestimiento anular de hormigón prefabricado (figura 4.4) y se encapsularán en cemento utilizando un módulo de proceso por inyección de lechada (Módulo E1). Es importante señalar que el encapsulamiento por mezcla con una lechada de cemento representa un acondicionamiento irreversible y debería tomarse en consideración solo cuando exista una instalación de disposición final operativa y el bulto acondicionado cumpla los criterios de aceptación para la disposición final.



Fig. 4.4. Colocación de fuentes selladas en desuso en un bidón de 200 L con blindaje anular.

4.3.2. Fuentes de período largo

Lo ideal es que todas las fuentes de período largo se embalen en bidones de 200 L para su almacenamiento a largo plazo. En el diagrama de flujo anterior se vio que las fuentes pueden tener que ser reembaladas, transfiriéndolas de su contenedor original a un cofre blindado de almacenamiento a largo plazo en el módulo de celda caliente móvil.

Si las fuentes selladas de período largo tienen las dimensiones físicas adecuadas, se colocarán en un bidón especial de 200 L con un blindaje anular prefabricado como el que se ilustra en la figura 4.4. Este tipo de embalaje permitirá recuperar la fuente en el futuro para someterla al acondicionamiento necesario antes de la disposición final, probablemente en una instalación de disposición final geológica.

Si las fuentes selladas de período largo son demasiado grandes y no caben en bidones de 200 L, tendrán que ser colocadas en sus contenedores de almacenamiento a largo plazo.

4.4. GESTIÓN DE DESECHOS SÓLIDOS

Como se señaló en el diagrama de flujo anterior para la categorización, los desechos sólidos se clasificarán y segregarán en distintas categorías según sus características y el tratamiento propuesto. En la figura 4.5 se presenta un diagrama de flujo para la gestión de las corrientes de desechos sólidos.

4.4.1. Desechos de materiales comprimibles o compactables

Los desechos comprimibles o compactables se colocarán en un bidón de 200 L y se compactarán para maximizar la carga de desechos del bidón.

4.4.2. Desechos de materiales biológicos

La materia biológica puede ser más peligrosa por su contenido biológico que por los radionucleidos presentes. Esta materia deberá someterse a un tratamiento previo (por ejemplo por inmersión en una solución de formaldehído al 4 %, o por embolsado con cal), para luego encapsularla en un bidón de 200 L en el módulo de encapsulamiento.

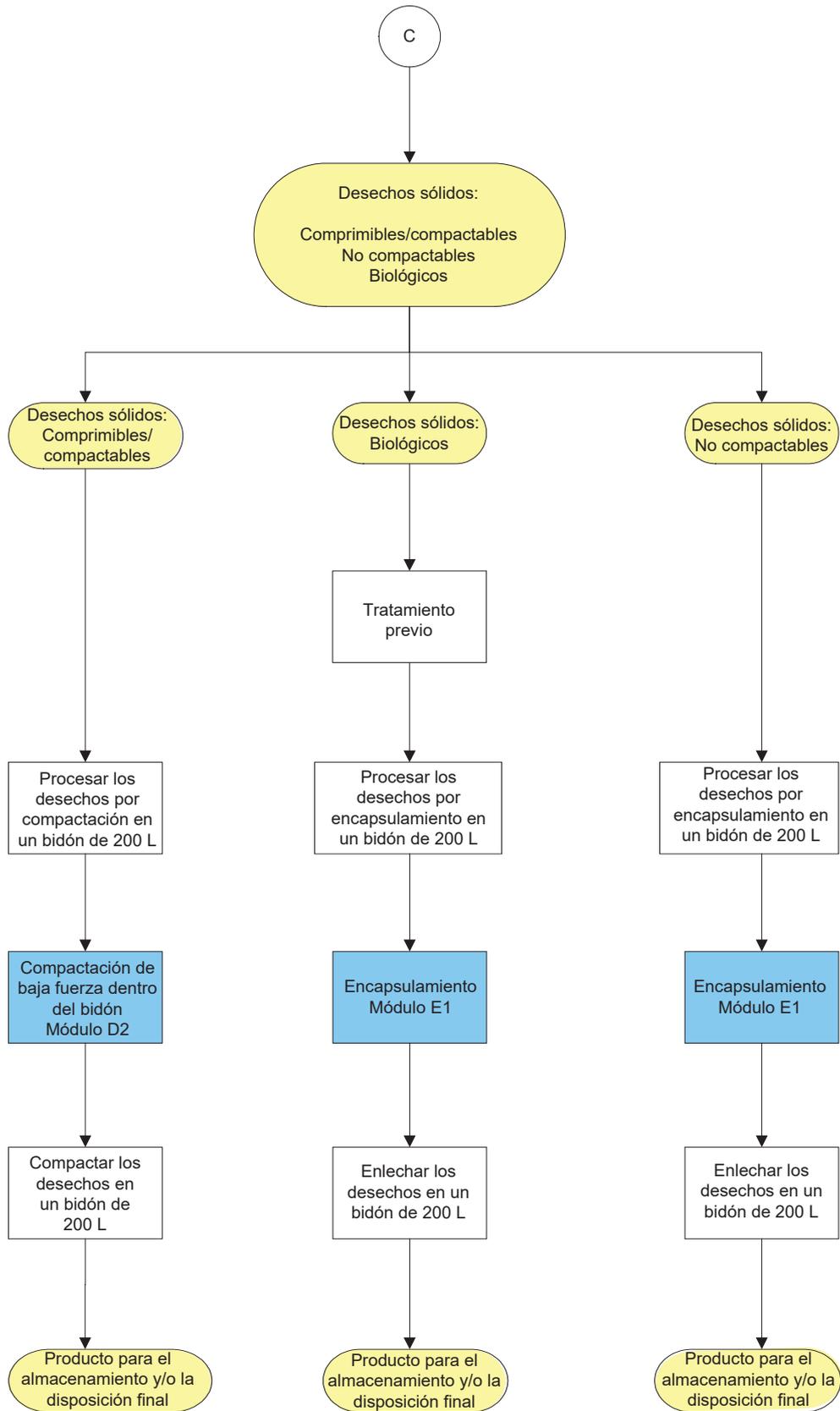


Fig. 4.5. Gestión de desechos sólidos.

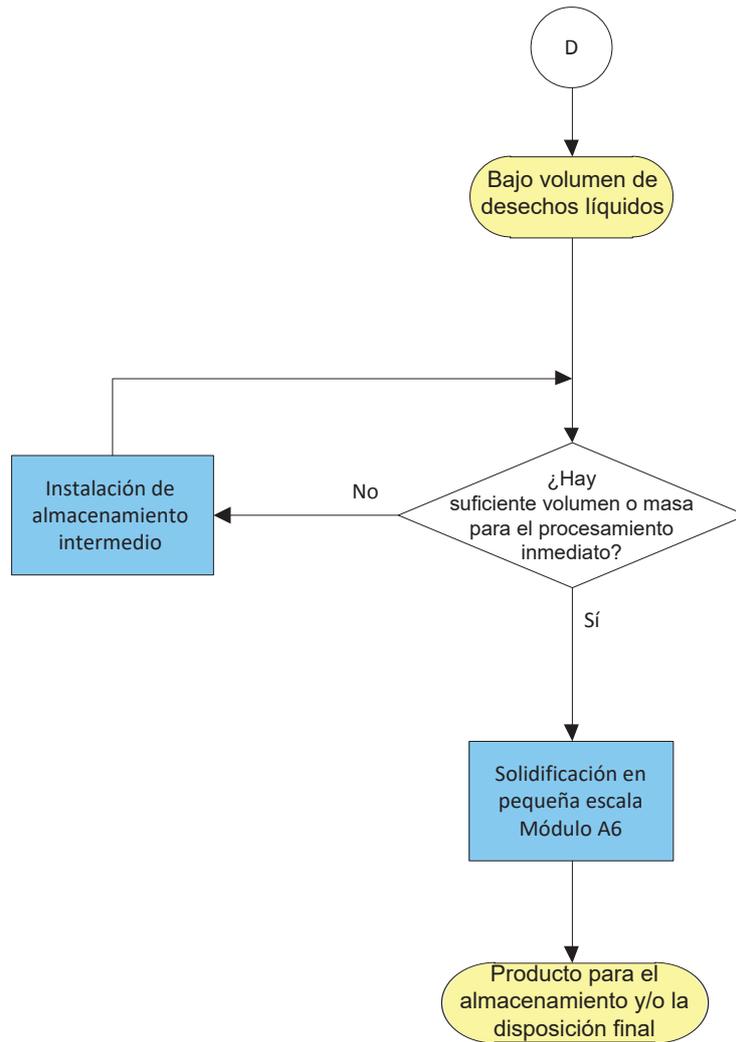


Fig. 4.6. Gestión de bajos volúmenes de desechos líquidos acuosos.

4.4.3. Desechos de materiales no compactables

Los desechos no compactables se colocarán en un bidón de 200 L y se encapsularán en una lechada de cemento utilizando el módulo de encapsulamiento (E1).

4.5. GESTIÓN DE BAJOS VOLÚMENES DE DESECHOS LÍQUIDOS

En la figura 4.6 se presenta el diagrama de flujo para la gestión de bajos volúmenes de desechos líquidos.

4.5.1. ¿Hay suficiente volumen para el procesamiento inmediato?

Se presupone que los volúmenes bajos de desechos líquidos acuosos se recibirán en contenedores adecuados, como las botellas de plástico certificadas por las Naciones Unidas, que tienen normalmente una capacidad de 10 L. Aunque el módulo de solidificación (Módulo A6) está diseñado para procesar los desechos líquidos de estos contenedores uno a la vez, se recomienda agrupar varios contenedores

similares y procesarlos al mismo tiempo, a fin de reducir el número de veces que el módulo de proceso deba ponerse en servicio y luego pararse y someterse al lavado posterior a la operación.

En general, se recomienda no acumular las cantidades de desechos líquidos por períodos prolongados, debido al riesgo de que se pierda la contención y se propague la contaminación. Los contenedores de desechos líquidos deberían almacenarse en zonas dotadas de una contención capaz de retener los líquidos en caso de ruptura de los contenedores.

Dado que la tasa de generación de desechos líquidos es baja, estos desechos deberían tratarse por solidificación directa, ya que su volumen no justificará el uso adicional de equipo y tiempo de exposición de los operadores para procesarlos con vistas a su descontaminación.

4.6. GESTIÓN DE ALTOS VOLÚMENES DE DESECHOS LÍQUIDOS

En la figura 4.7 se presenta el diagrama de flujo para la gestión de altos volúmenes de desechos líquidos.

4.6.1. ¿Hay suficiente volumen para el procesamiento inmediato?

Se presupone que los volúmenes altos de desechos líquidos acuosos se recibirán en contenedores adecuados, como las bombonas certificadas del Grupo I de las Naciones Unidas, que tienen normalmente una capacidad de 45 L. Aunque los módulos de proceso de desechos acuosos están diseñados para procesar los desechos líquidos de estos contenedores uno a la vez, se recomienda agrupar varias bombonas similares y procesarlas al mismo tiempo, a fin de reducir el número de veces que el módulo de proceso deba ponerse en servicio y luego pararse y someterse al lavado posterior a la operación.

En general, se recomienda no acumular las cantidades de desechos líquidos por períodos prolongados, debido al riesgo de que se pierda la contención y se propague la contaminación. Los contenedores de desechos líquidos deberían almacenarse en zonas dotadas de una contención capaz de retener los líquidos en caso de ruptura de los contenedores.

Si la tasa de generación de desechos líquidos es baja (por ejemplo <1 contenedor de 45 L por mes), estos desechos deberían tratarse como una corriente de bajos volúmenes de desechos líquidos, es decir, por solidificación directa, ya que el volumen no justificará el uso adicional de equipo y tiempo de exposición de los operadores para su procesamiento.

4.6.2. ¿Existe una vía de descarga de desechos líquidos con límites autorizados?

La finalidad del tratamiento es concentrar los materiales radiactivos y obtener un volumen de desechos líquidos residual que sea adecuado para su descarga, por ejemplo, en el alcantarillado público. Si no se dispone de una vía de descarga con límites de descarga autorizados, no tendrá sentido tratar los desechos líquidos. En este caso, será preferible proceder directamente a su solidificación.

4.6.3. ¿Es posible someter los desechos líquidos a un tratamiento que reduzca la contaminación a niveles acordes con los límites de descarga autorizados?

Si existe una vía de descarga con un límite autorizado, el paso siguiente será determinar si el tratamiento de los desechos líquidos permitirá descontaminar el volumen líquido residual en medida suficiente para que pueda ser descargado. La respuesta a esta pregunta se basará en un conocimiento detallado de las características de los desechos líquidos y de los límites autorizados para la descarga.

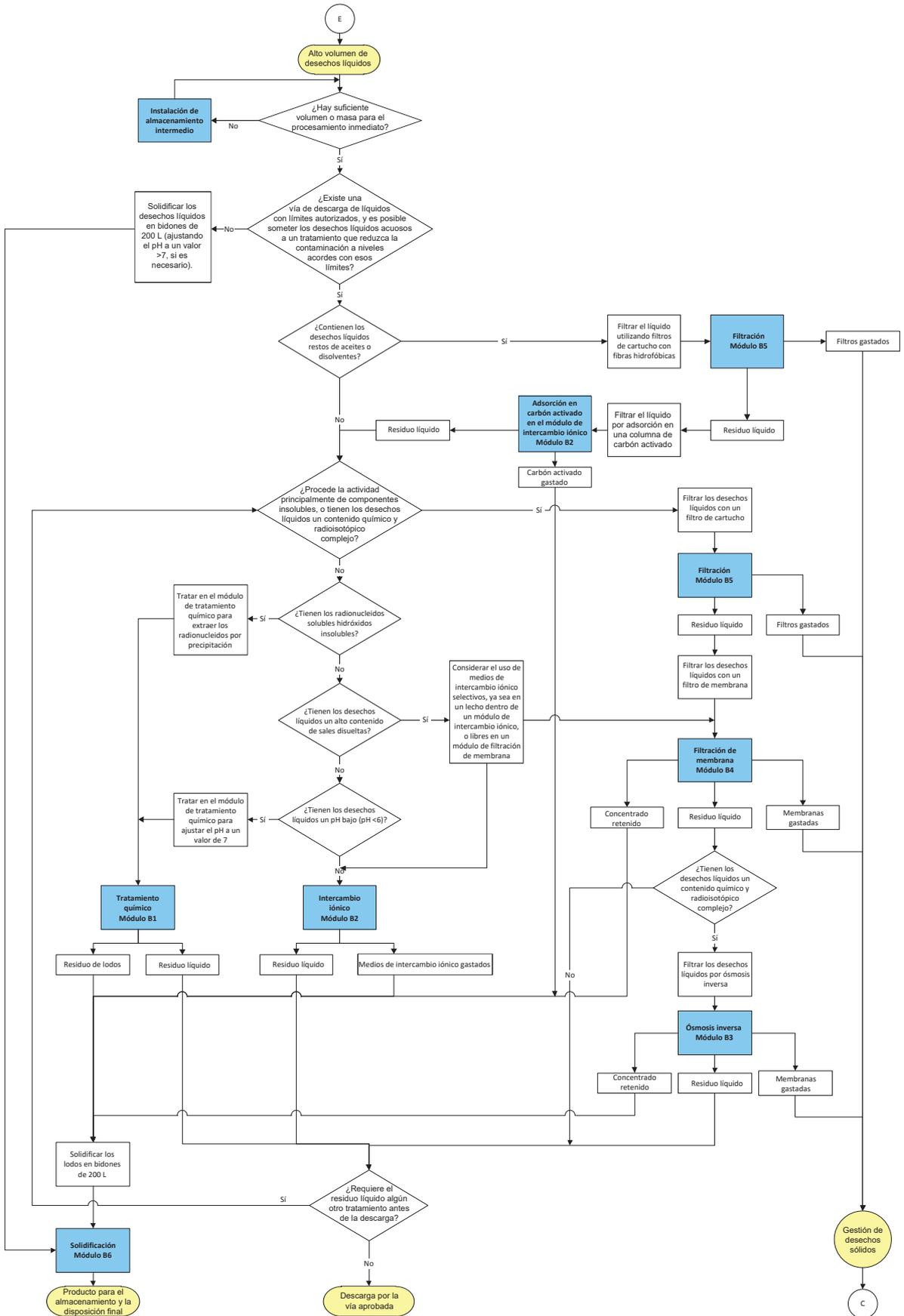


Fig. 4.7. Gestión de altos volúmenes de desechos líquidos acuosos.

4.6.4. ¿Contienen los desechos líquidos restos de aceites o disolventes?

Si los desechos líquidos contienen restos de aceites o disolventes, estos elementos podrían interferir con los procesos de tratamiento; por ejemplo, los aceites podrían cegar los filtros o los medios de intercambio iónico, y los disolventes pueden contener radionucleidos en una forma que impida su eliminación por intercambio iónico o tratamiento químico.

Cuando haya restos de aceite o disolventes, debería estudiarse la posibilidad de aplicar un tratamiento previo por filtración utilizando un cartucho filtrante con fibras hidrofóbicas, seguido de la adsorción en carbón activado u otro adsorbente adecuado en una columna.

4.6.5. ¿Procede la actividad principalmente de componentes insolubles, o tienen los desechos líquidos una composición química y radioisotópica muy compleja?

Si la actividad procede principalmente de especies insolubles, o si hay sólidos dentro de los desechos líquidos, debería procederse a la filtración.

Por otra parte, si los desechos tienen una composición química y radioisotópica compleja, debería tomarse en consideración la ósmosis inversa. Este proceso debe ir precedido de un tratamiento por filtración normal y filtración de flujo tangencial, para evitar que el líquido contenga sólidos que puedan bloquear los filtros de ósmosis inversa.

Un tratamiento por filtración de cartucho (Módulo B5) seguido de una filtración de flujo tangencial (Módulo B4) puede descontaminar los desechos líquidos en medida suficiente para que sea posible la descarga. También eliminará los sólidos que, de otra manera, podrían causar problemas en un tratamiento ulterior, por ejemplo por intercambio iónico o adsorción.

El tipo de filtro y el tamaño de sus poros estarán determinados por el intervalo de tamaños de las partículas presentes en los desechos líquidos. El módulo de filtración será capaz de funcionar con filtros de cartucho, típicamente de 2 μm a 100 μm . Cabe señalar que los filtros con poros más pequeños pueden cegarse muy rápidamente. Tras la filtración de cartucho, el líquido será tratado por filtración de flujo tangencial para eliminar las partículas finas.

4.6.6. ¿Tienen los desechos líquidos una composición química y radioisotópica muy compleja?

La ósmosis inversa es una opción cuando hay agentes tensioactivos (aniónicos o no iónicos), agentes complexantes y muchos tipos de radionucleidos en la corriente de desechos, porque en estos casos el tratamiento químico y el intercambio iónico serán ineficaces. Si, pese a un tratamiento químico repetido, el líquido tratado no cumple con los límites autorizados para la descarga, puede tomarse en consideración la ósmosis inversa.

4.6.7. ¿Tienen los radionucleidos solubles hidróxidos insolubles?

Si los radionucleidos presentes en los desechos líquidos tienen formas insolubles (como el ^{90}Sr o los actínidos), la opción más sencilla será un tratamiento químico que incluya la elevación del pH para provocar la precipitación de los radionucleidos solubles.

4.6.8. ¿Tienen los desechos líquidos un alto contenido de sales disueltas?

Si los radionucleidos presentes en los desechos líquidos tienen formas solubles, el tratamiento preferido será el intercambio iónico. Sin embargo, si los desechos líquidos tienen un alto contenido de sales, por ejemplo iones de sodio o calcio, estos también serán eliminados por el proceso de intercambio iónico, agotándose rápidamente los medios de ese intercambio. Para estos casos, es posible que haya medios de intercambio iónico selectivos, como el hexacianoferrato de níquel para la extracción del ^{137}Cs ,

que puede utilizarse ya sea en un lecho de intercambio iónico en una columna, o en forma de partículas finas mezcladas con el líquido en un contenedor y filtradas luego con un filtro de flujo tangencial.

4.6.9. ¿Tienen los desechos líquidos un pH bajo (pH <6)?

Cuando se vayan a usar resinas de intercambio catiónico convencionales, será importante que el pH del líquido esté dentro del intervalo adecuado, que suele ser de 7 a 9. Si el pH es bajo, puede producirse la elución de la actividad ya adherida a las resinas de intercambio iónico, con el resultado de que después del tratamiento los desechos líquidos contendrán una actividad considerablemente mayor.

Si el pH es bajo, debería ajustarse primero, ya sea en el módulo de tratamiento químico o por recirculación en el contenedor de almacenamiento, cuando no se disponga de dicho módulo. Por otro lado, las corrientes de desechos con un pH alto requerirán un ajuste cuando se vayan a utilizar resinas de intercambio aniónico.

4.6.10. ¿Requiere el residuo líquido algún otro tratamiento?

Después del tratamiento, los desechos líquidos se analizarán a fin de confirmar que cumplen con los límites autorizados para la descarga. Si no es así, por ejemplo si los desechos líquidos han sido sometidos previamente a un tratamiento químico para elevar el pH o filtrados para eliminar las partículas sólidas, será necesario un tratamiento adicional.

4.7. GESTIÓN DE DESECHOS LÍQUIDOS ORGÁNICOS

En la figura 4.8. se presenta el diagrama de flujo para la gestión de los desechos líquidos orgánicos.

4.7.1. ¿Hay suficiente volumen para el procesamiento inmediato?

Como se señaló anteriormente, se presupone que los desechos líquidos orgánicos se recibirán en contenedores adecuados, como las botellas de plástico certificadas por las Naciones Unidas, que tienen normalmente una capacidad de 10 L. Aunque los módulos de proceso están diseñados para procesar los desechos líquidos de estos contenedores uno a la vez, se recomienda agrupar varios contenedores similares y procesarlos al mismo tiempo, a fin de reducir el número de veces que el módulo de proceso deba ponerse en servicio y luego pararse y someterse al lavado posterior a la operación.

En general, se recomienda no acumular las cantidades de desechos líquidos por períodos prolongados, debido al riesgo de que se pierda la contención y se propague la contaminación. Los contenedores de desechos líquidos deberían almacenarse en zonas dotadas de una contención capaz de retener los líquidos en caso de ruptura de los contenedores.

4.7.2. ¿Existe una vía de descarga de desechos líquidos orgánicos con límites autorizados?

La finalidad del tratamiento es concentrar los materiales radiactivos y obtener un volumen residual de desechos líquidos orgánicos que sea adecuado para su disposición final (por ejemplo, en un incinerador) o su solidificación en hormigón. Si no se dispone de una vía de descarga con límites de descarga autorizados, no tendrá sentido tratar los desechos líquidos orgánicos. En este caso, será preferible proceder directamente a su solidificación.

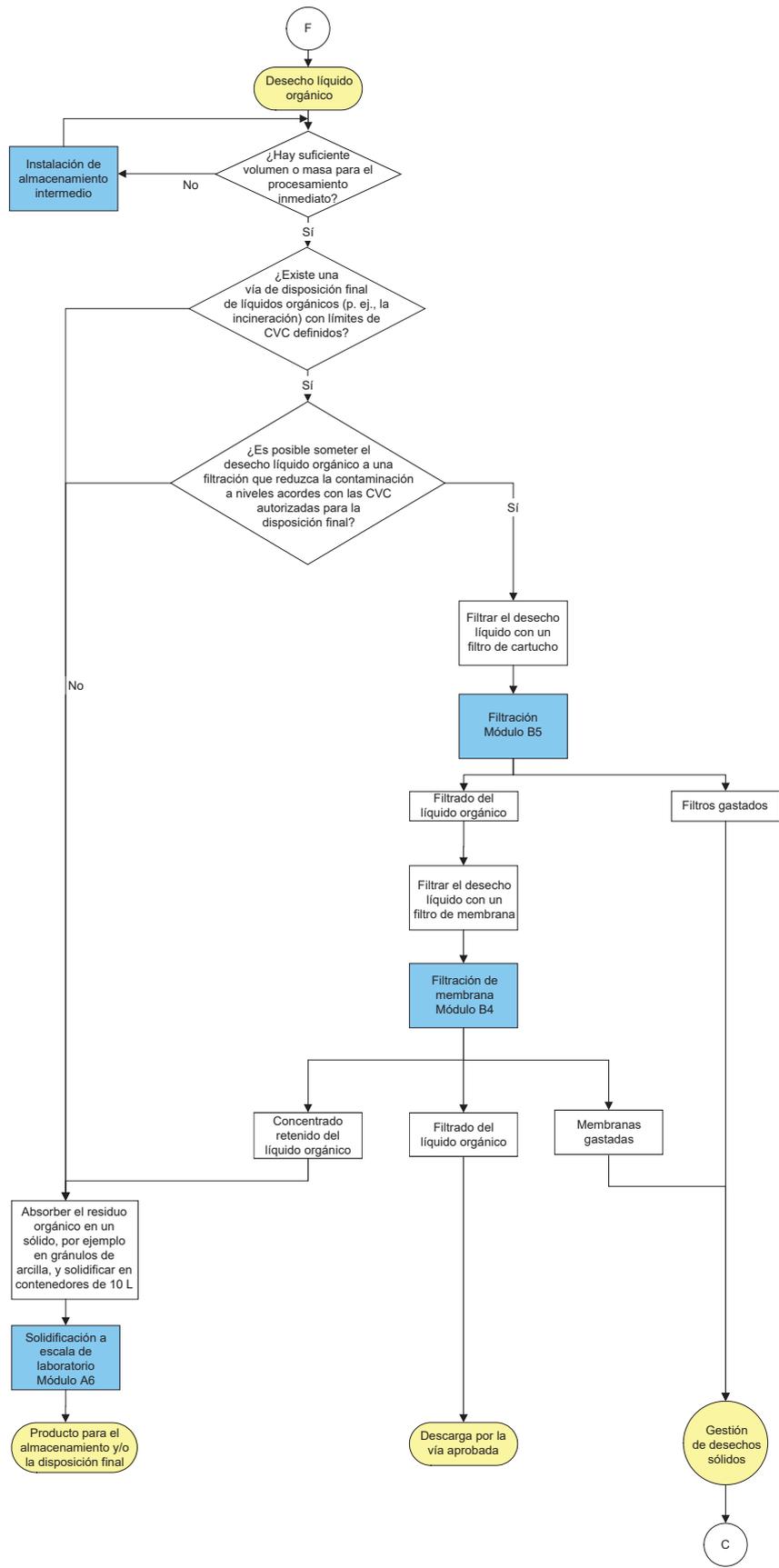


Fig. 4.8. Gestión de desechos líquidos orgánicos.

4.7.3. ¿Es posible someter los desechos líquidos orgánicos a una filtración que reduzca la contaminación a niveles acordes con los límites de descarga autorizados?

Si existe una vía de descarga con límites autorizados, el paso siguiente será determinar si la filtración de los desechos líquidos permitirá descontaminar el líquido residual en medida suficiente para que pueda ser descargado. En este caso, debido a los volúmenes relativamente pequeños de líquidos orgánicos que se deberán tratar y a la complejidad de las otras tecnologías de tratamiento, el único procedimiento que se considera adecuado es la filtración (primero de cartucho (Módulo B5) y luego de flujo tangencial (Módulo B4)).

Cuando sea poco probable que la filtración consiga descontaminar los desechos líquidos orgánicos en medida suficiente para poderlos descargar, será preferible proceder directamente a su solidificación.

REFERENCIA DE LA SECCIÓN 4

- [4.1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Policies and Strategies for Radioactive Waste Management, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-G-1.1, IAEA, Vienna (2009).

5. INFORMACIÓN SOBRE EL DISEÑO Y LAS ESPECIFICACIONES DE LOS MÓDULOS DE PROCESAMIENTO

Una parte esencial de la presente publicación es la información sobre el diseño y las especificaciones de cada uno de los módulos de procesamiento descritos brevemente en la sección 3 y seleccionados para su aplicación con arreglo al proceso de decisiones presentado en la sección 4.

La finalidad de estas especificaciones es ayudar al usuario a determinar lo que necesita, especificar sus requisitos para la adquisición de los módulos de procesamiento adecuados, instalar esos módulos y, por último, explotarlos. En las secciones siguientes figura información sobre el diseño y las especificaciones de cada uno de los módulos de proceso. Para cada módulo, se proporciona la siguiente información:

- una base de diseño que indica los principales parámetros y supuestos utilizados para determinar el diseño de ese módulo de procesamiento;
- un diagrama de flujo del proceso esquemático que ilustra el módulo de proceso, cuando es el caso;
- una lista del equipo que indica sus principales componentes, válvulas e instrumentos, cuando procede;
- una descripción del equipo que ofrece más detalles sobre sus componentes principales;
- fotografías de módulos de procesamiento o equipos similares (cuando están disponibles) o modelos sencillos que ilustran una posible disposición del módulo;
- una indicación de los elementos que deberán existir en las instalaciones para poder incorporar el módulo de proceso;
- una descripción del proceso que explica con más detalle cómo se explotará el módulo, y los requisitos que deberán cumplirse antes del inicio de las operaciones.

Los módulos se describen en las secciones 5.1 a 5.11.

La mayoría de los módulos de proceso estarán montados en una plataforma para simplificar la instalación y un posible traslado futuro de la planta a otro lugar. Esto permite también construir y ensayar los módulos en una fábrica, de modo que el usuario final solo tenga que ocuparse de las conexiones a los servicios (suministro de electricidad, y posiblemente de agua).

En general, la disposición del equipo en el módulo de proceso debería permitir el acceso a todos los componentes (y en particular a las válvulas e instrumentos) para la puesta en servicio, las pruebas, el mantenimiento y la sustitución. El diseño en detalle debería prever suficiente espacio para la retirada y sustitución de los distintos elementos y, cuando sea posible, el acceso a por lo menos dos lados de cada componente del equipo.

5.1. MÓDULO A6—SOLIDIFICACIÓN

5.1.1. Módulo A6 — Consideraciones generales

Una de las posibles etapas del tratamiento de pequeñas cantidades de desechos líquidos o sólidos húmedos (las corrientes de desechos A, C, F y G del cuadro 2.1) consistirá en solidificarlos. Esta solidificación tiene por objeto inmovilizar los desechos y su contaminación radiactiva para evitar la dispersión. Los desechos se colocarán en contenedores de 10 L, en los que se verterá una lechada de cemento. En el caso de referencia con 0,1 m³ por año, se generarán anualmente entre 20 y 30 contenedores pequeños de desechos, según el volumen de desechos líquidos o sólidos húmedos que se incorpore en la mezcla. Debería ser posible solidificar cinco contenedores de desechos por día de funcionamiento, lo

que significa que se requerirán menos de seis días de funcionamiento al año. En la información sobre el diseño que figura a continuación, se ha utilizado una corriente de desechos líquidos orgánicos (soluciones de centelleo, aceite de bombas, disolventes de extracción, etc.) para definir la base de diseño.

En este módulo de solidificación, se añadirá a los desechos líquidos orgánicos una mezcla de cemento previamente calibrada, utilizando un contenedor de 10 L y un mezclador de paleta descartable. En esta técnica de uso común, la paleta agitadora queda retenida en el contenedor después del proceso de mezcla, pasando a formar parte del bulto de desechos sólidos. De este modo, se reduce el riesgo de propagación de la contaminación. Los desechos y la matriz de cemento se solidificarán, y una nueva lechada vertida encima de esa masa sólida proporcionará una protección adicional contra el escape de la contaminación. Debido a que se trata de volúmenes pequeños, la operación puede realizarse con equipo de sobremesa patentado del tipo que se emplea en los laboratorios.

Los desechos y el cemento pueden mezclarse con un taladro eléctrico estándar o un agitador de laboratorio dotados de una broca de paleta extraíble. Las paletas deberían desecharse después del uso, a fin de reducir el riesgo de propagar la contaminación. Para ello pueden tratarse como un desecho sólido no compactable (véase el Módulo E1) o como un elemento descartable que se deja dentro del contenedor una vez terminada la mezcla. Básicamente, este módulo comprende el siguiente equipo de sobremesa:

- a) Contenedores de desechos de 10 L de capacidad.
- b) Una estación de llenado de los contenedores de desechos, con protector contra salpicaduras, bandeja de goteo, mezclador de gran par y paleta agitadora (posiblemente descartable).
- c) Recipientes de productos químicos para la dosificación manual de pequeñas cantidades (si es necesario), por ejemplo, para la preparación de soluciones cáusticas.
- d) Contenedores de cemento en polvo, con cantidades medidas de cemento premezclado para su adición a los contenedores de desechos.
- e) Una zona de curado, donde pueden dejarse los contenedores de desechos solidificados para el proceso de curado.
- f) Equipo mezclador de lechada para la preparación de los pequeños volúmenes de lechada con que se cubrirá el contenedor de desechos solidificados. Esto comprende un contenedor para la lechada, una paleta agitadora reutilizable y un mezclador de gran par.

El equipo de este módulo puede estar alojado en un espacio de contención, por ejemplo en la cabina sin blindaje del Módulo D3 o en una campana de gases.

5.1.2. Módulo A6 — Base de diseño

La base de diseño resumida en el cuadro 5.1 indica los principales parámetros y supuestos utilizados para determinar el diseño de este módulo de procesamiento.

5.1.3. Módulo A6 — Diagrama de flujo del proceso

La figura 5.1 ilustra el equipo requerido en un diagrama de flujo del proceso.

5.1.4. Módulo A6 — Lista del equipo

El diagrama de flujo indica que se requerirá el equipo enumerado en el cuadro 5.2.

CUADRO 5.1. BASE DE DISEÑO DEL MÓDULO A6–SOLIDIFICACIÓN

Características de los desechos iniciales	
Volumen líquido total	Típicamente, menos de 0,3 m ³ por año; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 0,1 m ³ por año.
Llegada	Periódicamente, en lotes de alrededor de 50 L.
Tasa máxima de procesamiento	50 L de desechos por bidón.
Contenido de actividad de los desechos iniciales	Niveles de actividad bajos, un único o varios radionucleidos.
Forma física	Líquidos orgánicos: soluciones de centelleo, aceite (p. ej., de bombas), disolventes de extracción, etc.
Contenido de sólidos	Podrían tener contenidos de sólidos de hasta el 20 %.
Contenido de sustancias químicas	Sin contenidos significativos de sustancias químicas, salvo, posiblemente, pequeñas cantidades de agentes complexantes.
Características del efluente tratado	
Contenido de actividad	n.a.
pH	n.a.
Otros componentes	n.a.
Disponibilidad de servicios	
Servicios	El diseño esquemático debería indicar las opciones de conexión a los servicios existentes o la necesidad de servicios especiales.
Agua	Necesaria.
Electricidad	Necesaria.
Calefacción del edificio	Necesaria, si la temperatura desciende por debajo de 5 °C.
Calefacción, ventilación y aire acondicionado	Necesarios.
Reactivos químicos	Necesarios.
Drenaje	No necesario. Cualquier fuga o derrame que se produzca quedará retenido en una bandeja de goteo y será vertido nuevamente en un contenedor de desechos.

5.1.5. Módulo A6 — Descripción del equipo

El equipo comprende lo siguiente:

- a) Contenedores para los desechos acuosos sin tratar, A6-E-01, consistentes en recipientes de polietileno reutilizables de 5 L, de alta integridad, diseñados para líquidos químicos peligrosos y certificados por las Naciones Unidas.
- b) Una reserva de pequeñas cantidades de productos químicos de administración dosificada —por ejemplo, soluciones cáusticas— en recipientes aprobados adecuados, A6-E-09, situados en su propia bandeja de goteo, A6-E-16, para el tratamiento previo de los desechos con esos productos (si es necesario).
- c) Contenedores de cemento en polvo, A6-E-07, de acero inoxidable, polietileno o polipropileno, con cantidades medidas de cemento en polvo premezclado para añadirlas al contenedor de desechos.
- d) Una zona de curado con una bandeja de goteo, A6-E-15, en que se puedan dejar los contenedores de desechos solidificados, A6-E-13, para el período de curado, que suele ser de 24 h. En general se colocarán juntos, para el curado, los cinco contenedores de desechos producidos en un día de funcionamiento.
- e) Una estación de llenado de los contenedores de desechos, que comprenda:
 - i) Contenedores de desechos, A6-E-12, de hasta 10 L, de acero dulce, polietileno o polipropileno. La naturaleza de estos contenedores no es importante, ya que el producto final quedará protegido por un sobreembalaje tras el enlechado en un bidón de acero de 200 L en el Módulo E1—Encapsulamiento. Podrían ser simples baldes de plástico o botes de acero.
 - ii) Un protector contra salpicaduras, de acero dulce, polietileno o polipropileno, para cubrir el contenedor de desechos durante la adición del polvo y la mezcla.
 - iii) Una paleta agitadora de acero dulce (como la ilustrada en la figura 5.2), que se utilizará para mezclar el cemento en polvo con el líquido orgánico acuoso del contenedor y que luego:
 - se dejará dentro del contenedor en que esté fraguando el cemento, o bien
 - se eliminará por separado como desecho no compactable (véase el Módulo E1).
 - iv) Un mezclador de gran par, A6-E-18 (en lo posible similar al modelo de sobremesa ilustrado en la figura 5.3), con un armazón de acero inoxidable o acero dulce revestido de epoxi que hará descender la paleta agitadora para introducirla en el contenedor de desechos. El mezclador tendrá normalmente una especie de portabrocas para sujetar el extremo de la paleta agitadora. Una vez terminada la mezcla, este dispositivo se abrirá, permitiendo la retirada del mezclador y dejando la paleta dentro del contenedor de desechos. El armazón del mezclador debería tener patas regulables, para la nivelación.
 - v) Una bandeja de goteo, A6-E-04, de acero inoxidable, polietileno o polipropileno, situada bajo el contenedor de desechos para retener cualquier salpicadura, derrame o fuga que se produzca durante la mezcla.
- f) Equipo mezclador de lechada para preparar pequeños volúmenes de lechada destinados a recubrir los contenedores de desechos solidificados. La necesidad de esta cubierta de lechada dependerá de los criterios nacionales de aceptación de desechos para el transporte y la disposición final. El equipo mezclador de lechada se utiliza para recubrir los contenedores de desechos solidificados con una capa de lechada. Su selección dependerá del equipo mezclador que esté fácilmente disponible para la preparación de lechadas a base de yeso y cemento en el sector de la construcción. La preparación de la lechada se efectuará en una zona limpia, lejos de la estación de llenado. El contenedor con la lechada se trasladará luego al espacio de contención para verter la lechada sobre los desechos solidificados, cuando sea necesario.

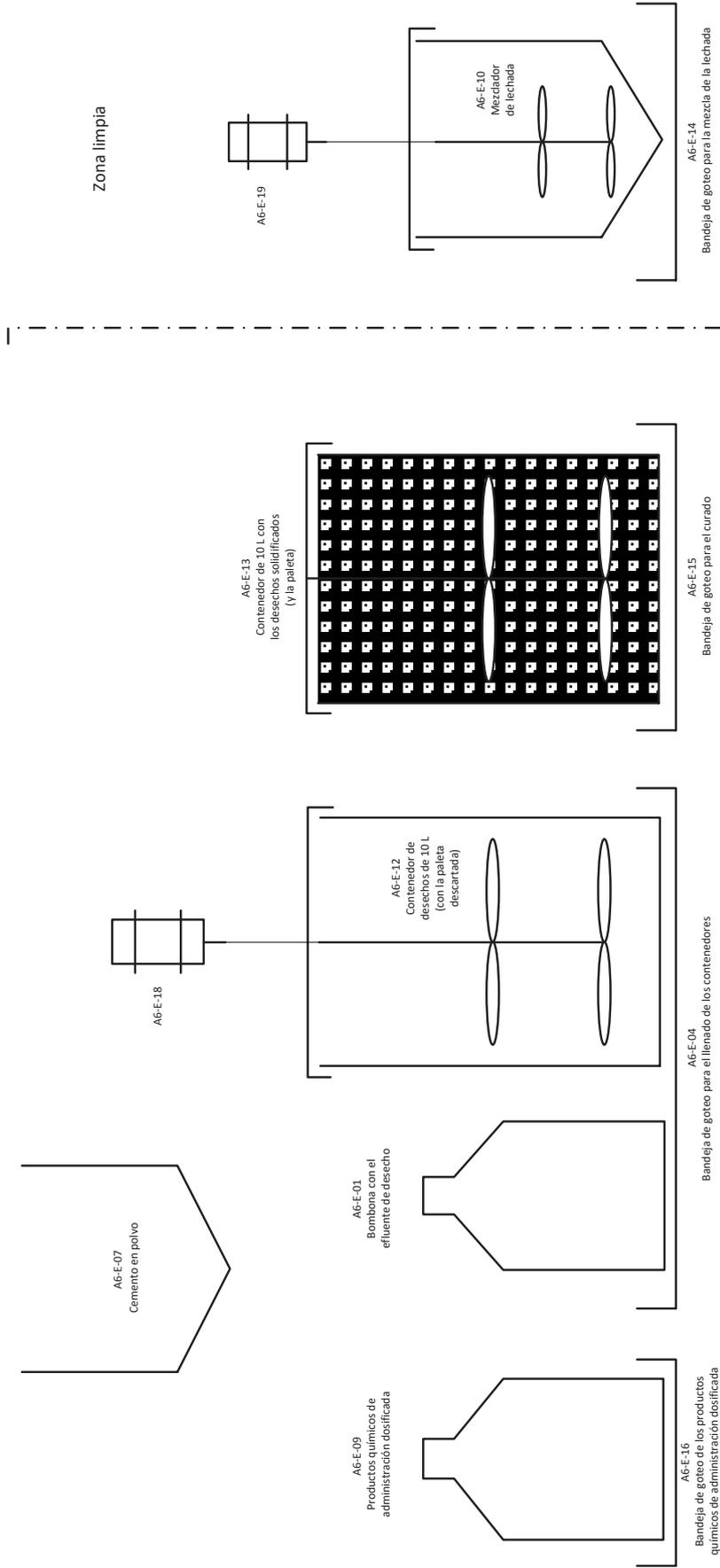


Fig. 5.1. Diagrama de flujo del proceso del Módulo A6-Solidificación.

CUADRO 5.2. LISTA DEL EQUIPO PARA EL MÓDULO A6–SOLIDIFICACIÓN

Identificador	Descripción	Material
A6-E-01	Bombona de desechos sin tratar (5 L)	Plástico
A6-E-04	Bandeja de goteo para el llenado de los contenedores	Plástico o acero inoxidable
A6-E-07	Contenedor de cemento en polvo	Plástico
A6-E-09	Recipiente de productos químicos de administración dosificada	Plástico o acero inoxidable
A6-E-10	Mezclador de lechada	Plástico o acero
A6-E-12	Contenedor de desechos (10 L)	Plástico o acero
A6-E-13	Contenedor de desechos en proceso de curado	Plástico o acero inoxidable
A6-E-14	Bandeja de goteo para la mezcla de la lechada	Plástico o acero inoxidable
A6-E-15	Bandeja de goteo para el curado	Plástico o acero inoxidable
A6-E-16	Bandeja de goteo de los productos químicos de administración dosificada	Plástico o acero inoxidable
A6-E-18	Mezclador de los desechos	Plástico o acero inoxidable
A6-E-19	Mezclador de lechada	Plástico o acero inoxidable



Fig. 5.2. Paleta agitadora.

- g) El equipo comprenderá:
- i) Un contenedor para la mezcla de lechadas, A6-E-10 (como el que se ilustra en la figura 5.4).
 - ii) Una paleta agitadora descartable (como la que se ilustra en la figura 5.5).
 - iii) Un mezclador de gran par, A6-E-19 (como el que se ilustra en la figura 5.6).
 - iv) Una bandeja de goteo, A6-E-14, de acero inoxidable, polietileno o polipropileno, situada bajo el contenedor de mezcla para retener las salpicaduras o los derrames que puedan producirse durante la operación.



Fig. 5.3. Mezclador de sobremesa de gran par.



Fig. 5.4. Contenedor para la mezcla de lechadas.



Fig. 5.5. Paleta agitadora descartable.

- h) Debería existir un medio para aislar eléctricamente el equipo eléctrico antes del mantenimiento, por ejemplo un aislador eléctrico.
- i) Debería existir un mecanismo de parada de emergencia para todo el equipo eléctrico.
- j) Todo el equipo eléctrico de la cabina debería tener el grado de protección IP adecuado para permitir el lavado a fondo de la planta y el equipo (por ejemplo, un grado de protección IP54 o superior).



Fig. 5.6. Mezclador de gran par.

5.1.6. Módulo A6 — Consideraciones relativas a la instalación

- a) Todo el equipo debería caber en una mesa de trabajo.
- b) El módulo puede alojarse en un Módulo D3–Cabinas sin blindaje o en una campana de gases patentada.
- c) Si se utiliza una cabina sin blindaje, los contenedores de desechos solidificados terminados podrán colocarse directamente en un bidón de 200 L para su encapsulamiento junto con otros desechos no compactables, evitándose así el transporte (véase el Módulo E1).
- d) Se precisará un carrito de transporte manual patentado para mover diferentes contenedores de desechos.
- e) Se requerirá un laboratorio radioquímico para el muestreo y análisis de los desechos líquidos sin tratar y hormigonados. Los resultados permitirán verificar que la formulación de la mezcla de desechos y cemento utilizada fue correcta. El muestreo y análisis permiten también vigilar el comportamiento del equipo.
- f) Habrá que realizar ensayos para desarrollar y poner a prueba la formulación adecuada de la mezcla de desechos y cemento (incluida la mezcla óptima de cementos en polvo), optimizar la carga de desechos y optimizar también el comportamiento del producto, es decir, las propiedades de los desechos hormigonados, como su resistencia a la compresión y la tasa de lixiviación. El equipo requerido para los ensayos comprende lo siguiente:
 - i) una campana de gases o un espacio de contención pequeño para manipular líquidos activos;
 - ii) muestras de líquidos activos;
 - iii) medios de análisis radiactivo de líquidos;
 - iv) cemento en polvo;
 - v) medios de medición del par de torsión/la viscosidad;
 - vi) medios para medir la temperatura.
- g) Se requerirá agua de proceso para preparar las soluciones químicas y enjuagar el equipo.
- h) Se necesitará equipo de monitorización radiológica de mano para controlar los niveles de radiación de las bombonas de desechos entrantes y de los contenedores de desechos terminados, y confirmar que el bulto de desechos cumple con los criterios de aceptación de desechos para el almacenamiento o la disposición final.



Fig. 5.7. Almacenamiento de bombonas de desechos líquidos.

- i) Se precisará equipo de monitorización individual para los operadores que realicen el mantenimiento y otras actividades que entrañen el riesgo de contaminación.
- j) Se requerirá un lugar de almacenamiento en seco del cemento en polvo (posiblemente fuera de la contención).
- k) Se requerirá un lugar de almacenamiento para las piezas de recambio del equipo, los recipientes de muestras y el equipo de laboratorio.
- l) Se necesitará un área de almacenamiento dotada de contención para un máximo de cinco bombonas de 10 L (o un volumen equivalente) de desechos líquidos en espera de tratamiento y análisis de muestras (parecidas a las ilustradas en la figura 5.7). Para evitar alentar la acumulación de líquidos no tratados, el espacio de almacenamiento debería limitarse a una única remesa de contenedores de hasta 10 bombonas.
- m) Se precisará equipo de protección personal para los operadores que manipulen el cemento en polvo y las lechadas, es decir, monos, zapatos o botas protectoras, gafas de seguridad, máscaras contra el polvo (máscaras P3 desechables) y guantes.
- n) Debería haber espacio suficiente para construir un blindaje temporal en torno al contenedor de desechos, por ejemplo con ladrillos de plomo. Si es necesario, tras la medición de los niveles de radiación, deberían colocarse ladrillos de plomo alrededor del contenedor antes de introducir en él los desechos, para reducir al mínimo las tasas de dosis recibidas por el operador.

5.1.7. Módulo A6 — Requisitos

- a) Deben existir barreras y/o controles adecuados para gestionar el acceso del personal a la instalación de acondicionamiento.
- b) Los operadores deberán llevar equipo de protección personal apropiado, por ejemplo, un mono, calzado protector, gafas de seguridad o máscara y guantes.
- c) Tiene que haber un técnico de laboratorio que se encargue del muestreo y del cálculo de los productos químicos que se requerirán para el tratamiento de cada lote.
- d) Tiene que haber un supervisor de protección radiológica que vigile las operaciones, como la recepción de las bombonas de desechos y el despacho de los contenedores de desechos, así como los propios contenedores de desechos durante el llenado, la mezcla y el despacho.
- e) El cemento en polvo será una formulación premezclada que presente las propiedades físicas y químicas ideales para la solidificación de los desechos líquidos. Es importante que no haya errores en la formulación, porque la recuperación es muy difícil.

- f) El riesgo de contaminación aerotransportada será bajo, por lo que no se requerirá monitorización, salvo en caso de trabajos de mantenimiento intrusivo del equipo.
- g) Los desechos tratados y sin tratar deberían almacenarse en zonas separadas. Los contenedores deberían estar marcados con identificadores exclusivos para facilitar su identificación.

5.1.8. Módulo A6 — Descripción y funcionamiento del proceso

La descripción que sigue presupone el procesamiento en una cabina sin blindaje, pero se aplica igualmente a una campana de gases:

- a) Las bombonas de desechos A6-E-01 que vayan llegando deberían monitorizarse y almacenarse en la zona designada para ello detrás de la contención. Cuando se hayan acumulado cinco bombonas, se podrán organizar los trabajos de un día de procesamiento.
- b) Utilizando el carrito destinado a ese fin, transportar los contenedores A6-E-01 acumulados hasta la cabina. Con cuidado, levantar e introducir en la cabina los cinco contenedores, uno a la vez.
- c) Colocar un contenedor de desechos A6-E-12 de 10 L en la bandeja de goteo de la estación de llenado A6-E-04, bajo el mezclador A6-E-18.
- d) Tras el análisis de las muestras, se prescribirá una fórmula para los efluentes no tratados. Aplicando esta fórmula, transferir manualmente el volumen requerido de efluente no tratado al contenedor de desechos y someterlo al tratamiento previo con productos químicos o gránulos de arcilla que corresponda.
- e) Instalar la paleta agitadora en el portabrocas del mezclador. Bajar la paleta hasta que se encuentre dentro del contenedor de desechos, poner en marcha el mezclador A6-E-18 y mezclar los desechos líquidos orgánicos.
- f) Añadir agua y, de a poco (a un ritmo de entre 0,5 y 1,0 kg/min), vaciar manualmente el contenedor de cemento en polvo A6-E-07 en el contenedor de los desechos que se están mezclando.
- g) Seguir mezclando los desechos y el cemento durante unos 30 min, hasta que se haya vertido todo el cemento en polvo. Detener el mezclador A6-E-18. Desconectar la paleta descartable del portabrocas del mezclador y alzar el mezclador A6-E-18. Transferir el contenedor de desechos en solidificación A6-E-13 a la zona de curado y colocarlo en la bandeja de goteo A6-E-15. Someter cada producto hormigonado a un curado de 24 h.
- h) Repetir el proceso de hormigonado con los restantes desechos no tratados del lote. Controlar periódicamente el fraguado del producto hormigonado.
- i) La cubierta de lechada no será necesaria si los contenedores solidificados se encapsulan inmediatamente en un bidón de acero de 200 L, junto con otros desechos no compactables, en el Módulo E1.
- j) En el caso de los contenedores no destinados a una disposición final inmediata, podrá añadirse una cubierta de lechada. De este modo, el producto del contenedor de desechos tendrá una superficie superior limpia, lo que reducirá al mínimo el riesgo de propagación de la contaminación. Preparar un lote de lechada en el mezclador A6-E-10, situado en una zona limpia. Introducir la lechada en la cabina y aplicar una capa a cada contenedor. Tras otro período de curado de 24 h, colocar los contenedores en un almacenamiento controlado hasta su disposición final.
- k) Una vez vaciados, los contenedores de los desechos sin tratar pueden ya sea lavarse a fondo con agua de proceso y reutilizarse para la recogida de otros desechos sin tratar, o trocearse para reducir el volumen y colocarse en un bidón de 200 L de desechos no compactables, a la espera del encapsulamiento.

5.1.9. Módulo A6 — Inconvenientes del proceso

- a) Se requieren ensayos para encontrar la formulación correcta de la mezcla de desechos y cemento y confirmar que cumple los criterios de aceptación de desechos para el almacenamiento provisional o la disposición final.
- b) Los desechos no son recuperables.

5.1.10. Módulo A6 — Requisitos de interconexión e integración

Integración con otros módulos de proceso:

- El equipo debería utilizarse dentro de un espacio de contención adecuado, como una campana de gases ya existente o la cabina sin blindaje del Módulo D3.

5.2. MÓDULO B1—TRATAMIENTO QUÍMICO

5.2.1. Módulo B1 — Consideraciones generales

El tratamiento químico tiene por objeto separar una proporción importante de los radionucleidos contaminantes del volumen total de desechos líquidos acuosos, generando un pequeño volumen de líquido que contendrá los radionucleidos en un lodo depositado por gravedad. El volumen de desechos acuosos restante puede ser adecuado para la descarga inmediata, o requerir un ‘pulimento’ adicional. Esto puede hacerse por intercambio iónico (véase el Módulo B2) o por filtración fina (véanse los módulos B4 o B5).

El módulo de tratamiento químico procesará los desechos acuosos en lotes. Los desechos serán transferidos por bombeo del contenedor de almacenamiento al módulo de tratamiento. El líquido tratado y los desechos concentrados se separarán mediante sedimentación por gravedad y serán luego bombeados a diferentes contenedores para su extracción del módulo.

Los principales componentes del módulo son un tanque de tratamiento químico agitado, con medios para la administración dosificada de los productos químicos y un sistema de tubo de inmersión y bomba para la decantación del sobrenadante del líquido tratado. El mismo sistema de tubo de inmersión y bomba se utiliza también para descargar los lodos.

Todo el equipo de este módulo está situado en una bandeja de goteo que ofrece contención en caso de fuga o derrame. Todos los contenedores de desechos conectados al módulo se encuentran también dentro de la bandeja de goteo.

5.2.2. Módulo B1 — Base de diseño

La base de diseño resumida en el cuadro 5.3 indica los principales parámetros y supuestos utilizados para determinar el diseño de este módulo de procesamiento.

CUADRO 5.3. BASE DE DISEÑO DEL MÓDULO B1–TRATAMIENTO QUÍMICO

Características de los desechos iniciales	
Volumen líquido total	Típicamente de 0,5 m ³ a 10 m ³ por año; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 5 m ³ por año.
Llegada	Periódicamente, en contenedores de alrededor de 50 L, que se agrupan luego en lotes de entre 100 L y 500 L.
Tasa máxima de procesamiento	Típicamente de 2 h a 8 h por lote, según la tasa de sedimentación de los lodos.
Contenido de actividad de los desechos iniciales	Niveles de actividad bajos, un único o varios radionucleidos.
Forma física	Líquidos, principalmente acuosos, pero podrían contener pequeñas cantidades de aceite u otras especies inmiscibles.
Contenido de sólidos	Podrían contener materia particulada.
Contenido de sustancias químicas	Sin contenidos significativos de sustancias químicas, salvo, posiblemente, pequeñas cantidades de agentes complexantes.
Características del efluente tratado	
Contenido de actividad	El factor de descontaminación previsto es de entre 10 y 100. La actividad del efluente tratado dependerá de la actividad inicial.
pH	Se presupone un pH de 6 a 9.
Otros componentes	Lodos separados de la corriente acuosa.
Disponibilidad de servicios	
Servicios	Los diseños esquemáticos deberían indicar las opciones de conexión a los servicios existentes o la necesidad de servicios especiales.
Agua	Necesaria.
Electricidad	Necesaria.
Calefacción del edificio	Necesaria, si es probable que las temperaturas desciendan por debajo de 5 °C.
Calefacción, ventilación y aire acondicionado	No necesarios.
Reactivos químicos	Necesarios.
Drenaje	No necesario. Cualquier fuga o derrame que se produzca quedará retenido en una bandeja de goteo y será devuelto a un contenedor de desechos con ayuda de una pequeña bomba.

5.2.3. Módulo B1 — Diagrama de flujo del proceso

La figura 5.8 ilustra la planta y el equipo en un diagrama de flujo del proceso.

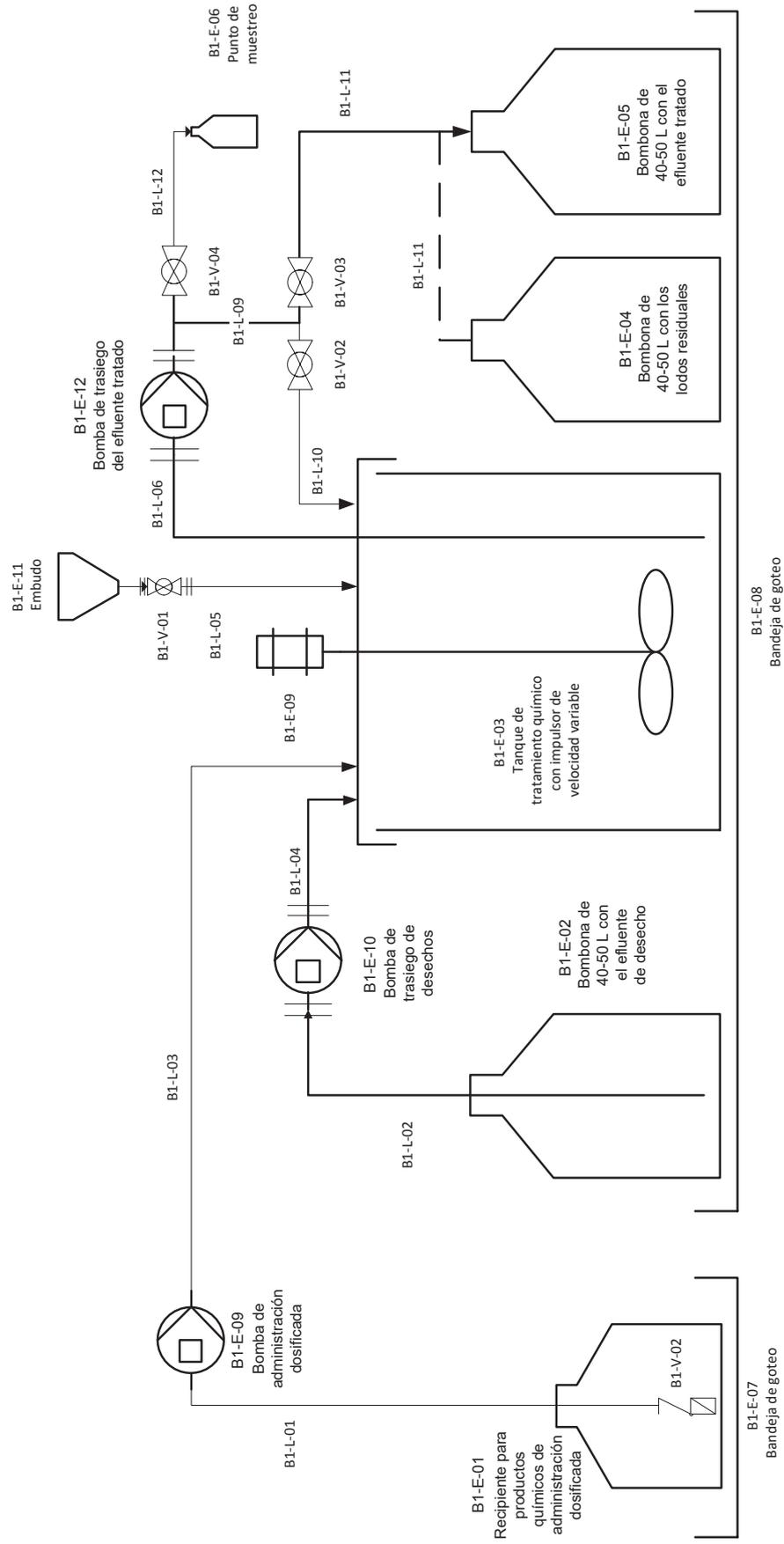


Fig. 5.8. Diagrama de flujo del proceso del Módulo B1—Tratamiento químico.

5.2.4. Módulo B1 — Lista del equipo

El diagrama de flujo indica que se requerirá el equipo enumerado en el cuadro 5.4.

CUADRO 5.4. LISTA DEL EQUIPO PARA EL MÓDULO B1–TRATAMIENTO QUÍMICO

Equipo				
Identificador marcado	Descripción	Material	Tipo	Caudal
B1-E-01	Recipiente para productos químicos de administración dosificada	Plástico o acero inoxidable	Bombona de plástico de 40-50 L	
B1-E-02	Contenedor de desechos acuosos	Plástico	Bombona de 40-50 L	
B1-E-03	Tanque de tratamiento químico	Acero inoxidable o plástico	Cubierto, con agitación	
B1-E-04	Contenedor de efluentes tratados	Plástico	Bombona de 40-50 L	
B1-E-05	Contenedor de efluentes tratados	Plástico	Bombona de 40-50 L	
B1-E-06	Recipiente de muestras	Plástico o vidrio	Vaso de precipitados	
B1-E-07	Bandeja de goteo	Plástico o acero inoxidable		
B1-E-08	Bandeja de goteo	Plástico o acero inoxidable		
B1-E-09	Bomba de administración dosificada de productos químicos	Plástico o acero inoxidable	Peristáltica (bridada)	100 L/h
B1-E-10	Bomba de trasiego de desechos	Plástico o acero inoxidable	Autocebante/de desplazamiento positivo (bridada)	1 000 L/h
B1-E-11	Embudo para la administración dosificada de productos químicos sólidos	Plástico o acero inoxidable	Industrial estándar	
B1-E-12	Bomba de trasiego del efluente tratado	Plástico o acero inoxidable	Autocebante/de desplazamiento positivo (bridada)	1 000 L/h
Tuberías				
Identificador marcado	Descripción	Dimensión de la tubería	Presión de diseño	Temperatura de diseño
B1-L-01	Tubería alimentadora de la bomba de administración dosificada de productos químicos	5-15 mm	2 bar	Ambiente

CUADRO 5.4. LISTA DEL EQUIPO PARA EL MÓDULO B1–TRATAMIENTO QUÍMICO (cont.)

Tuberías				
Identificador marcado	Descripción	Dimensión de la tubería	Presión de diseño	Temperatura de diseño
B1-L-02	Tubería alimentadora de la bomba de trasiego de desechos	15 mm	2 bar	Ambiente
B1-L-03	Tubería de administración dosificada de productos químicos	5-15 mm	2 bar	Ambiente
B1-L-04	Tubería de trasiego de desechos	15 mm	2 bar	Ambiente
B1-L-05	Tubería de administración dosificada de productos químicos sólidos	25 mm	Atmosférica	Ambiente
B1-L-06	Tubo de inmersión de altura variable	15 mm	2 bar	Ambiente
B1-L-07	Tubería de trasiego del efluente tratado	15 mm	2 bar	Ambiente
B1-L-08	Tubería de trasiego del efluente tratado	15 mm	2 bar	Ambiente
B1-L-09	Tubería de trasiego del efluente tratado	15 mm	2 bar	Ambiente
B1-L-10	Tubería de retorno del efluente tratado	15 mm	2 bar	Ambiente
B1-L-11	Tubería de trasiego del efluente tratado	15 mm	2 bar	Ambiente
B1-L-12	Punto de muestreo	15 mm	2 bar	Ambiente
Válvulas				
Identificador marcado	Descripción	Dimensión de la tubería	Clase de válvula	
B1-V-01	Válvula de impulsión del embudo	25	Válvula esférica (bridada)	
B1-V-02	Válvula de retorno del efluente tratado	15	Válvula esférica (bridada)	
B1-V-03	Válvula de aislamiento del efluente tratado	15	Válvula esférica (bridada)	
B1-V-04	Válvula de aislamiento del punto de muestreo	15	Válvula esférica (bridada)	

Nota: Las tuberías y válvulas deberían ser de plástico o acero inoxidable.

5.2.5. Módulo B1 — Descripción del equipo

En la figura 5.9 se presenta un modelo simple del módulo de tratamiento químico.

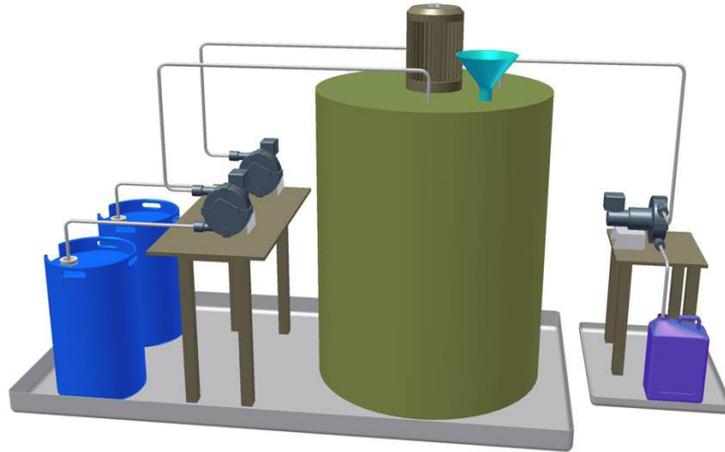


Fig. 5.9. Modelo del Módulo B1–Tratamiento químico.

El equipo del módulo comprende lo siguiente:

- a) Contenedores de almacenamiento de los desechos acuosos, B1-E-02, 04 y 05, consistentes en recipientes de polietileno reutilizables de 45 L, doble pared y alta integridad, diseñados para líquidos químicos peligrosos y certificados por las Naciones Unidas (como los que se ilustran en la figura 5.10). Estos contenedores deberían tener un asidero anular estructural y ergonómico para el izado manual, una boca de vaciado descentrada y características que permitan el apilado seguro. La geometría debería ser lisa, para que puedan limpiarse fácilmente.
- b) Una manguera succionadora de alimentación, B1-L-02, de 15 mm de diámetro nominal y de plástico reforzado flexible, para trasegar los desechos líquidos acuosos del contenedor de alimentación al tanque de tratamiento químico.
- c) Una bomba de alimentación autocebante, B1-E-10, peristáltica o de otro tipo de cavidad progresiva (desplazamiento cuasipositivo) o equivalente, con piezas húmedas de acero inoxidable o plástico y con conexiones de proceso de 15 mm de diámetro nominal, típicamente de un caudal nominal de 1000 L/h, para trasegar los desechos acuosos del contenedor de almacenamiento al tanque de tratamiento químico. Este tipo de bomba permite aspirar el líquido de la parte superior de los contenedores de almacenamiento, en lugar de la inferior, lo que protege mejor la integridad de los contenedores y reduce el riesgo de fugas por daño del dispositivo de vaciado del fondo.
- d) Un recipiente aprobado de preparación/almacenamiento de productos químicos, B1-E-01, de plástico y en forma de bombona (parecido a los contenedores de desechos). Este recipiente será resistente a los productos químicos que contenga, irrompible y fácil de limpiar para su reutilización. Nota: los productos químicos que se utilicen para el tratamiento dependerán del inventario químico y radioquímico de los desechos en cuestión. Este será determinado por un químico profesional, y los productos químicos se prepararán en un laboratorio para su suministro con el módulo.
- e) Un sistema de tuberías de administración dosificada de productos químicos, B1-L-01, de 5 mm de diámetro y de acero inoxidable o plástico, para transferir los productos químicos de sus recipientes al tanque de tratamiento químico.
- f) Una bomba de administración dosificada de productos químicos autocebante, B1-E-09, peristáltica o de otro tipo de cavidad progresiva (desplazamiento cuasipositivo) o equivalente, con piezas



Fig. 5.10. Contenedores de almacenamiento de los desechos acuosos.

- húmedas de acero inoxidable o plástico y con conexiones de proceso de 15 mm de diámetro nominal, típicamente de un caudal nominal de 100 L/h, para transferir los productos químicos del tanque de preparación/almacenamiento al tanque de tratamiento químico.
- g) Un tanque de tratamiento químico, B1-E-03, con impulsor de velocidad variable para garantizar la mezcla uniforme de los productos químicos:
- i) El tanque de tratamiento químico tendrá una capacidad de entre 100 y 500 litros (según el volumen del lote especificado en el diseño del módulo). Sus dimensiones dependerán del tamaño del lote que se deba tratar. En esta especificación, se ha supuesto que los distintos contenedores de líquidos tendrán contenidos parecidos, es decir, un contenido de productos químicos y radionucleidos similar, y podrán ser agrupados en lotes. En consecuencia, se ha fijado un tamaño de lote de hasta 10 contenedores. Si las cantidades de desechos líquidos acuosos son menores, debería utilizarse un recipiente de tratamiento por lotes más pequeño, por ejemplo de 100 L. De igual modo, si los desechos líquidos acuosos presentan más variación de un contenedor a otro, será mejor no mezclar los contenidos, para poder optimizar el tratamiento químico y, de ese modo, los resultados de cada lote. También en este caso debería utilizarse un recipiente de tratamiento por lotes más pequeño, por ejemplo de 100 L.
 - ii) El tanque debería tener una tapadera y dispositivos para la administración dosificada de productos químicos tanto líquidos como sólidos (probablemente en polvo).
- h) Un sistema de tuberías de trasiego, B1-L-06 a B1-L-11, a partir del tanque de tratamiento químico, de 15 mm de diámetro y de plástico o acero inoxidable. Debería utilizarse un tubo de inmersión ajustable, B1-L-06, para:
- i) decantar el sobrenadante del líquido acuoso tratado (tras la sedimentación por gravedad de la materia particulada);
 - ii) descargar los lodos residuales: el tubo de inmersión debería estar graduado para poder medir la interfaz y el drenaje del sobrenadante.
- i) Una tubería para las muestras, B1-L-12, de 15 mm de diámetro nominal y de plástico o acero inoxidable:
- i) una válvula esférica, B1-V-04, de acero inoxidable o plástico, para controlar el flujo por la tubería hacia el recipiente de muestras.

- j) Una bomba de trasiego, B1-E-12, de diafragma, peristáltica (de desplazamiento positivo) o de un tipo equivalente, de plástico o acero inoxidable, con conexiones de 15 mm de diámetro nominal, para:
 - i) transferir líquidos del tanque de tratamiento químico al recipiente de muestras B1-E-06;
 - ii) decantar el efluente tratado del tanque de tratamiento químico al contenedor de efluentes tratados B1-E-05;
 - iii) transferir los lodos del tanque de tratamiento químico al contenedor de lodos residuales B1-E-04.
- k) Un sistema de tuberías de retorno, B1-L-10, de 15 mm de diámetro nominal y de plástico o acero inoxidable, para devolver el efluente tratado al tanque de tratamiento químico, dotado de una válvula esférica, B1-V-02, de acero inoxidable o plástico para controlar el flujo por las tuberías de retorno.
- l) Una manguera de trasiego, B1-L-11, de 15 mm de diámetro nominal y de plástico reforzado flexible, para transferir los desechos líquidos acuosos de la válvula de salida al contenedor de efluentes tratados. Una válvula esférica, B1-V-03, de acero inoxidable o plástico permitirá controlar el flujo a través de la manguera de trasiego del efluente tratado.
- m) Un contenedor de recepción del efluente tratado, B1-E-05, consistente en un recipiente de polietileno reutilizable de 45 L, doble pared y alta integridad, diseñado para líquidos químicos peligrosos y certificado por las Naciones Unidas. El contenedor debería tener un asidero anular estructural y ergonómico para el izado manual, una boca de vaciado descentrada y características que permitan el apilado seguro. Su geometría deberá ser lo más lisa posible, para que pueda limpiarse fácilmente.
- n) Un contenedor de recepción de los lodos residuales, B1-E-04, consistente en un recipiente de polietileno reutilizable de 45 L, doble pared y alta integridad, diseñado para líquidos químicos peligrosos y certificado por las Naciones Unidas. El contenedor debería tener un asidero anular estructural y ergonómico para el izado manual, una boca de vaciado descentrada y características que permitan el apilado seguro. Su geometría deberá ser lo más lisa posible, para que pueda limpiarse fácilmente.
- o) Un armazón de acero inoxidable o de acero dulce revestido de epoxi, que sostiene todo el equipo:
 - i) El armazón estará provisto de una bandeja de goteo, B1-E-08, con un contenedor de fondo plano de acero inoxidable o plástico para recoger los derrames que puedan producirse. La bandeja de goteo tendrá cabida para los contenedores de alimentación y de recepción de desechos, el tanque de tratamiento químico, y las bombas de alimentación y de trasiego, y una capacidad que equivaldrá típicamente al 110 % del volumen total de líquidos presente en los contenedores y en todos los demás equipos y tuberías montados dentro o encima de ella (de 40 a 50 litros). Otra bandeja de goteo, B1-E-07, de acero inoxidable o plástico, debería contener el tanque de productos químicos de administración dosificada y tener una capacidad equivalente al 110 % o el total del líquido presente en el contenedor y en las tuberías que se encuentren sobre la bandeja.
 - ii) El armazón debería tener patas regulables para la nivelación.
- p) Un medidor de mano de la radiación (gamma) para vigilar la tasa de dosis emitida por los lodos sedimentados.
- q) Un medidor de pH para evaluar las muestras de desechos y controlar la química del tratamiento.
- r) Un panel de control eléctrico (no ilustrado en la imagen del modelo) accionado desde el armazón, que reciba el suministro de energía eléctrica y controle el funcionamiento de todo el equipo eléctrico del módulo. El panel de control debería incluir un botón de parada de emergencia, para detener todos los componentes del módulo, y un aislador eléctrico que permita aislar todo el equipo.
- s) Todo el equipo eléctrico del módulo deberá tener el grado de protección IP adecuado para permitir el lavado a fondo de la planta y el equipo del módulo (un grado de protección IP54 o superior).

5.2.6. Módulo B1 — Consideraciones relativas a la instalación

La instalación que reciba este módulo de proceso debería tener los siguientes elementos:

- a) Una zona para recibir los desechos acuosos en bombonas de 45 L.
- b) Una zona dotada de contención (similar a la ilustrada en la figura 5.7) para el almacenamiento temporal de hasta 20 bombonas. Esto es necesario para los efluentes líquidos a la espera de tratamiento químico, los lodos residuales o desechos de materia particulada a la espera de otro procesamiento, o los desechos acuosos tratados a la espera de otro procesamiento o de la descarga.
- c) Un carrito de transporte manual para desplazar los contenedores más pequeños (parecido al que se ilustra en la figura 5.11). Para su colocación en la bandeja de goteo y la retirada de ella, los contenedores de desechos serán izados a mano (por dos personas).
- d) Una horquilla elevadora para mover contenedores grandes.
- e) Un espacio de almacenamiento para los productos químicos de tratamiento en una zona dotada de contención.
- f) Equipo para el muestreo y análisis de los desechos tratados (durante el tratamiento y después de este).
- g) Un laboratorio radioquímico sencillo para analizar las muestras de desechos y planificar y preparar los volúmenes adecuados de productos químicos con la concentración correcta para el tratamiento.
- h) Un suministro de agua para el lavado a fondo de la planta y el equipo, por ejemplo antes del mantenimiento.
- i) Una conexión adecuada a la alcantarilla del emplazamiento, o a otro punto de descarga de líquidos aprobado, con las debidas autorizaciones.



Fig. 5.11. Carrito de transporte manual para el desplazamiento de contenedores pequeños.

5.2.7. Módulo B1 — Requisitos

- a) Los productos químicos de administración dosificada suelen ser corrosivos o tóxicos; por lo tanto, deberían obtenerse las fichas de datos sobre seguridad de los materiales, para garantizar la manipulación apropiada de esos productos. También debería proporcionarse el equipo de protección personal necesario.
- b) Deben existir barreras y/o controles adecuados para gestionar el acceso del personal a la zona del tanque de tratamiento químico.

- c) Los operadores deberán llevar equipo de protección personal apropiado, por ejemplo, un mono, calzado protector, gafas de seguridad o máscara y guantes.
- d) Un supervisor de protección radiológica vigilará las operaciones, incluidos los contenedores de desechos durante la recepción y el despacho, y, en el fondo del tanque de tratamiento, cuando se retire la tubería de vaciado de los contenedores vacíos.
- e) Un técnico o químico profesional debería tomar muestras de los desechos acuosos y analizarlos, después de la instalación y antes del inicio del funcionamiento del módulo.
- f) Sobre la base de los resultados de la muestra, un químico debería planificar el método de tratamiento químico. Si los desechos de varios contenedores tienen características similares, podrán combinarse y tratarse en un mismo lote.

5.2.8. Módulo B1 — Descripción y funcionamiento del proceso

- a) El módulo de tratamiento químico puede recibir desechos acuosos en diferentes contenedores, que típicamente serán bombonas de plástico de 45 L. Para el procesamiento, los desechos que estén en otros tipos de contenedor deberán trasegarse a bombonas con ayuda de una bomba rotativa manual o eléctrica.
- b) Un operador tomará con una pipeta una pequeña muestra del desecho líquido, que será analizada en el laboratorio radioquímico para determinar el pH y la composición química y radiológica. El tratamiento químico adecuado debería ser planificado por un químico, sobre la base de las mediciones, después de lo cual el laboratorio preparará los productos químicos.
- c) Una bombona de desechos líquidos destinados al procesamiento puede ser levantada y colocada en la bandeja de goteo por dos personas. También pueden utilizarse dispositivos de sujeción para levantar las bombonas con una horquilla elevadora u otro medio de izado mecánico y colocarlas en la bandeja de goteo. Se requerirá una segunda bombona vacía de capacidad igual o mayor para la recolección del efluente tratado.
- d) Bajo supervisión de protección radiológica, introducir el tubo succionador de alimentación B1-L-02 en el contenedor de desechos de alimentación y asegurarlo. Asimismo, introducir el tubo de trasiego B1-L-04 en el tanque de tratamiento químico y asegurarlo. A continuación, con ayuda de la bomba de trasiego B1-E-10, traspasar los desechos acuosos al tanque de tratamiento químico. Cuando el contenedor de desechos esté vacío, parar la bomba y poner en marcha el agitador del tanque.
- e) Trasferir los productos químicos de tratamiento a su recipiente e introducir el tubo alimentador B1-L-01. Utilizando la bomba de administración dosificada B1-E-09, traspasar los productos químicos al tanque de tratamiento químico. (La administración dosificada podría hacerse también manualmente, en función de las cantidades y la naturaleza de los productos químicos que se deban manipular. En este caso, deberán efectuarse las evaluaciones del riesgo que correspondan para confirmar que la manipulación manual es aceptable).
- f) El tratamiento químico que se emplee dependerá de los tipos de radionucleidos presentes y de los otros constituyentes químicos de los desechos acuosos. Típicamente, los pasos para la eliminación de los contaminantes de la solución comprenderán lo siguiente:
 - i) La acidificación.
 - ii) La adición de productos químicos que se combinen con los radionucleidos y formen un manto de lodo.
 - iii) La adición de álcalis para elevar el pH y provocar la precipitación de los radionucleidos.
 - iv) El uso del tratamiento químico de los desechos acuosos, que normalmente podrá ser un proceso continuo o en lotes. Sin embargo, dados los bajos volúmenes de líquidos previstos, será preferible el tratamiento en lotes, porque simplificará el equipo y permitirá adaptar la química del tratamiento a cada lote, optimizando así el resultado.
 - v) La adición de equipo de ajuste de la composición de los productos químicos, que puede ser necesario para la preparación/dilución de los productos. Este equipo podría incluir pequeños

- tanques para mezclar los productos químicos con agua. La mezcla puede efectuarse por agitación manual o con un pequeño mezclador eléctrico.
- vi) El uso de un agente químico floculante (polielectrolito), que puede ser necesario para promover la sedimentación por gravedad del precipitado. Este producto químico también tendrá que ser preparado mezclándolo con agua, antes de introducirlo en el tanque de tratamiento químico.
 - g) Un operador debería monitorizar el pH durante la administración dosificada de los productos químicos.
 - h) Dejar el tanque de tratamiento químico con el agitador en marcha durante el período requerido. Según el tratamiento de que se trate, ese período puede ser de hasta 24 h. A continuación, apagar el agitador y esperar a que sedimente el precipitado, lo que puede tardar, como máximo, otras 24 h.
 - i) Tomar una muestra del desecho tratado y analizarla para determinar si el tratamiento ha concluido. Colocar un recipiente de muestras B1-E-06 en el punto de muestreo. Cuando se haya depositado el precipitado, introducir el tubo de inmersión de trasiego B1-L-06 justo por debajo de la superficie del líquido del tanque de tratamiento químico. Abrir la válvula de toma de muestras B1-V-04 y la válvula de retorno B1-V-02. Poner en marcha la bomba de trasiego B1-E-12. Una vez recogida la muestra, cerrar la válvula de toma de muestras, parar la bomba y cerrar la válvula de retorno.
 - j) Seguir los procedimientos para la muestra descritos más arriba. Se supone que las reacciones habrán terminado y el tratamiento químico estará completo.
 - k) Abrir la válvula de aislamiento B1-V-03 y poner en marcha la bomba de trasiego B1-E-12. Vigilar atentamente el nivel del líquido y bajar el tubo de inmersión según sea necesario. Cuando el nivel del tubo de inmersión se aproxime a la capa de lodo, cerrar la válvula de aislamiento y detener la bomba. Retirar el tubo de trasiego del contenedor de efluentes tratados B1-E-05. Teniendo cuidado de evitar el goteo, introducir el tubo en un contenedor de lodos residuales vacío B1-E-04. Abrir nuevamente la válvula de aislamiento B1-V-03 y volver a poner en marcha la bomba de trasiego B1-E-12. Traspasar el contenido restante del tanque de tratamiento químico al contenedor de lodos residuales.
 - l) Tomar una muestra del contenedor de efluentes tratados y medir la actividad para determinar el grado de descontaminación alcanzado. De este modo se verá si se requiere un ‘pulimento’ adicional o si se puede proceder a la descarga del desecho.
 - m) Tomar una muestra de los lodos residuales para determinar el tratamiento siguiente.
 - n) Si es el caso, sellar el contenedor de efluentes tratados, trasladarlo a la zona de almacenamiento que corresponda, y colocar uno vacío en su lugar. Asimismo, trasladar el contenedor de lodos residuales a la zona de almacenamiento apropiada y sustituirlo por un contenedor vacío. Retirar el contenedor de desechos de alimentación vacío y reemplazarlo por uno lleno. El contenedor de alimentación podrá enjuagarse con agua de proceso limpia, vertiendo luego las aguas utilizadas para este enjuague en otro contenedor de desechos de alimentación.
 - o) El equipo debería enjuagarse a fondo con agua de proceso entre un lote y otro, recogiendo el agua utilizada en un contenedor de desechos de alimentación.

5.2.9. Módulo B1 — Inconvenientes del proceso

- a) La sedimentación por gravedad puede no eliminar todos los sólidos, en cuyo caso será necesario un tratamiento adicional, por ejemplo, por filtración (Módulos B4 y B5) o por intercambio iónico (Módulo B2).
- b) El proceso crea una corriente de desechos de lodos que debe procesarse a fin de acondicionarla para su disposición final.
- c) El proceso requiere la manipulación de productos químicos tóxicos o corrosivos.

5.2.10. Módulo B1 — Requisitos de interconexión e integración

Los requisitos de interconexión del módulo de proceso comprenden lo siguiente:

- a) una vía de descarga autorizada para los desechos acuosos tratados, lo que puede requerir un procesamiento adicional (por ejemplo, en los Módulos B2 y B5) a fin de cumplir los criterios para la descarga.

La integración con otros módulos de proceso comprende:

- a) el uso antes del Módulo B2, es decir, del módulo de intercambio iónico, que se emplearía para procesar el líquido sobrenadante eliminando la actividad soluble;
- b) el uso antes del Módulo B4, es decir, del módulo de flujo tangencial, que se emplearía para procesar el líquido sobrenadante eliminando los sólidos finos en suspensión;
- c) el uso antes del Módulo B5, es decir, del módulo de filtración, que se emplearía para procesar el líquido sobrenadante eliminando los sólidos en suspensión;
- d) el uso antes del Módulo B6, es decir, del módulo de solidificación, que se emplearía para consolidar los lodos residuales precipitados.

5.3. MÓDULO B2–INTERCAMBIO IÓNICO

5.3.1. Módulo B2 — Consideraciones generales

El intercambio iónico tiene por objeto eliminar una proporción importante de la contaminación por radionucleidos solubles del volumen inicial de desechos líquidos acuosos, generando un pequeño volumen de materiales de intercambio iónico, que contendrá los radionucleidos, y un volumen residual de desechos acuosos aptos para la descarga inmediata.

El módulo de intercambio iónico se utilizará para bombear líquido de una bombona a través de la columna de intercambio iónico, recogiendo luego el desecho líquido tratado en otra bombona.

Los principales componentes del módulo son una bomba, una columna de intercambio iónico y un filtro de cartucho. La bomba extrae el líquido de una bombona y lo hace pasar por la columna de intercambio iónico y luego por el filtro de cartucho. La función del filtro es eliminar los fragmentos de material de intercambio iónico que el líquido pueda haber arrastrado del lecho de intercambio iónico. Una vez pasado por el filtro, el líquido tratado se descarga en otra bombona.

La columna de intercambio iónico, el filtro de cartucho y la bomba están situados sobre una bandeja de goteo que ofrece contención en caso de fuga o derrame. Las bombonas de alimentación de desechos acuosos y de recolección del líquido filtrado deben levantarse y colocarse en esta bandeja de goteo para el procesamiento.

5.3.2. Módulo B2 — Base de diseño

La base de diseño resumida en el cuadro 5.5 indica los principales parámetros y supuestos utilizados para determinar el diseño de este módulo de procesamiento.

CUADRO 5.5. BASE DE DISEÑO DEL MÓDULO B2–INTERCAMBIO IÓNICO

Características de los desechos iniciales	
Volumen líquido total	Típicamente de 0,5 m ³ a 10 m ³ por año; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 5 m ³ por año.
Llegada	Periódicamente, en lotes de alrededor de 50 L.
Tasa máxima de procesamiento	100 L/h.
Contenido de actividad de los desechos iniciales Niveles de actividad bajos, un único o varios radionucleidos.	
Forma física	Líquidos, acuosos. Se presupone que no contienen aceites ni otras especies inmiscibles.
Contenido de sólidos	Ningún sólido.
Contenido de sustancias químicas	Sin contenidos significativos de sustancias químicas, salvo, posiblemente, pequeñas cantidades de agentes complexantes.
Características del efluente tratado	
Contenido de actividad	El factor de descontaminación previsto es de entre 10 y 100. La actividad del efluente tratado dependerá de la actividad inicial.
pH	Se presupone un pH de 6 a 9.
Otros componentes	Ninguno que se conozca.
Disponibilidad de servicios	
Servicios	Los diseños esquemáticos deberían indicar las opciones de conexión a los servicios existentes o la necesidad de servicios especiales.
Agua	Necesaria.
Electricidad	Necesaria.
Calefacción del edificio	Necesaria, si es probable que las temperaturas desciendan por debajo de 5 °C.
Calefacción, ventilación y aire acondicionado	No necesarios.
Reactivos químicos	Necesarios.
Drenaje	No necesario. Cualquier fuga o derrame que se produzca quedará retenido en una bandeja de goteo y será devuelto a un contenedor de desechos con ayuda de una pequeña bomba.

5.3.3. Módulo B2 — Diagrama de flujo del proceso

La figura 5.12 ilustra la planta y el equipo en un diagrama de flujo del proceso.

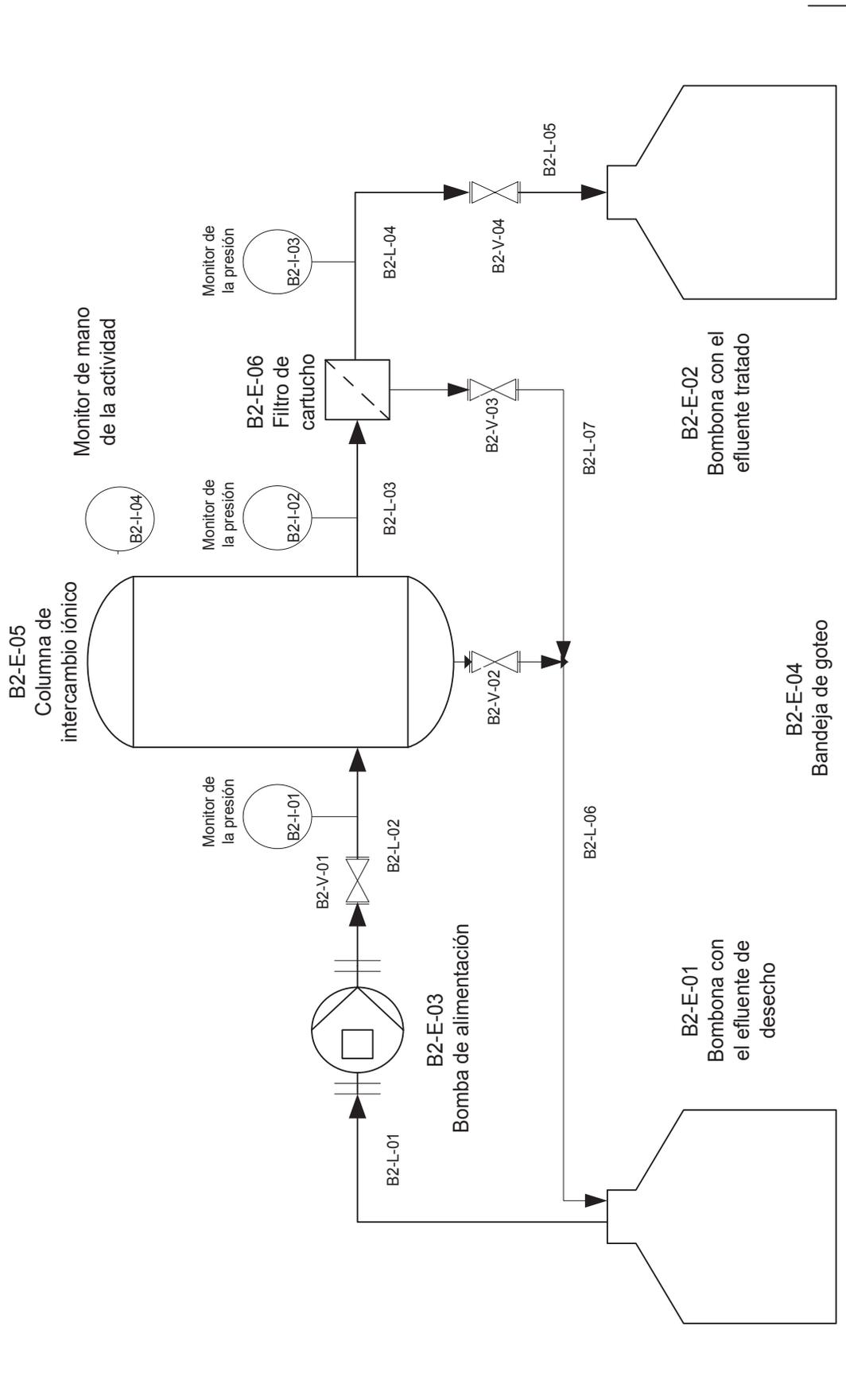


Fig. 5.12. Diagrama de flujo del proceso del Módulo B2-Intercambio iónico.

5.3.4. Módulo B2 — Lista del equipo

El diagrama de flujo indica que se requerirá el equipo enumerado en el cuadro 5.6.

CUADRO 5.6. LISTA DEL EQUIPO PARA EL MÓDULO B2-INTERCAMBIO IÓNICO

Equipo				
Identificador	Descripción	Material	Tipo	Caudal
B2-E-01	Bombona para el desecho acuoso	Plástico	Bombona de plástico de 40-50 L	
B2-E-02	Bombona para el efluente tratado	Plástico	Bombona de plástico de 40-50 L	
B2-E-03	Bomba de alimentación	Plástico o acero inoxidable	Autocebante/desplazamiento positivo	100 L/h
B2-E-04	Bandeja de goteo	Plástico o acero inoxidable		
B2-E-05	Columna de intercambio iónico	Plástico o acero inoxidable	Lecho de resinas mixtas	100 L/h
B2-E-06	Filtro de cartucho	Plástico o acero inoxidable	Cartucho	100 L/h
Tuberías				
Identificador	Descripción	Dimensión de la tubería	Presión de diseño	Temperatura de diseño
B2-L-01	Tubería succionadora de la bomba de alimentación	15 mm	2 bar	Ambiente
B2-L-02	Tubería de descarga de la bomba de alimentación	15 mm	5 bar	Ambiente
B2-L-03	Tubería de descarga de la columna de intercambio iónico	15 mm	5 bar	Ambiente
B2-L-04	Tubería de descarga del filtro	15 mm	2 bar	Ambiente
B2-L-05	Tubería de descarga	15 mm	2 bar	Ambiente
B2-L-06	Tubería de drenaje	15 mm	2 bar	Ambiente
B2-L-07	Tubería de drenaje del filtro	15 mm	2 bar	Ambiente

CUADRO 5.6. LISTA DEL EQUIPO PARA EL MÓDULO B2–INTERCAMBIO IÓNICO (cont.)

Válvulas			
Identificador	Descripción	Dimensión de la tubería	Tipo de válvula
B2-V-01	Válvula de alimentación de la columna de intercambio iónico	15 mm	De diafragma (bridada)
B2-V-02	Válvula de purga de la columna de intercambio iónico	15 mm	Esférica (bridada)
B2-V-03	Válvula de purga del filtro de cartucho	15 mm	Esférica (bridada)
B2-V-04	Válvula de salida del efluente tratado	15 mm	De diafragma (bridada)
Instrumentos			
Identificador	Descripción	Tipo	Intervalo
B2-I-01	Presión de entrada en la columna de intercambio iónico		
B2-I-02	Presión de salida de la columna de intercambio iónico / presión de entrada en el filtro		
B2-I-03	Presión de salida del filtro		
B2-I-04	Monitor de la actividad	De mano	

Nota: Las tuberías y válvulas deberían ser de plástico o acero inoxidable.

5.3.5. Módulo B2 — Descripción del equipo

En la figura 5.13 se presenta un modelo simple del módulo de intercambio iónico.

El equipo del módulo comprende lo siguiente:

- a) Contenedores de almacenamiento de los desechos acuosos, B2-E-01, consistentes en recipientes de polietileno reutilizables de 45 L, doble pared y alta integridad, diseñados para líquidos químicos peligrosos y certificados por las Naciones Unidas. Estos contenedores tendrán un asidero anular estructural y ergonómico para el izado manual, una boca de vaciado descentrada y características que permitan el apilado seguro. Su geometría deberá ser lo más lisa posible, para que puedan limpiarse fácilmente.
- b) Una manguera succionadora de alimentación, B2-L-01, de 15 mm de diámetro nominal y de plástico reforzado flexible, para transferir los desechos líquidos acuosos del contenedor de alimentación a la bomba de alimentación.

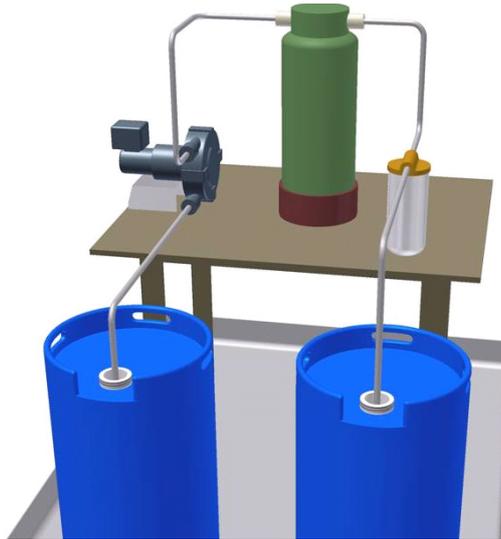


Fig. 5.13. Modelo del Módulo B2–Intercambio iónico.

- c) Una bomba de alimentación autocebante, B2-E-03, peristáltica o de otro tipo de cavidad progresiva (desplazamiento cuasipositivo) o equivalente, con piezas húmedas de plástico y/o acero inoxidable y conexiones de proceso de 15 mm de diámetro nominal, típicamente de un caudal nominal de 100 L/h, para bombear los desechos líquidos acuosos del contenedor de alimentación, a través de la columna de intercambio iónico y el filtro, hasta un segundo contenedor.
- d) Un sistema de tuberías de trasiego de la bomba, B2-L-02, de 15 mm de diámetro nominal y de acero inoxidable o plástico, para transferir los desechos líquidos acuosos de la bomba de alimentación a la columna de intercambio iónico, con una válvula de control de la alimentación, B2-V-01, de 15 mm de diámetro nominal, de tipo diafragma y de acero inoxidable o plástico, para regular el flujo y la presión de los desechos líquidos en la columna de intercambio iónico.
- e) Una columna de intercambio iónico patentada, B2-E-05, de acero inoxidable o plástico (que, según la naturaleza y el nivel de la actividad, puede requerir un blindaje estructural) con conexiones de proceso de 15 mm de diámetro nominal. Esta columna estará provista de:
 - i) instrumentos de monitorización de la presión, B2-I-01 y 02, de diafragma, para detectar una caída de presión a través de la columna de intercambio iónico, que indicaría un proceso de colmatación;
 - ii) un instrumento de medición de la acumulación de actividad (gamma), B2-I-04, de mano, para monitorizar periódicamente la acumulación de actividad en la columna de intercambio iónico;
 - iii) una válvula de purga, B2-V-02, esférica, de acero inoxidable o plástico y 15 mm de diámetro nominal, para drenar el líquido de la columna de intercambio iónico.
- f) Los materiales de construcción de la columna de intercambio iónico dependerán de la naturaleza y el nivel de la actividad en los desechos acuosos. El plástico no será adecuado cuando sea probable que los radionucleidos absorbidos generen dosis de radiación altas.
- g) Para procesar un total de 5000 L/año, sobre la base de un supuesto conservador de 3 a 5 volúmenes de lecho por hora, será adecuada una columna de entre 20 y 30 litros de material de intercambio iónico capaz de procesar un caudal de unos 100 L/h.
- h) Este módulo puede utilizar ya sea materiales de intercambio iónico mixtos para el uso general, o materiales de intercambio iónico selectivos, para eliminar especies de radionucleidos particulares, como el cesio y el estroncio. Por lo tanto, la selección de la resina de intercambio iónico estará determinada por los radionucleidos de que se trate.
- i) La resina de intercambio iónico podría estar suelta o contenida en un cartucho o recipiente extraíble. Sin embargo, en el segundo caso la disposición final del material de intercambio iónico gastado

puede ser problemática, porque no será posible inmovilizar las perlas de resina mediante el hormigonado. Por lo tanto, se presupone el uso de un material de intercambio iónico suelto.

- j) Tuberías de interconexión, B2-L-03, de 15 mm de diámetro nominal y de acero inoxidable o plástico, entre la columna de intercambio iónico y el filtro.
- k) Un filtro patentado, B2-E-06, con recipiente de acero inoxidable o plástico y elemento filtrante de tipo cartucho de polipropileno hilado y un grado de filtración nominal de 5 μm , que atrape cualquier fragmento de perlas de resina que pueda ser arrastrado durante el funcionamiento normal de la columna de intercambio iónico, provisto de:
 - i) instrumentos de monitorización de la presión, B2-I-02 y 03, para detectar una caída de presión a través del filtro, que indicaría un proceso de colmatación;
 - ii) una válvula de purga, B2-V-03, esférica, de acero inoxidable o plástico y un diámetro nominal de 15 mm, para drenar el líquido del recipiente del filtro.
- l) Un sistema de tuberías de drenaje, B2-L-06 y 07, de 15 mm de diámetro nominal y de acero inoxidable o plástico, para purgar la columna de intercambio iónico y el recipiente del filtro devolviendo los desechos líquidos acuosos al contenedor de alimentación, cuando sea necesario realizar operaciones de mantenimiento.
- m) Un sistema de tuberías de transferencia, B2-L-04, de 15 mm de diámetro nominal y de acero inoxidable o plástico, entre la salida del filtro y la válvula de control de salida, B2-V-04, de diafragma, 15 mm de diámetro nominal y acero inoxidable o plástico.
- n) Una manguera de descarga, B2-L-05, de 15 mm de diámetro nominal y de plástico reforzado flexible, para transferir los desechos líquidos acuosos de la válvula de salida al contenedor de efluentes tratados.
- o) Para recibir los desechos acuosos después de su paso por la columna de intercambio iónico, un contenedor de recepción del efluente tratado, B2-E-02, consistente en un recipiente de polietileno reutilizable de 45 L, doble pared y alta integridad, diseñado para líquidos químicos peligrosos y certificado por las Naciones Unidas. El contenedor tendrá un asidero anular estructural y ergonómico para el izado manual, una boca de vaciado descentrada y características que permitan el apilado seguro.
- p) Las tuberías, las válvulas y la bomba estarán dispuestas de modo que esta última pueda bombear directamente el líquido del contenedor de desechos a través de la columna de intercambio iónico.
- q) Las tuberías deberían estar diseñadas de modo que el módulo sea lo más compacto y simple posible.
- r) Tendrá que ser posible aislar mediante válvulas, lavar a fondo y purgar todas las tuberías, bombas, recipientes y demás equipo.
- s) Las conexiones de proceso entre las tuberías y el equipo serán de bridas.
- t) Un armazón de acero inoxidable o acero dulce revestido de epoxi, que sostendrá todo el equipo:
 - i) El armazón estará provisto de una bandeja de goteo, B2-E-04, con un contenedor de fondo plano de acero inoxidable o plástico para recoger los derrames que puedan producirse. La bandeja de goteo tendrá cabida para los contenedores de alimentación y de recepción, la bomba de trasiego, la columna de intercambio iónico y el filtro, y una capacidad que equivaldrá típicamente al 110 % del volumen total de líquidos presente en los contenedores y en todos los demás equipos y tuberías montados dentro o encima de ella (unos 150 L).
 - ii) El armazón tendrá patas regulables para la nivelación.
- u) Un panel de control eléctrico (no ilustrado en la imagen del modelo) accionado desde el armazón, que reciba el suministro de energía eléctrica y controle el funcionamiento de todo el equipo eléctrico del módulo. El panel de control debería incluir un botón de parada de emergencia, para detener todos los componentes del módulo, y un aislador eléctrico que permita aislar todo el equipo.
- v) Todo el equipo eléctrico del módulo debería tener el grado de protección IP adecuado para permitir el lavado a fondo de la planta y el equipo del módulo (un grado de protección IP54 o superior).

5.3.6. Módulo B2 — Consideraciones relativas a la instalación

- a) Se requerirá un área de almacenamiento para los desechos líquidos filtrados y sin tratar en bombonas de 45 L. A fin de no alentar la acumulación de desechos acuosos, el espacio de almacenamiento de desechos líquidos sin tratar debería tener cabida para una única remesa de contenedores, equivalente a un día de funcionamiento o, por ejemplo, el 20 % del volumen anual, es decir, 1 m³ o una capacidad nominal de 20 bombonas. Este espacio debería tener una contención, para retener los derrames o fugas. El volumen dentro de la contención debería corresponder al 110 % del volumen total almacenado.
- b) Se precisará un laboratorio radioquímico para el muestreo y análisis de los líquidos tratados y sin tratar. Debería analizarse el contenido de radionucleidos y el pH de las muestras.
- c) Se necesitará agua para el lavado a fondo de la planta y el equipo, por ejemplo antes del mantenimiento.
- d) Tendrá que haber contenedores con una capacidad nominal de 200 L para la recolección de las resinas de intercambio iónico gastadas y el agua de enjuague.
- e) Se requerirá una zona dotada de contención para el almacenamiento a corto plazo de los contenedores con las resinas de intercambio iónico gastadas y el agua de enjuague. Puede ser necesario un blindaje localizado.
- f) Para esta opción se precisará una conexión adecuada a la alcantarilla del emplazamiento u otro punto de descarga de líquidos aprobado, con las debidas autorizaciones.

5.3.7. Módulo B2 — Requisitos

- a) Deben existir barreras y/o controles adecuados para gestionar el acceso del personal a la zona de procesamiento por intercambio iónico.
- b) Los operadores deberán llevar equipo de protección personal apropiado, por ejemplo, un mono, calzado protector, gafas de seguridad o máscara y guantes.
- c) Un supervisor de protección radiológica vigilará todas las operaciones del módulo, con inclusión de la recepción y el despacho de los contenedores de desechos, la columna de intercambio iónico y la retirada de la tubería del contenedor de desechos líquidos.
- d) Tras la instalación del módulo y antes de su puesta en funcionamiento con desechos líquidos, los medios de intercambio iónico deberían humedecerse con agua desionizada. Una vez humedecida, la resina de intercambio iónico estará lista para procesar desechos acuosos.
- e) El material de intercambio iónico tenderá a formar bioincrustaciones si se utiliza agua dura para humedecerlo o si hay agua dura en los desechos acuosos que se están procesando. El material de intercambio iónico debería humedecerse con agua desionizada, haciéndola circular por la columna. (Cuando sea posible, deberá eliminarse en el origen toda la dureza del agua de proceso que se vaya a utilizar en la generación de los desechos líquidos. Una forma barata de hacerlo es colocando cartuchos de intercambio iónico locales antes de todos los grifos de agua de proceso).
- f) Se recomienda que todo desecho líquido se someta a un tratamiento previo para eliminar los sólidos en suspensión, que de lo contrario ensuciarán rápidamente la columna de intercambio iónico. Para ello puede utilizarse ya sea el Módulo B4—Filtración de flujo tangencial o el Módulo B5—Filtración.
- g) Un operador podrá tomar con una pipeta una pequeña muestra del desecho líquido, que será analizada localmente para determinar el pH y la actividad. Si el pH es bajo, puede producirse la elución de las especies absorbidas en la columna de intercambio catiónico, es decir su extracción de la columna. Por lo tanto, es importante controlar el pH de los desechos líquidos que se estén procesando.

5.3.8. Módulo B2 — Descripción y funcionamiento del proceso

- a) La bombona de desechos líquidos destinados al procesamiento puede ser levantada y colocada en la bandeja de goteo por dos personas. También pueden utilizarse dispositivos de sujeción para levantar las bombonas con una horquilla elevadora u otro medio de izado mecánico y colocarlas en la bandeja de goteo.
- b) Colocar asimismo una segunda bombona vacía de capacidad igual o mayor para la recolección del efluente tratado.
- c) Bajo supervisión de protección radiológica, introducir la manguera succionadora de alimentación B2-L-01 en el contenedor de desechos de alimentación y asegurarla. De igual modo, introducir el tubo de descarga B2-L-05 en el contenedor de efluentes tratados vacío y asegurarlo. Abrir las válvulas de entrada y de salida B2-V-01 y B2-V-04 y, con la bomba de alimentación B2-E-03, bombear los desechos acuosos a través de la columna de intercambio iónico.
- d) Observar los instrumentos de monitorización de la presión B2-I-01 y B2-I-02, para detectar una caída de presión en la columna de intercambio iónico, y los instrumentos B2-I-02 y B2-I-03, para detectar una caída de presión a través del filtro, lo que indicaría un proceso de colmatación ya sea de la columna de intercambio iónico o del filtro. Continuar hasta que:
 - i) el contenedor de efluentes tratados esté lleno; o
 - ii) el contenedor de desechos de alimentación esté vacío.
- e) Parar la bomba de alimentación B2-E-03, cerrar las válvulas de aislamiento B2-V-01 y B2-V-04 y, cuidadosamente, bajo supervisión de protección radiológica, desconectar y retirar los tubos B2-L-01 y B2-L-05 de los respectivos contenedores.
- f) Tomar una muestra del contenedor de efluentes tratados y medir la actividad para determinar el grado de descontaminación alcanzado.
- g) Si es adecuado, sellar el contenedor de efluentes tratados, trasladarlo a la zona de almacenamiento que corresponda, y colocar uno vacío en su lugar. Asimismo, retirar el contenedor de desechos de alimentación vacío y sustituirlo por uno lleno. El contenedor de alimentación vacío podrá enjuagarse con agua de proceso limpia, vertiendo luego las aguas utilizadas para este enjuague en otro contenedor de desechos de alimentación.
- h) Si los desechos líquidos tratados no están suficientemente descontaminados después de una pasada, pueden procesarse una segunda vez en la columna de intercambio iónico. Sin embargo, se supone que cada contenedor de desechos líquidos estará suficientemente procesado después de una pasada por la columna, lo que minimizará el tiempo de procesamiento de cada contenedor.
- i) Después del procesamiento de cada contenedor de desechos, debería monitorizarse la subida de los niveles de radiactividad en la resina de intercambio iónico. La acumulación de actividad a medida que se procesan los desechos líquidos comienza en la parte superior de la columna, donde se introduce el líquido. La monitorización permitirá controlar que:
 - i) las tasas de dosis en los lugares donde se estén realizando trabajos manuales se mantengan en niveles aceptables;
 - ii) el nivel de actividad de la resina de intercambio iónico no supere el de un desecho radiactivo de actividad baja.
- j) Es probable que el material y la columna de intercambio iónico tengan que sustituirse debido a un aumento de la tasa de dosis antes de que se hayan agotado químicamente:
 - i) Los materiales de intercambio iónico estarán sueltos, entre las placas de distribución de la columna. El material gastado debería extraerse de la columna mediante un lavado y recolectarse en un contenedor adecuado (por ejemplo, una bombona de plástico de 45 L). El agua excedente podrá eliminarse por decantación.
 - ii) El sistema de lavado debería ser capaz también de preparar un nuevo lote de resina de intercambio iónico en agua e introducirlo en la columna por bombeo.

5.3.9. Módulo B2 — Inconvenientes del proceso

- a) Se requiere un tratamiento previo con agua de proceso, por ejemplo, para humedecer el material de intercambio iónico.
- b) El material de intercambio iónico para la extracción selectiva de radionucleidos puede ser caro.
- c) El proceso puede ser menos eficaz en presencia de altos niveles de sales.
- d) Un pH bajo del efluente puede causar la elución de cationes, es decir, extraer las especies absorbidas de la columna.
- e) El proceso crea una corriente de desechos secundaria (el material de intercambio iónico gastado) que debe procesarse.

5.3.10. Módulo B2 — Requisitos de interconexión e integración

Los requisitos de interconexión del módulo de proceso comprenden lo siguiente:

- a) El material de intercambio iónico gastado es un desecho secundario que requiere un tratamiento adicional antes de la disposición final, por ejemplo por solidificación en el Módulo B6.

La integración con otros módulos de proceso comprende:

- a) el uso después del Módulo B4—Filtración de flujo tangencial para procesar el filtrado eliminando la actividad soluble del efluente de desecho;
- b) el uso después del Módulo B5—Filtración para eliminar la actividad soluble del efluente de desecho.

5.4. MÓDULO B3—ÓSMOSIS INVERSA

5.4.1. Módulo B3 — Consideraciones generales

La ósmosis inversa tiene por objeto eliminar de los desechos radiactivos acuosos una parte importante (más del 99 % sobre la base de muestras puntuales, pero típicamente entre el 90 % y el 95 % con el reciclado del concentrado retenido) de todos los componentes insolubles y solubles, incluidos los radionucleidos contaminantes, generando un concentrado retenido (que contendrá la mayor parte de



Fig. 5.14. Módulo B3—Ósmosis inversa de sobremesa.

los componentes insolubles y solubles) y un permeado o filtrado (el volumen restante de los desechos acuosos).

Los efluentes en bruto deben someterse a una filtración previa en el Módulo B5–Filtración, antes del tratamiento con un filtro de ósmosis inversa en espiral. El filtrado de este tratamiento puede ser apto para la descarga inmediata, o requerir un ‘pulimento’ adicional, por ejemplo, por intercambio iónico (véase el Módulo B2).

La ósmosis inversa es una opción cuando hay agentes tensioactivos, agentes complexantes y muchos tipos de radionucleidos en la corriente de desechos, porque en estos casos el tratamiento químico y el intercambio iónico serán ineficaces. Si, pese a un tratamiento químico repetido, el líquido tratado no cumple con los límites de descarga autorizados, puede tomarse en consideración la ósmosis inversa.

El módulo de ósmosis inversa extraerá los desechos acuosos de la bombona por bombeo y los hará circular por el filtro de ósmosis inversa en espiral. Los desechos concentrados (es decir, la parte retenida) se enviarán de vuelta a la misma bombona, y el agua tratada que se ha desalado (es decir, la parte filtrada) se dirigirá hacia una segunda bombona.

Los principales componentes del módulo son el filtro de ósmosis inversa en espiral, una bomba de alimentación y una bomba de alta presión. La primera bomba extrae el líquido de una bombona para alimentar la bomba de alta presión, que lo impulsa a través del filtro en espiral. Una válvula de aguja de contrapresión regulable manualmente, situada en el punto de salida, asegura que dentro del filtro de ósmosis inversa en espiral el líquido esté a la presión requerida (típicamente entre 30 bar y 40 bar). El filtrado que atraviesa la membrana de ósmosis inversa y sale de la carcasa del filtro de ósmosis inversa en espiral se recoge en otra bombona. El concentrado retenido vuelve a la bombona de alimentación de desechos, desde donde es bombeado nuevamente hacia el filtro de ósmosis inversa en espiral.

El filtro de ósmosis inversa en espiral y la bomba están situados en una bandeja de goteo que ofrece contención en caso de fugas o derrames. Las bombonas de desechos líquidos de alimentación y las destinadas al líquido filtrado deben levantarse y colocarse en esta bandeja de goteo para el procesamiento.

Como ejemplo de un módulo de ósmosis inversa, la figura 5.14 muestra una unidad de sobremesa en proceso de prueba. En esta unidad se utilizan un recipiente de dos cámaras, en lugar de las dos bombonas, y dos filtros de ósmosis inversa, en lugar de uno.

5.4.2. Módulo B3 — Base de diseño

La base de diseño resumida en el cuadro 5.7 indica los principales parámetros y supuestos utilizados para determinar el diseño de este módulo de procesamiento.

CUADRO 5.7. BASE DE DISEÑO DEL MÓDULO B3–ÓSMOSIS INVERSA

Características de los desechos iniciales	
Volumen líquido total	Típicamente de 0,5 m ³ a 10 m ³ por año; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 5 m ³ por año.
Llegada	Periódicamente, en lotes de alrededor de 50 L.
Tasa máxima de procesamiento	Hasta 100 L/h.
Contenido de actividad de los desechos iniciales	Niveles de actividad bajos, un único o varios radionucleidos.
Forma física	Líquidos, principalmente acuosos. Se presupone que no contienen aceites ni otros líquidos inmiscibles.

CUADRO 5.7. BASE DE DISEÑO DEL MÓDULO B3—ÓSMOSIS INVERSA (cont.)

Características de los desechos iniciales	
Contenido de sólidos	Se prevé la presencia de pequeñas cantidades de partículas finas (tamaño inferior a 0,1 µm).
Contenido de sustancias químicas	Ningún agente oxidante, contenido de sales inferior a 25 g/L.
Características del efluente tratado	
Contenido de actividad	Se espera un factor de descontaminación de hasta 100. La actividad del efluente tratado dependerá de la actividad inicial.
pH	Se presupone un pH de entre 4 y 5.
Otros componentes	Ningún sólido y un contenido de sales inferior a 1 g/L en la corriente de desechos tratada.
Disponibilidad de servicios	
Servicios	Los diseños esquemáticos deberían indicar las opciones de conexión a los servicios existentes o la necesidad de servicios especiales.
Agua	Necesaria.
Electricidad	Necesaria.
Calefacción del edificio	Necesaria, si la temperatura desciende por debajo de 5 °C.
Calefacción, ventilación y aire acondicionado	No necesarios.
Reactivos químicos	Necesarios.
Drenaje	No necesario. Cualquier fuga o derrame que se produzca quedará retenido en una bandeja de goteo y será devuelto a un contenedor de desechos con ayuda de una pequeña bomba.

5.4.3. Módulo B3 — Diagrama de flujo del proceso

La figura 5.15 ilustra la planta y el equipo en un diagrama de flujo del proceso.

5.4.4. Módulo B3 — Lista del equipo

El diagrama de flujo indica que se requerirá el equipo enumerado en el cuadro 5.8.

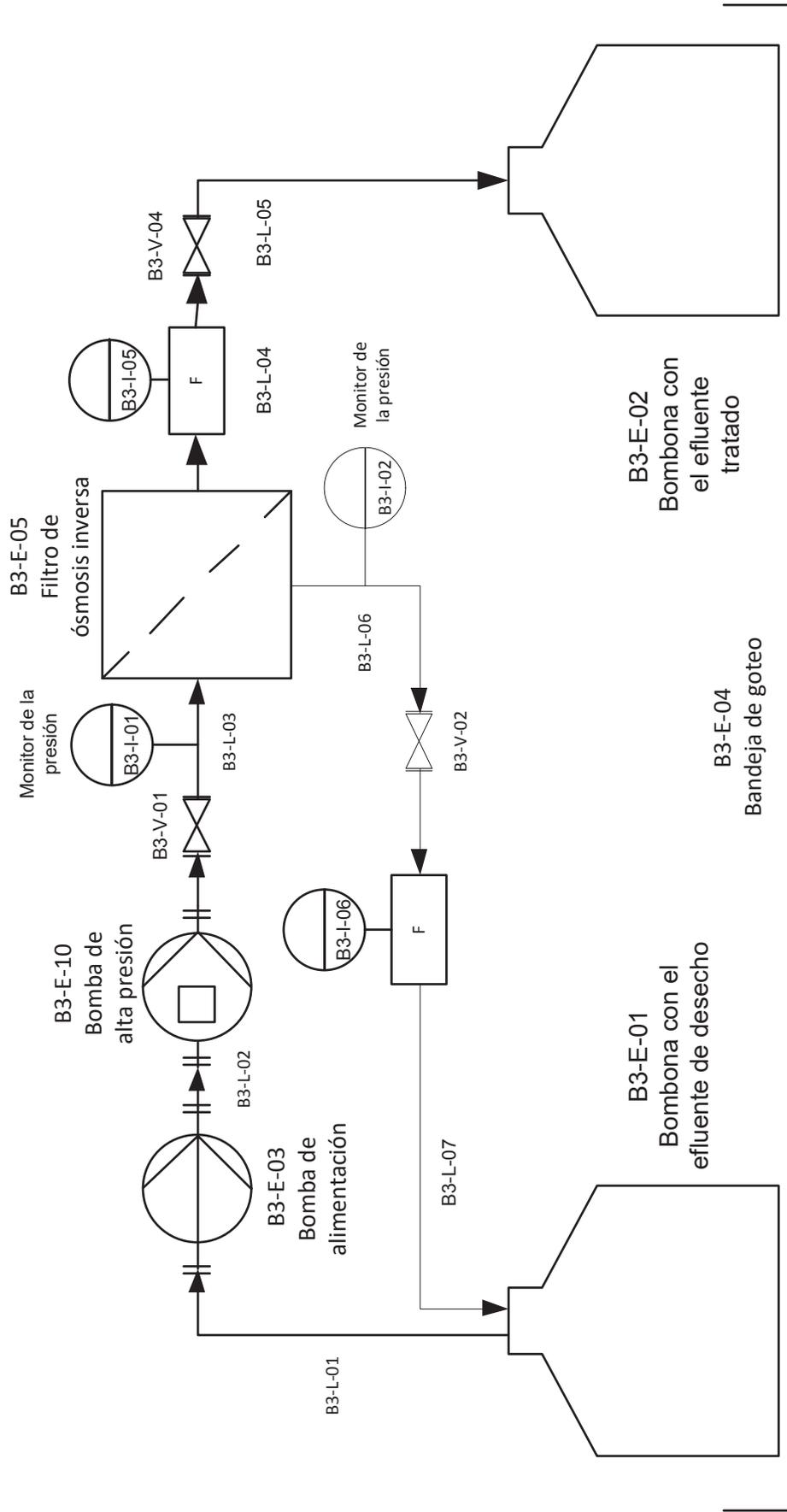


Fig. 5.15. Diagrama de flujo del proceso del Módulo B3—Ósmosis inversa.

CUADRO 5.8. LISTA DEL EQUIPO PARA EL MÓDULO B3-ÓSMOSIS INVERSA

Equipo				
Identificador	Descripción	Material	Tipo	Caudal
B3-E-01	Contenedor de desechos acuosos	Plástico	Bombona de 45 L	
B3-E-02	Contenedor de efluentes tratados	Plástico	Bombona de 45 L	
B3-E-03	Bomba de alimentación	Plástico o acero inoxidable	Autocebante	1000 L/h
B3-E-04	Bandeja de goteo	Plástico o acero inoxidable		
B3-E-05	Filtro de ósmosis inversa	Carcasa de plástico o acero inoxidable	De membrana	1000 L/h
B3-E-10	Bomba de alta presión	Acero inoxidable	De pistón	1000 L/h
Tuberías				
Identificador	Descripción	Dimensión de la tubería	Presión de diseño	Temperatura de diseño
B3-L-01	Tubería succionadora de la bomba de alimentación	15 mm	2 bar	Ambiente
B3-L-02	Tubería de descarga de la bomba de alimentación	15 mm	5 bar	Ambiente
B3-L-03	Tubería de descarga de la bomba de alta presión	15 mm	40 bar	Ambiente
B3-L-04	Tubería de salida del filtrado	15 mm	2 bar	Ambiente
B3-L-05	Tubería de descarga del efluente	15 mm	2 bar	Ambiente
B3-L-06	Tubería de salida del concentrado retenido del filtro	15 mm	40 bar	Ambiente
B3-L-07	Tubería de retorno del concentrado retenido	15 mm	2 bar	Ambiente
Válvulas				
Identificador	Descripción	Dimensión de la tubería	Tipo	Modelo
B3-V-01	Válvula de control de la alimentación del filtro	15 mm	Esférica (bridada)	
B3-V-02	Válvula de control del concentrado retenido	10 mm	De aguja (bridada)	

CUADRO 5.8. LISTA DEL EQUIPO PARA EL MÓDULO B3-ÓSMOSIS INVERSA (cont.)

Válvulas				
Identificador	Descripción	Dimensión de la tubería	Tipo	Modelo
B3-V-03	No utilizada	—	—	
B3-V-04	Válvula de salida del filtrado	15 mm	Esférica (bridada)	
Instrumentos				
Identificador	Descripción		Tipo	Intervalo
B3-I-01	Monitorización de la presión de entrada en el filtro		Medidor	0-40 bar
B3-I-02	Monitorización de la presión de salida del filtro		Medidor	0-40 bar
B3-I-03	No utilizado			
B3-I-04	No utilizado			
B3-I-05	Medidor de caudal del filtrado		De área variable	
B3-I-06	Medidor de caudal del concentrado retenido		De área variable	

Nota: Las tuberías y válvulas deberían ser de acero inoxidable.

5.4.5. Módulo B3 — Descripción del equipo

En la figura 5.16 se presenta un modelo simple del módulo de ósmosis inversa.

El equipo del módulo comprende lo siguiente:

- a) Un contenedor de alimentación de desechos acuosos, B3-E-01, consistente en un recipiente de polietileno reutilizable de 45 L, doble pared y alta integridad, diseñado para líquidos químicos peligrosos y certificado por las Naciones Unidas. El contenedor tendrá un asidero anular estructural y ergonómico para el izado manual, una boca de vaciado descentrada y características que permitan el apilado seguro. Su geometría deberá ser lo más lisa posible, para que pueda limpiarse fácilmente.
- b) Una manguera succionadora de alimentación, B3-L-01, de 25 mm de diámetro nominal y de plástico reforzado flexible, para transferir los desechos líquidos acuosos del contenedor de alimentación a la bomba de alimentación.
- c) Una bomba de alimentación autocebante, B3-E-03, con piezas húmedas de plástico y/o acero inoxidable, típicamente de un caudal nominal de 1000 L/h, para bombear los desechos líquidos acuosos del contenedor de alimentación a una segunda bomba de alta presión, B3-E-10.
- d) Un tubo de interconexión, B3-L-02, de acero inoxidable, con una manguera flexible de plástico reforzado o caucho de 25 mm de diámetro nominal.

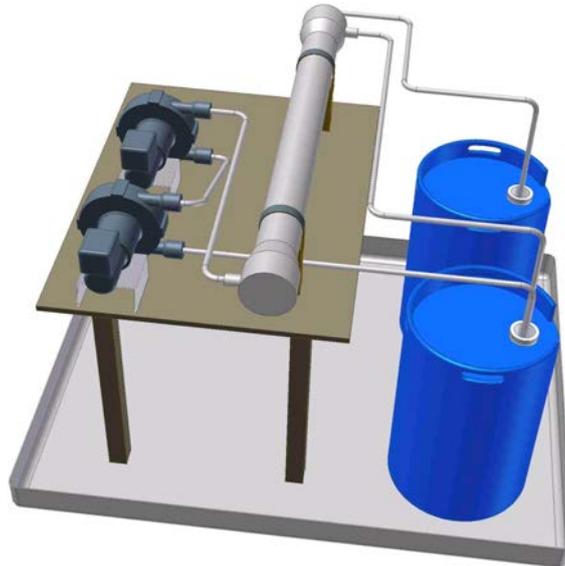


Fig. 5.16. Modelo del Módulo B3-Ósmosis inversa.

- e) Una bomba de alta presión, B3-E-10, es decir, una bomba centrífuga de diafragma o pistón, de desplazamiento positivo en etapas múltiples, o equivalente, con piezas húmedas de acero inoxidable, típicamente de un caudal nominal de 1000 L/h a presiones de hasta 40 bar, para impulsar los desechos líquidos acuosos a través del filtro de ósmosis inversa B3-E-05.
- f) Un sistema de tuberías de trasiego de la bomba, B3-L-03, de 15 mm de diámetro nominal y de acero inoxidable, con una manguera de alta presión de caucho con acero inoxidable trenzado o PTFE, para transferir los desechos líquidos acuosos de la bomba de alta presión al filtro de ósmosis inversa, provisto de una válvula de cierre, B3-V-01, de 15 mm de diámetro nominal, esférica y de acero inoxidable, para detener el flujo de desechos líquidos a través del filtro de ósmosis inversa cuando se apaguen las bombas.
- g) Un filtro de ósmosis inversa patentado, B3-E-05, en una carcasa de acero inoxidable o plástico. A este respecto, se aplican las siguientes observaciones:
 - i) Para el procesamiento de un total de 5000 L/año, será adecuado un módulo de ósmosis inversa capaz de procesar un caudal de hasta 100 L/h aproximadamente.
 - ii) Este módulo de ósmosis inversa estará dotado de instrumentos de monitorización de la presión, B3-I-01 y B3-I-02, para vigilar la presión de trabajo y detectar una caída de presión a través del filtro, que indicaría un proceso de colmatación de la membrana.
 - iii) Se recomienda el uso de un elemento de membrana de ósmosis inversa de tipo espiral. Las moléculas de agua atravesarán la membrana impulsadas por la diferencia de presión, dejando las partículas finas y las moléculas y iones pequeños y más grandes en el concentrado retenido. Esta parte se reciclará, hasta alcanzar el grado de concentración deseado (controlado por los caudales dentro del proceso). El contenido de sólidos disueltos del concentrado retenido al final del procesamiento suele ser de entre 40 y 50 g/L.
 - iv) La propia membrana de ósmosis inversa puede ser de diferentes materiales poliméricos, según las características de separación requeridas.
 - v) La selección de la membrana de ósmosis inversa dependerá de la naturaleza y el contenido de sales de los desechos acuosos, y solo podrá determinarse mediante ensayos. Una membrana de nanofiltración puede ser una opción mejor que una de ósmosis inversa para algunas aplicaciones.

- h) Un sistema de tuberías de trasiego del filtrado, B3-L-04, de 15 mm de diámetro nominal y de acero inoxidable o plástico, entre la salida de este líquido del filtro de ósmosis inversa y la válvula de control de la salida del filtrado, provisto de:
 - i) Una válvula de control de la salida del filtrado, B3-V-04, esférica, de 15 mm de diámetro nominal y de acero inoxidable o plástico. Esta válvula deberá permanecer abierta mientras esté funcionando la planta. Solo podrá cerrarse cuando se apaguen las bombas.
 - ii) Un medidor de caudal del filtrado, B3-I-05, de área variable, de 15 mm de diámetro nominal y de acero inoxidable y/o plástico, para un intervalo de 0 a 100 L/h.
 - iii) Una manguera de descarga del filtrado, B3-L-05, de 15 mm de diámetro nominal, de plástico reforzado flexible, para transferir los desechos líquidos acuosos de la válvula de salida al contenedor de efluentes tratados B3-E-02.
- i) Un sistema de tuberías de salida del concentrado retenido, B3-L-06, de acero inoxidable y de 15 mm de diámetro nominal, para transferir los desechos líquidos acuosos del filtro de ósmosis inversa al contenedor de alimentación de desechos, provisto de:
 - i) una válvula de control, B3-V-02, de 10 mm de diámetro nominal, de aguja y de acero inoxidable, para regular el caudal y la presión de los desechos líquidos que atraviesan el filtro de ósmosis inversa;
 - ii) un medidor de caudal del concentrado retenido, B3-I-06, de área variable, de 10 mm de diámetro nominal y de acero inoxidable y/o plástico.
- j) Un sistema de tuberías de retorno del concentrado retenido, B3-L-07, de 15 mm de diámetro nominal y de plástico reforzado flexible, para transferir los desechos líquidos acuosos de la válvula de salida del concentrado retenido B3-V-02 al contenedor de alimentación B3-E-01.
- k) Para recibir los desechos acuosos que hayan atravesado la membrana de ósmosis inversa, un contenedor de recepción del efluente tratado, B3-E-02, consistente en un recipiente de polietileno reutilizable de 45 L, doble pared y alta integridad, diseñado para líquidos químicos peligrosos y certificado por las Naciones Unidas. El contenedor tendrá un asidero anular estructural y ergonómico para el izado manual, una boca de vaciado descentrada y características que permitan el apilado seguro. Su geometría deberá ser lo más lisa posible, para que pueda limpiarse fácilmente.
- l) Un armazón de acero inoxidable que sostendrá todo el equipo mencionado:
 - i) El armazón estará provisto de una bandeja de goteo, B3-E-04, con un contenedor de fondo plano de acero inoxidable o plástico para recoger los derrames que puedan producirse. La bandeja de goteo tendrá cabida para los contenedores de alimentación y de recepción, ambas bombas y el filtro de ósmosis inversa, y una capacidad que equivaldrá típicamente al 110 % del volumen total de líquidos presente en los contenedores y en todos los demás equipos y tuberías montados dentro o encima de ella (unos 150 L).
 - ii) El armazón tendrá patas regulables para la nivelación.
- m) Un contenedor de desechos para la descarga periódica del concentrado retenido (posiblemente con algún tipo de blindaje, según los niveles de actividad de la corriente de desechos) consistente en un recipiente de polietileno reutilizable de 45 L, doble pared y alta integridad, diseñado para líquidos químicos peligrosos y certificado por las Naciones Unidas. El contenedor tendrá un asidero anular estructural y ergonómico para el izado manual, una boca de vaciado descentrada y características que permitan el apilado seguro. Su geometría debería ser lo más lisa posible, para que pueda limpiarse fácilmente.
- n) Un panel de control eléctrico (no ilustrado en la imagen del modelo) accionado desde el armazón, que reciba el suministro de energía eléctrica y controle el funcionamiento de todo el equipo eléctrico del módulo. El panel de control debería incluir un botón de parada de emergencia, para detener todos los componentes del módulo, y un aislador eléctrico que permita aislar todo el equipo.
- o) Todo el equipo eléctrico del módulo debería tener el grado de protección IP adecuado para permitir el lavado a fondo de la planta y el equipo del módulo (un grado de protección IP54 o superior). En particular, cabe señalar lo siguiente:

- i) Para transferir los desechos acuosos al filtro de ósmosis inversa se emplean bombas con medidores de caudal. Esto permite suministrar un caudal controlado e ininterrumpido, lo que es importante para una separación eficaz en la membrana.
- ii) Este módulo requiere un suministro de agua de enjuague para el lavado a fondo de la planta y para la preparación de soluciones de limpieza con los productos químicos correspondientes.

5.4.6. Módulo B3 — Consideraciones relativas a la instalación

- a) Se requerirá un área para almacenar los desechos acuosos tratados y sin tratar en bombonas de 45 L. A fin de no alentar la acumulación de desechos acuosos, el espacio de almacenamiento de desechos líquidos sin tratar debería tener cabida para una única remesa de contenedores, equivalente a un día de funcionamiento o, por ejemplo, el 20 % del volumen anual, es decir, 1 m³ o una capacidad nominal de 20 bombonas. Este espacio debería tener una contención, para retener los derrames o fugas. El volumen dentro de la contención debería corresponder al 110 % del volumen total almacenado.
- b) Se necesitará un laboratorio radioquímico para el muestreo y análisis de los líquidos tratados y sin tratar. Debería analizarse el contenido de radionucleidos y el pH de las muestras.
- c) Se requerirán líquidos concentrados de enjuague para el lavado a fondo de la planta y el equipo, por ejemplo antes del mantenimiento.
- d) Se requerirá una zona dotada de contención para el almacenamiento a corto plazo de los contenedores de efluentes. Puede ser necesario un blindaje localizado.
- e) Para esta opción se precisará una conexión adecuada a la alcantarilla del emplazamiento u otro punto de descarga de líquidos aprobado, con las debidas autorizaciones.

5.4.7. Módulo B3 — Requisitos

- a) Las necesidades de operadores o técnicos son las siguientes:
 - i) un operador encargado del funcionamiento del equipo, que ocasionalmente cumpla también tareas de monitorización y muestreo;
 - ii) un químico o técnico de laboratorio que realice el muestreo y análisis de los desechos acuosos tratados y sin tratar;
 - iii) un supervisor de protección radiológica que vigile todas las operaciones, con inclusión de la recepción y el despacho de los contenedores de desechos, la retirada de las tuberías de los contenedores de desechos líquidos y la monitorización de los desechos acuosos concentrados acumulados, y que ocasionalmente preste asistencia al operador en las operaciones de izado.
- b) El elemento de la membrana de ósmosis inversa tenderá a formar bioincrustaciones si se utiliza agua dura para enjuagarlo o si hay agua dura en los desechos acuosos que se están procesando. Para humedecer la membrana debería utilizarse agua desionizada, haciéndola circular por el elemento.
- c) Además, cuando sea posible, deberá eliminarse en el origen toda la dureza del agua de proceso que se vaya a utilizar en la generación de los desechos acuosos. Una forma barata de hacerlo es colocando cartuchos de intercambio iónico locales antes de todos los grifos de agua de proceso.
- d) El proceso de ósmosis inversa solo es adecuado para la extracción de los sólidos disueltos. El elemento de la membrana de ósmosis inversa de tipo espiral no es adecuado para tratar sólidos gruesos, que podrían obturar su extremo final y dañar la membrana. Para las cantidades grandes de sólidos, es aconsejable aplicar un tratamiento químico y la sedimentación por gravedad (en el Módulo B1) o la filtración de cartucho (en el Módulo B5). A ello podrá seguir una filtración de flujo tangencial (en el Módulo B4), si es necesario. Si se requiere una descontaminación adicional a fin de alcanzar los niveles autorizados para la descarga, podrá optarse por la ósmosis inversa (Módulo B3) como paso de pulimento tras la sedimentación por gravedad (Módulo B1), la filtración de cartucho (Módulo B5) y la filtración de flujo tangencial (Módulo B4).

- e) Una vez humedecido, el filtro de ósmosis inversa:
 - i) estará listo para procesar desechos acuosos;
 - ii) deberá mantenerse húmedo en todo momento.
- f) Antes de la llegada de los desechos de ese tipo:
 - i) tendrá que haber barreras y/o controles adecuados para gestionar el acceso del personal a la zona de procesamiento por ósmosis inversa;
 - ii) el operador o los operadores deberán ponerse equipo de protección personal adecuado, por ejemplo, un mono, calzado protector, gafas de seguridad o máscara y guantes.
- g) Podrá tomarse una pequeña muestra de los desechos líquidos para hacer mediciones locales del pH y la actividad.

5.4.8. Módulo B3 — Descripción y funcionamiento del proceso

- a) La bombona de desechos líquidos destinados al procesamiento puede ser levantada y colocada en la bandeja de goteo por dos personas. También pueden utilizarse dispositivos de sujeción para levantar las bombonas con una horquilla elevadora u otro medio de izado mecánico y colocarlas en la bandeja de goteo. Se requerirá una segunda bombona vacía de capacidad igual o mayor para la recolección del efluente tratado.
- b) Bajo supervisión de protección radiológica, introducir la manguera succionadora de alimentación B3-L-01 en el contenedor de desechos de alimentación B3-E-01 y asegurarla. Asimismo, introducir el tubo de retorno del concentrado retenido B3-L-07 en el contenedor de desechos de alimentación y asegurarlo. Introducir el tubo de descarga B3-L-05 en el contenedor de efluentes tratados vacío y asegurarlo. Abrir las válvulas de entrada y de salida B3-V-01, B3-V-02 y B3-V-04. Utilizando la bomba de alimentación B3-E-03 y la bomba de alta presión B3-E-10, hacer pasar los desechos acuosos por el elemento de la membrana de ósmosis inversa. Con ayuda de la válvula de salida del concentrado retenido B3-V-02, aumentar gradualmente la presión sobre el filtro de ósmosis inversa, siguiendo las instrucciones del fabricante de la membrana.
- c) Dentro del filtro de ósmosis inversa, el flujo se separa en dos corrientes:
 - i) la parte que atraviesa la membrana, pobre en los sólidos y sales que quedaron retenidos, se descarga en el contenedor de efluentes tratados;
 - ii) la parte retenida, enriquecida con las sales y los sólidos que no atravesaron la membrana, vuelve al contenedor de alimentación de desechos acuosos.
- d) El caudal del filtrado disminuirá a medida que aumente la concentración de la parte retenida al repetirse su reciclado, por lo que es importante monitorizar los caudales para controlar el proceso. Obsérvense los instrumentos de monitorización de la presión B3-I-01 y 02, a fin de detectar las caídas de presión en la carcasa del filtro, que indicarían un proceso de colmatación. Continuar hasta que:
 - i) el contenedor de efluentes tratados esté lleno; o
 - ii) se haya alcanzado el grado de concentración requerido en el contenedor de desechos de alimentación; o
 - iii) el caudal del filtrado sea inferior al mínimo recomendado por el proveedor de la membrana.
- e) Parar la bomba de alimentación B3-E-10, seguida de la B3-E-03, cerrar las válvulas de aislamiento B3-V-01, B3-V-02 y B3-V-04 y, cuidadosamente, bajo supervisión de protección radiológica, retirar los tubos B3-L-01, B3-L-05 y B3-L-07 de los respectivos contenedores y dejarlos en la bandeja de goteo.
- f) Tomar una muestra del contenedor de efluentes tratados y medir la actividad para determinar el grado de descontaminación alcanzado. Tomar una muestra del contenedor del efluente de alimentación (que ahora contendrá el concentrado retenido) y medir la actividad para determinar el grado de concentración alcanzado.

- g) Si los valores medidos son adecuados, sellar el contenedor de efluentes tratados, trasladarlo a la zona de almacenamiento que corresponda, y colocar uno vacío en su lugar. Asimismo, retirar el contenedor de desechos de alimentación y sustituirlo por uno lleno. Los desechos concentrados del contenedor de alimentación se pueden transferir a otra vasija de almacenamiento de desechos concentrados (que podría requerir blindaje), después de lo cual ese contenedor se podrá enjuagar con agua de proceso limpia, vaciando el agua del enjuague en otro contenedor de desechos de alimentación.
- h) Se supone que cada contenedor de desechos líquidos estará suficientemente procesado después de una pasada por el filtro de ósmosis inversa, lo que minimizará el tiempo de procesamiento de cada contenedor. Sin embargo, si los desechos líquidos tratados no están suficientemente descontaminados después de una pasada, podrán filtrarse una segunda vez repitiendo la operación.

5.4.9. Módulo B3 — Consideraciones operacionales adicionales

- a) Para evitar la acumulación de lodos en los tubos y el equipo, se requerirá una limpieza periódica de todo el sistema. Es preciso lavarlo a fondo con agua desionizada o una solución reactiva adecuada y emparar la membrana con soluciones químicas para mantener un rendimiento óptimo, ya que después de muchos usos el filtro de ósmosis inversa puede acumular incrustaciones. Cuando esto ocurre, se observan bajas tasas de permeación, acompañadas de altas presiones de trabajo durante el tratamiento del efluente acuoso. El lavado genera un desecho acuoso secundario, cuyo volumen debería mantenerse en el mínimo posible (por ejemplo, mediante su reutilización).
- b) Una vez humedecido, el filtro de ósmosis inversa debe mantenerse húmedo en todo momento. Si no se utiliza por períodos prolongados, puede ser invadido por microorganismos. Para evitarlo, se recomienda introducir en el filtro una solución biocida suave y dejarla en él durante todas las paradas que excedan de un día.
- c) También se requiere una vía de disposición final de los productos químicos de limpieza contaminados y gastados, que puede ser, por ejemplo, el Módulo B1–Tratamiento químico o el Módulo B6–Solidificación.
- d) Los elementos de membrana de ósmosis inversa deberán sustituirse durante la vida útil de la planta (típicamente al cabo de un año), pero la frecuencia dependerá del uso, el volumen de desechos tratados, la presencia de sólidos abrasivos y la frecuencia de las limpiezas.

5.4.10. Módulo B3 — Inconvenientes del proceso

Los inconvenientes del proceso de ósmosis inversa comprenden lo siguiente:

- a) Es fácil que se produzcan bioincrustaciones.
- b) Los agentes tensioactivos (catiónicos) y algunos agentes complexantes pueden ensuciar irreversiblemente la membrana.
- c) El proceso no elimina eficazmente los sólidos en suspensión.
- d) Se precisa una limpieza periódica para restablecer la permeabilidad.
- e) La dosificación química para la preparación de las soluciones de limpieza debe efectuarse manualmente.
- f) Una vez especificado el material de la membrana, la unidad solo funcionará de manera eficaz con desechos radiactivos líquidos de ciertas composiciones químicas.
- g) El muestreo debe efectuarse manualmente.
- h) Las bombas especiales de alta presión son caras y complejas y requieren un mantenimiento especializado.
- i) El caudal del filtrado disminuirá a medida que aumente la concentración de la parte retenida, por lo que es importante monitorizar continuamente el caudal para controlar el proceso.

- j) Se crean corrientes de desechos secundarias (el concentrado retenido, la solución de limpieza y los filtros de ósmosis inversa gastados) que es necesario procesar.
- l) Se requiere un espacio adicional donde preparar las soluciones químicas para la limpieza del módulo.

5.4.11. Módulo B3 — Requisitos de interconexión e integración

Los requisitos de interconexión del módulo de proceso comprenden lo siguiente:

- a) El concentrado retenido requiere un procesamiento adicional (véanse el Módulo B6–Solidificación o el Módulo B2–Intercambio iónico).
- b) También se precisará una vía de disposición final para los productos químicos de limpieza contaminados y gastados, que podría ser, por ejemplo, el Módulo B1–Tratamiento químico o el Módulo B6–Solidificación.
- c) Además, se necesitará una vía de disposición final para los elementos gastados del filtro de ósmosis inversa, por ejemplo, el Módulo B6–Solidificación.

La integración con otros módulos de proceso comprende:

- el uso después del Módulo B1–Tratamiento químico y el Módulo B5–Filtración, para eliminar los sólidos, y del Módulo B4–Filtración de flujo tangencial, para procesar el filtrado o efluente de este módulo.

5.5. MÓDULO B4–FILTRACIÓN DE FLUJO TANGENCIAL

5.5.1. Módulo B4 — Consideraciones generales

La filtración de flujo tangencial (ya sea microfiltración o ultrafiltración) tiene por objeto eliminar una proporción importante de los radionucleidos contaminantes insolubles del volumen inicial de desechos líquidos acuosos, generando un concentrado retenido que contendrá la materia particulada y un volumen restante de desechos acuosos que puede ser apto para la descarga inmediata o requerir un ‘pulimento’ adicional, por ejemplo por intercambio iónico (véase el Módulo B2).

El módulo de filtración de flujo tangencial extraerá los desechos acuosos de la bombona por bombeo y los hará pasar repetidas veces por un filtro de flujo tangencial. El concentrado (es decir, la parte retenida) será devuelto a la misma bombona, mientras que el permeado (es decir, la parte filtrada) se recogerá en una segunda bombona.

Los principales componentes del módulo son la unidad del filtro de flujo tangencial y la bomba. Esta última extrae el líquido de una bombona y lo impulsa a través del filtro de flujo tangencial. Una válvula de contrapresión regulable manualmente, situada en el punto de salida, asegura que dentro del filtro el líquido esté a la presión requerida (típicamente, de entre 2 y 4 bares). El filtrado atraviesa la membrana de flujo tangencial y a la salida de la carcasa del filtro es recogido en otra bombona. El concentrado retenido vuelve a la bombona de alimentación de desechos, desde donde es bombeado nuevamente hacia el filtro.

La unidad de flujo tangencial y la bomba están situadas en una bandeja de goteo que ofrece contención en caso de fuga o derrame. Las bombonas de alimentación de desechos acuosos y de recolección del filtrado deben levantarse y colocarse en esta bandeja de goteo para el procesamiento.

La figura 5.17 muestra un módulo de filtración de flujo tangencial similar en un ensayo en obra. Este módulo no se ha colocado aún dentro de una bandeja de goteo. El filtro de flujo tangencial está montado directamente en la descarga de la bomba.

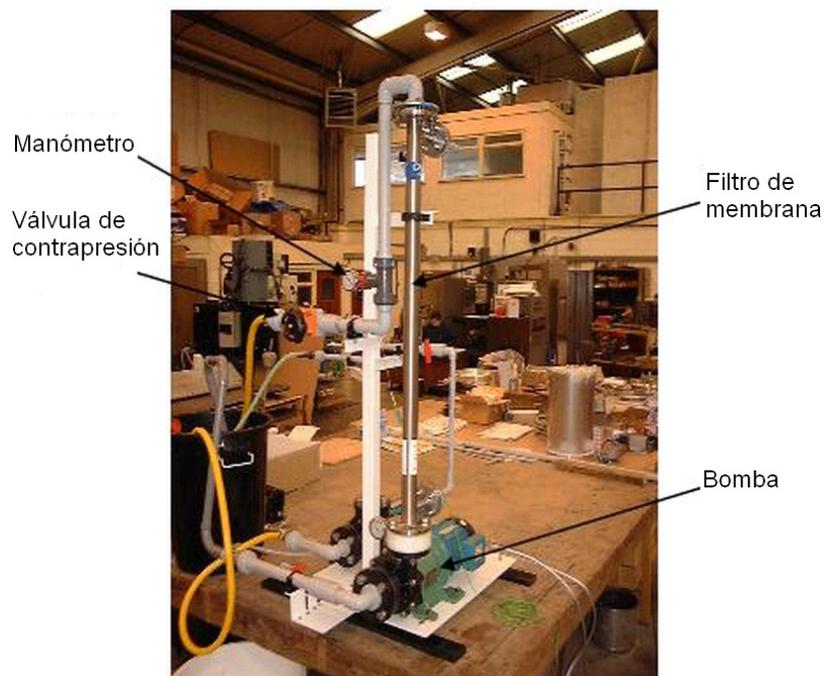


Fig. 5.17. Ejemplo de un Módulo B4–Filtración de flujo tangencial.

5.5.2. Módulo B4 — Base de diseño

La base de diseño resumida en el cuadro 5.9 indica los principales parámetros y supuestos utilizados para determinar el diseño de este módulo de procesamiento.

CUADRO 5.9. BASE DE DISEÑO DEL MÓDULO B4–FILTRACIÓN DE FLUJO TANGENCIAL

Características de los desechos iniciales

Volumen líquido total	Típicamente de 0,5 m ³ a 10 m ³ por año; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 5 m ³ por año.
Llegada	Periódicamente, en lotes de alrededor de 50 L.
Tasa máxima de procesamiento	10 a 20 L/h.
Contenido de actividad de los desechos iniciales	Niveles de actividad bajos, un único o varios radionucleidos.
Forma física	Líquidos, principalmente acuosos. Se presupone que no contienen aceites ni otros líquidos inmiscibles.
Contenido de sólidos	Probablemente pequeñas cantidades de partículas finas.
Contenido de sustancias químicas	Sin contenidos significativos de sustancias químicas, salvo, posiblemente, pequeñas cantidades de agentes complexantes.

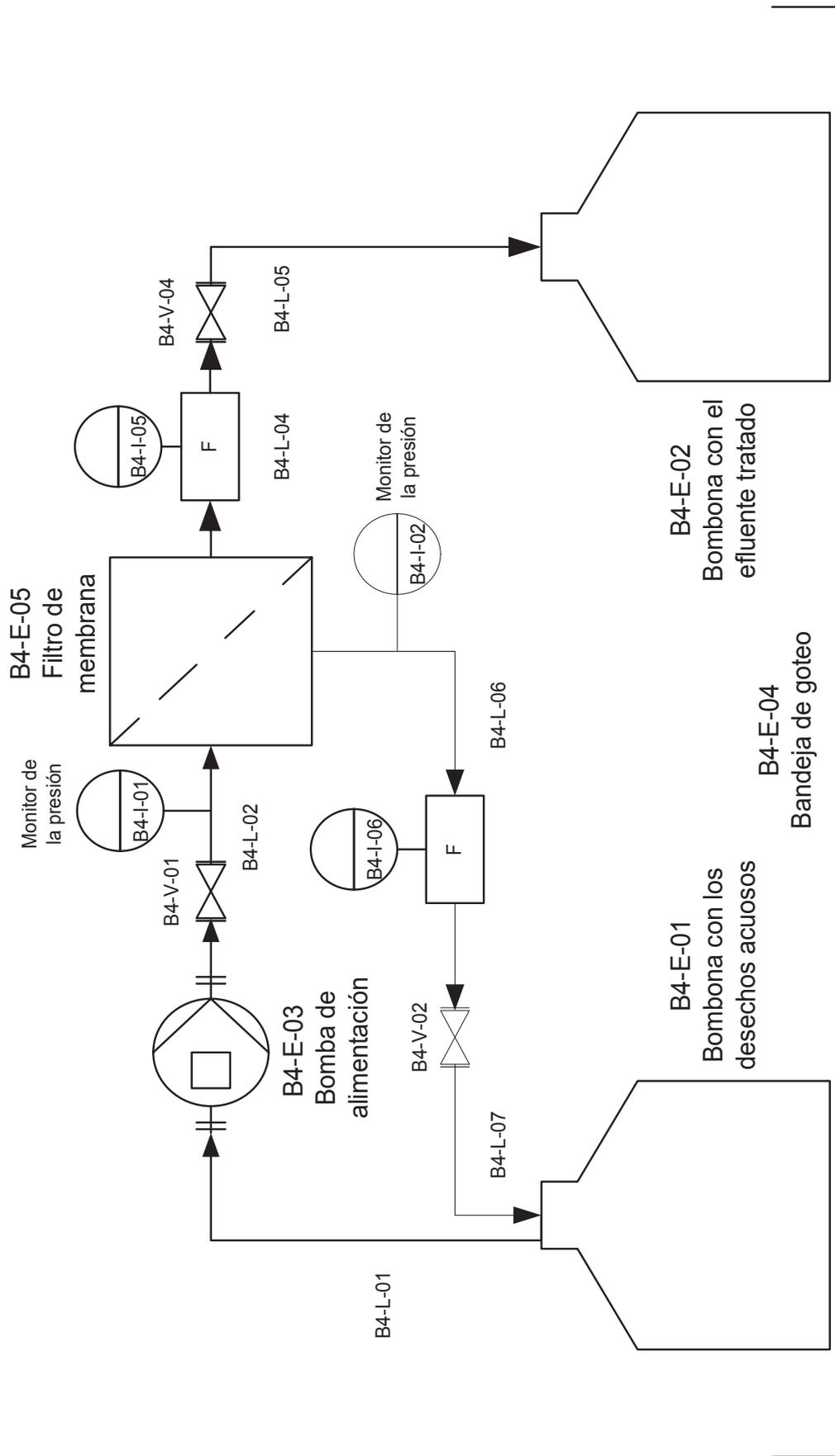


Fig. 5.18. Diagrama de flujo del proceso del Módulo B4-Filtración de flujo tangencial.

CUADRO 5.9. BASE DE DISEÑO DEL MÓDULO B4—FILTRACIÓN DE FLUJO TANGENCIAL (cont.)

Características del efluente tratado	
Contenido de actividad	El factor de descontaminación previsto es de entre 10 y 100. La actividad del efluente tratado dependerá de la actividad inicial.
pH	Se presupone un pH de 6 a 9.
Otros componentes	Ningún sólido en la corriente de desechos tratada.
Disponibilidad de servicios	
Servicios	Los diseños esquemáticos indicarán las opciones de conexión a los servicios existentes o la necesidad de servicios especiales.
Agua	Necesaria.
Electricidad	Necesaria.
Calefacción del edificio	Necesaria, si la temperatura desciende por debajo de 5 °C.
Calefacción, ventilación y aire acondicionado	No necesarios.
Reactivos químicos	Necesarios.
Drenaje	No necesario. Cualquier fuga o derrame que se produzca quedará retenido en una bandeja de goteo y será devuelto a un contenedor de desechos con ayuda de una pequeña bomba.

5.5.3. Módulo B4 — Diagrama de flujo del proceso

La figura 5.18 ilustra la planta y el equipo en un diagrama de flujo del proceso.

5.5.4. Módulo B4 — Lista del equipo

El diagrama de flujo indica que se requerirá el equipo enumerado en el cuadro 5.10.

CUADRO 5.10. LISTA DEL EQUIPO PARA EL MÓDULO B4—FILTRACIÓN DE FLUJO TANGENCIAL

Identificador	Descripción	Equipo		
		Material	Tipo	Caudal
B4-E-01	Contenedor de desechos acuosos	Plástico	Bombona de 45 L	
B4-E-02	Contenedor de efluentes tratados	Plástico	Bombona de 45 L	

CUADRO 5.10. LISTA DEL EQUIPO PARA EL MÓDULO B4–FILTRACIÓN DE FLUJO TANGENCIAL (cont.)

Equipo				
Identificador	Descripción	Material	Tipo	Caudal
B4-E-03	Bomba de alimentación	Plástico o acero inoxidable	Autocebante, desplazamiento positivo	2000 L/h
B4-E-04	Bandeja de goteo	Plástico o acero inoxidable		
B4-E-05	Filtro de membrana de flujo tangencial	Carcasa de plástico o acero inoxidable	Membrana de microfiltro o ultrafiltro	20 L/h
Tuberías				
Identificador	Descripción	Dimensión de la tubería	Presión de diseño	Temperatura de diseño
B4-L-01	Tubería succionadora de la bomba de alimentación	15 mm	2 bar	Ambiente
B4-L-02	Tubería de descarga de la bomba de alimentación	15 mm	5 bar	Ambiente
B4-L-04	Tubería de salida del filtrado	15 mm	2 bar	Ambiente
B4-L-05	Tubería de descarga del efluente	15 mm	2 bar	Ambiente
B4-L-06	Tubería de retorno del concentrado retenido	15 mm	2 bar	Ambiente
B4-L-07	Tubería de retorno del concentrado retenido	15 mm	2 bar	Ambiente
Válvulas				
Identificador	Descripción	Dimensión de la tubería	Tipo	Modelo
B4-V-01	Válvula de control de la alimentación del filtro	15 mm	De diafragma (bridada)	
B4-V-02	Válvula de control del concentrado retenido	15 mm	De diafragma (bridada)	
B4-V-03	No utilizada	—	—	
B4-V-04	Válvula de salida del filtrado	15 mm	De diafragma (bridada)	

CUADRO 5.10. LISTA DEL EQUIPO PARA EL MÓDULO B4–FILTRACIÓN DE FLUJO TANGENCIAL (cont.)

Instrumentos			
Identificador	Descripción	Tipo	Intervalo
B4-I-01	Monitor de la presión de entrada en el filtro		
B4-I-02	Monitor de la presión de salida del filtro		
B4-I-03	No utilizado		
B4-I-04	No utilizado		
B4-I-05	Medidor de caudal del filtrado	De área variable	
B4-I-06	Medidor de caudal del concentrado retenido	De área variable	

Nota: Las tuberías y válvulas deberían ser de acero inoxidable.

5.5.5. Módulo B4 — Descripción del equipo

En la figura 5.19 se presenta un modelo simple del módulo de filtración de flujo tangencial.

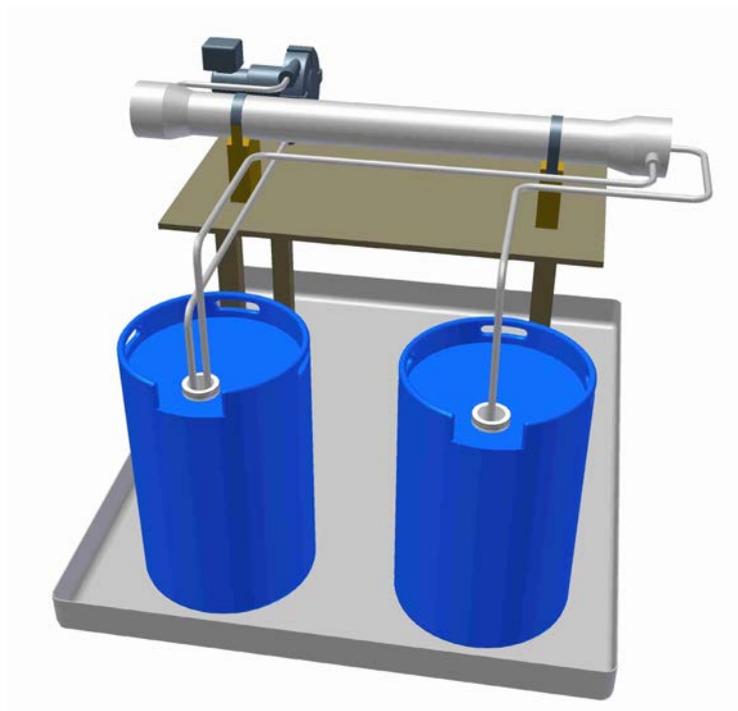


Fig. 5.19. Modelo del Módulo B4–Filtración de flujo tangencial.

El módulo de proceso comprende lo siguiente:

- a) Un contenedor de alimentación de desechos acuosos, B4-E-01, consistente en un recipiente de polietileno reutilizable de 45 L, doble pared y alta integridad, diseñado para líquidos químicos peligrosos y certificado por las Naciones Unidas. El contenedor tendrá un asidero anular estructural y ergonómico para el izado manual, una boca de vaciado descentrada y características que permitan el apilado seguro. Su geometría debería ser lo más lisa posible, para que pueda limpiarse fácilmente.
- b) Una manguera succionadora de alimentación, B4-L-01, de 15 mm de diámetro nominal y de plástico reforzado flexible, para transferir los desechos líquidos acuosos del contenedor de alimentación a la bomba de alimentación.
- c) Una bomba de alimentación autocebante, B4-E-03, peristáltica o de otro tipo de cavidad progresiva (desplazamiento cuasipositivo) o equivalente, con piezas húmedas de plástico y/o acero inoxidable y conexiones de proceso de 15 mm de diámetro nominal, típicamente de un caudal nominal de 2000 L/h, para bombear los desechos líquidos acuosos desde el contenedor de desechos de alimentación, pasando por el filtro de flujo tangencial, hasta un segundo contenedor.
- d) Un sistema de tuberías de trasiego de la bomba, B4-L-02, de 15 mm de diámetro nominal y de acero inoxidable o plástico, para transferir los desechos líquidos acuosos de la bomba de alimentación al filtro de flujo tangencial, dotado de una válvula de control de la alimentación, B4-V-01, de 15 mm de diámetro nominal, de diafragma y de acero inoxidable o plástico, para regular el caudal y la presión de los desechos líquidos en el filtro.
- e) Un filtro de flujo tangencial patentado, B4-E-05, con una carcasa de acero inoxidable o plástico, capaz de procesar desechos a razón de 10 a 20 L/h. Esto es adecuado para un volumen total de desechos de aproximadamente 5000 L/año:
 - i) Este filtro de flujo tangencial está dotado de instrumentos de monitorización de la presión, B4-I-01 y B4-I-02, para vigilar la presión de trabajo y detectar las caídas de presión a lo largo del filtro, que indicarían un proceso de colmatación.
 - ii) El filtro de flujo tangencial comprende típicamente un haz de tubos de membrana contenido en un cilindro. Las moléculas de agua atraviesan la membrana de flujo tangencial impulsadas por la diferencia de presión, dejando las partículas finas y/o las moléculas más grandes en el concentrado retenido. Esta parte se recicla, hasta alcanzar el grado deseado de concentración (controlado por los caudales dentro del proceso).
 - iii) La propia membrana filtrante puede ser de acero sinterizado o cerámica, según las características de filtración requeridas. Las membranas de cerámica o de grafito deben manipularse con cuidado, porque son frágiles. Las de acero inoxidable sinterizado son generalmente más resistentes, por lo que representan la opción preferida.
 - iv) La selección del tamaño de poros de la membrana dependerá de la cantidad y naturaleza de los sólidos presentes en los desechos acuosos, y solo puede realizarse mediante pruebas. Se requerirán ensayos piloto para seleccionar el tamaño de poro más adecuado y optimizar así el rendimiento del filtro en términos de la eficiencia y el caudal de filtración; por ejemplo, un tamaño de poro pequeño puede ofrecer una gran eficiencia de filtración pero un caudal bajo, mientras que un tamaño de poro grande tendrá una eficiencia menor pero permitirá procesar un caudal mayor. Para los ensayos piloto puede utilizarse un solo tubo de flujo tangencial, con la correspondiente carcasa. Ese tubo podrá emplearse luego en la planta real, junto con los demás tubos necesarios para lograr la escala requerida. En la planta se precisará también una carcasa de filtro más grande.
 - v) El filtro de flujo tangencial deberá ser sustituido durante la vida útil de la planta (típicamente al cabo de cinco años), pero la frecuencia dependerá del uso, el volumen de desechos tratado, la presencia de sólidos abrasivos y la frecuencia de las limpiezas.
 - vi) Para evitar la acumulación de lodos en los tubos y el equipo, se requerirá una limpieza periódica de todo el sistema. Es preciso lavarlo a fondo con agua desionizada y empapar la membrana del filtro de flujo tangencial con soluciones químicas para mantener un rendimiento óptimo, ya

- que después de muchos usos la membrana puede acumular incrustaciones. Cuando esto ocurre, se observan bajas tasas de permeación, acompañadas de altas presiones de trabajo durante el tratamiento del efluente acuoso. El lavado genera un desecho acuoso secundario, cuyo volumen debería mantenerse en el mínimo posible (por ejemplo, mediante su reutilización).
- f) Un sistema de tuberías de salida del filtrado, B4-L-04, de 15 mm de diámetro nominal y de acero inoxidable o plástico, entre la salida del permeado del filtro y la válvula de control de la transferencia de este líquido, provisto de:
 - i) una válvula de control de la salida del filtrado, B4-V-04, de diafragma, de 15 mm de diámetro nominal y de acero inoxidable o plástico;
 - ii) un medidor de caudal del filtrado, B4-I-05, de área variable, de 15 mm de diámetro nominal y de acero inoxidable y/o plástico.
 - g) Una manguera de descarga del filtrado, B4-L-05, de 15 mm de diámetro nominal y de plástico reforzado flexible, para transferir los desechos líquidos acuosos de la válvula de salida al contenedor de efluentes tratados.
 - h) Un sistema de tuberías de retorno del concentrado retenido, B4-L-06, de 15 mm de diámetro nominal y de acero inoxidable o plástico, para devolver el líquido acuoso concentrado del filtro de flujo tangencial al contenedor de alimentación de desechos, provisto de:
 - i) una válvula de modulación de la salida del concentrado del filtro, B4-V-02, de 15 mm de diámetro nominal y de acero inoxidable o plástico, para controlar la presión de trabajo del filtro de flujo tangencial;
 - ii) un medidor de caudal del concentrado retenido, B4-I-06, de área variable, de 15 mm de diámetro nominal y de acero inoxidable y/o plástico.
 - i) Una manguera de retorno del concentrado retenido, B4-L-07, de 15 mm de diámetro nominal y de plástico reforzado flexible, para transferir el concentrado retenido de la válvula B4-V-02 al contenedor de alimentación de desechos acuosos.
 - j) Para recibir los desechos acuosos después de su paso por el filtro, un contenedor de recepción del efluente tratado, B4-E-02, consistente en un recipiente de polietileno reutilizable de 45 L, doble pared y alta integridad, diseñado para líquidos químicos peligrosos y certificado por las Naciones Unidas. El contenedor tendrá un asidero anular estructural y ergonómico para el izado manual, una boca de vaciado descentrada y características que permitan el apilado seguro. Su geometría debería ser lo más lisa posible, de modo que pueda limpiarse fácilmente, para poder recibir los desechos acuosos después de que hayan pasado por el filtro de membrana.
 - k) Las tuberías, las válvulas y la bomba estarán dispuestas de modo que esta última pueda bombear directamente el líquido del contenedor de desechos a través del filtro.
 - l) Las tuberías deberían estar diseñadas de modo que el módulo sea lo más compacto y simple posible.
 - m) Tendrá que ser posible aislar mediante válvulas, lavar a fondo y purgar todas las tuberías, bombas, recipientes y demás equipo.
 - n) Las conexiones de proceso entre las tuberías y el equipo deberían ser de bridas.
 - o) Un armazón de acero inoxidable o acero dulce revestido de epoxi, que sostenga todo el equipo:
 - i) El armazón estará provisto de una bandeja de goteo, B4-E-04, con un contenedor de fondo plano de acero inoxidable o plástico para recoger los derrames que puedan producirse. La bandeja de goteo tendrá cabida para los contenedores de alimentación y de recepción, la bomba de alimentación y el filtro de flujo tangencial, y una capacidad que equivaldrá típicamente al 110 % del volumen total de líquidos presente en los contenedores y en todos los demás equipos y tuberías montados dentro o encima de ella (unos 150 L).
 - ii) El armazón tendrá patas regulables para la nivelación.
 - p) Un contenedor de desechos para la descarga periódica del concentrado retenido (posiblemente con algún tipo de blindaje, según los niveles de actividad de la corriente de desechos), consistente en un recipiente de polietileno reutilizable de 45 L, doble pared y alta integridad, diseñado para líquidos químicos peligrosos y certificado por las Naciones Unidas. El contenedor tendrá un asidero anular estructural y ergonómico para el izado manual, una boca de vaciado descentrada y características

que permitan el apilado seguro. Su geometría debería ser lo más lisa posible, para que pueda limpiarse fácilmente.

- q) Un panel de control eléctrico (no ilustrado en la imagen del modelo) accionado desde el armazón, que reciba el suministro de energía eléctrica y controle el funcionamiento de todo el equipo eléctrico del módulo. El panel de control debería incluir un botón de parada de emergencia, para detener todos los componentes del módulo, y un aislador eléctrico que permita aislar todo el equipo.
- r) Todo el equipo eléctrico del módulo debería tener el grado de protección IP adecuado para permitir el lavado a fondo de la planta y el equipo del módulo (un grado de protección IP54 o superior).

5.5.6. Módulo B4 — Consideraciones relativas a la instalación

- a) Se requerirá un área de almacenamiento dotada de contención para los contenedores de líquidos tratados y sin tratar, más el concentrado acumulado equivalente a cinco días de funcionamiento.
- b) El módulo requerirá un suministro de agua para el lavado a fondo de la planta y para la preparación de soluciones de limpieza a partir de los productos químicos correspondientes.
- c) Tendrá que haber un laboratorio radioquímico para el muestreo de los líquidos acuosos y el análisis de su contenido de sólidos antes y después del tratamiento.
- d) También se requerirá una vía de disposición final para los productos químicos de limpieza contaminados y gastados, que podría ser, por ejemplo, el Módulo B1–Tratamiento químico o el Módulo B6–Solidificación.
- e) Para esta opción se precisará una conexión adecuada a la alcantarilla del emplazamiento, o a otro punto de descarga de líquidos aprobado, con las debidas autorizaciones.

5.5.7. Módulo B4 — Requisitos

- a) Deben existir barreras y/o controles adecuados para gestionar el acceso del personal a la zona de procesamiento por filtración de flujo tangencial.
- b) Los operadores deberán llevar equipo de protección personal apropiado, por ejemplo, un mono, calzado protector, gafas de seguridad o máscara y guantes.
- c) Un supervisor de protección radiológica debería vigilar todas las operaciones del módulo, con inclusión de la recepción y el despacho de los contenedores de desechos y la retirada de la tubería del contenedor de desechos líquidos.
- d) Para humedecer la membrana del filtro de flujo tangencial debería utilizarse agua desionizada, haciéndola circular por el filtro. El filtro de flujo tangencial tenderá a formar bioincrustaciones si se utiliza agua dura para lavarlo, o si hay agua dura en los desechos acuosos que se están procesando. Cuando sea posible, deberá eliminarse en el origen toda la dureza del agua de proceso que se vaya a utilizar en la generación de los desechos líquidos. Una forma barata de hacerlo es colocando cartuchos de intercambio iónico locales antes de todos los grifos de agua de proceso.
- e) Una planta de filtros de flujo tangencial solo es adecuada para extraer las partículas muy finas ($<0,1 \mu\text{m}$) y los sólidos disueltos de alto peso molecular. Estos filtros no son adecuados para tratar sólidos gruesos, que podrían obturar los tubos y dañar la membrana de flujo tangencial. Para las cantidades grandes de sólidos, es aconsejable aplicar la sedimentación por gravedad (en el Módulo B1) o la filtración de cartucho (en el Módulo B5), antes de proceder al tratamiento por filtración de flujo tangencial.
- f) Tras la instalación del módulo y antes de su puesta en funcionamiento con desechos líquidos, la membrana de flujo tangencial deberá humedecerse con agua desionizada. Una vez humedecido, el filtro de membrana de flujo tangencial estará listo para procesar desechos acuosos.
- g) Podrá tomarse una pequeña muestra de los desechos líquidos para hacer mediciones locales del pH y la actividad.

5.5.8. Módulo B4 — Descripción y funcionamiento del proceso

- a) La bombona de desechos líquidos destinados al procesamiento puede ser levantada y colocada en la bandeja de goteo por dos personas. También pueden utilizarse dispositivos de sujeción para levantar las bombonas con una horquilla elevadora u otro medio de izado mecánico y colocarlas en la bandeja de goteo. Se requerirá una segunda bombona vacía de capacidad igual o mayor para la recolección del efluente tratado.
- b) Bajo supervisión de protección radiológica, introducir la manguera succionadora de alimentación B4-L-01 en el contenedor de desechos de alimentación B4-E-01 y asegurarla. Asimismo, introducir el tubo de retorno del concentrado retenido B4-L-07 en el contenedor de desechos de alimentación y asegurarlo. Introducir el tubo de descarga B4-L-05 en el contenedor de efluentes tratados vacío y asegurarlo. Abrir las válvulas de entrada y de salida B4-V-01, B4-V-02 y B4-V-04. Utilizando la bomba de alimentación B4-E-03, hacer pasar los desechos acuosos a través de la carcasa del filtro de flujo tangencial. Con ayuda de la válvula de salida del concentrado retenido B4-V-02, aumentar gradualmente la presión sobre el filtro de flujo tangencial, siguiendo las instrucciones del fabricante.
- c) Dentro del filtro, el flujo se separa en dos corrientes:
 - i) la parte que atraviesa la membrana, pobre en los sólidos y las moléculas grandes en disolución que fueron retenidos por el filtro de flujo tangencial, se descarga en el contenedor de efluentes tratados;
 - ii) la parte retenida, enriquecida con los sólidos y los constituyentes en disolución que no atravesaron el filtro de flujo tangencial, vuelve al tanque de alimentación de desechos acuosos.
- d) El caudal del filtrado disminuirá a medida que aumente la concentración de la parte retenida al repetirse su reciclado, por lo que es importante monitorizar los caudales para controlar el proceso. Obsérvense los instrumentos de monitorización de la presión B4-I-01 y B4-I-02, a fin de detectar las caídas de presión en la carcasa del filtro, que indicarían un proceso de colmatación. Continuar hasta que:
 - i) el contenedor de efluentes tratados esté lleno; o
 - ii) se haya alcanzado el grado de concentración requerido en el contenedor de desechos de alimentación; o
 - iii) el caudal del filtrado sea inferior al mínimo recomendado por el proveedor del filtro de flujo tangencial.
- e) Parar la bomba de alimentación B4-E-03, cerrar las válvulas de aislamiento B4-V-01, B4-V-02 y B4-V-04 y, cuidadosamente, bajo supervisión de protección radiológica, retirar los tubos B4-L-01, B4-L-05 y B4-L-07 de los respectivos contenedores y dejarlos en la bandeja de goteo.
- f) Tomar una muestra del contenedor de efluentes tratados y medir la actividad para determinar el grado de descontaminación alcanzado. Tomar una muestra del contenedor del efluente de alimentación (que ahora contendrá el concentrado retenido) y medir la actividad para determinar el grado de concentración alcanzado.
- g) Si los valores medidos son adecuados, sellar el contenedor de efluentes tratados, trasladarlo a la zona de almacenamiento que corresponda, y colocar uno vacío en su lugar. Asimismo, retirar el contenedor de desechos de alimentación y sustituirlo por uno lleno. Los desechos concentrados del contenedor de alimentación se pueden transferir a otra vasija de almacenamiento de desechos concentrados (que podría requerir blindaje), después de lo cual ese contenedor se podrá enjuagar con agua de proceso limpia, vaciando el agua del enjuague en otro contenedor de desechos de alimentación.
- h) Se supone que cada contenedor de desechos líquidos estará procesado después de una pasada por el filtro de flujo tangencial, lo que minimizará el tiempo de procesamiento de cada contenedor. Sin embargo, si los desechos líquidos tratados no están suficientemente descontaminados después de una pasada, podrán filtrarse una segunda vez repitiendo la operación.

5.5.9. Módulo B4 — Inconvenientes del proceso

- a) Es fácil que se produzcan bioincrustaciones.
- b) Requiere una limpieza periódica para restablecer la permeabilidad.
- c) Una vez especificado el material del filtro de flujo tangencial, la unidad solo será eficaz para ciertos tamaños de partículas.
- d) El muestreo debe efectuarse manualmente.
- e) La dosificación química para la preparación de las soluciones de limpieza debe efectuarse manualmente.
- f) El caudal del filtrado disminuirá a medida que aumente la concentración de la parte retenida, por lo que es importante monitorizar continuamente el caudal para controlar el proceso.
- g) Se crean corrientes de desechos secundarias (el concentrado retenido y la solución de limpieza utilizada) que es necesario procesar.
- h) Se requiere un espacio adicional donde preparar las soluciones químicas para la limpieza del módulo.

5.5.10. Módulo B4 — Requisitos de interconexión e integración

Los requisitos de interconexión del módulo de proceso comprenden lo siguiente:

- a) El concentrado retenido requerirá un procesamiento adicional (véase el Módulo B6–Solidificación).

La integración con otros módulos de proceso comprende:

- i) el uso después del Módulo B1, para procesar el líquido sobrenadante o el efluente del módulo de tratamiento químico (una vez extraído el grueso de los sólidos mediante un proceso de sedimentación);
- ii) el uso después del Módulo B5 (Filtración), en que se realizará una filtración previa de los desechos líquidos antes de la filtración de flujo tangencial;
- iii) el uso antes del Módulo B3 (Ósmosis inversa) para filtrar los desechos líquidos y evitar la colmatación de las membranas de ósmosis inversa.

5.6. MÓDULO B5–FILTRACIÓN

5.6.1. Módulo B5 — Consideraciones generales

Una de las etapas posibles del tratamiento es la filtración. La filtración tiene por objeto eliminar una proporción importante de los radionucleidos contaminantes insolubles del volumen inicial de desechos líquidos acuosos. La corriente filtrada requerirá normalmente un ‘pulimento’ adicional, por ejemplo por filtración de flujo tangencial (véase el Módulo B4) o intercambio iónico (véase el Módulo B2).

El módulo de filtración extraerá los desechos acuosos de la bombona por bombeo y los hará circular a través de un filtro. La materia particulada quedará atrapada en el filtro y el líquido tratado que se ha filtrado (es decir, el permeado) se dirigirá a una bombona de desechos tratados.

Los principales componentes del módulo son la unidad del filtro y la bomba. La bomba extrae líquido de una bombona y lo impulsa hacia el filtro. Una válvula de contrapresión regulable manualmente, situada en el punto de salida, asegura que dentro del filtro el líquido esté a la presión requerida (típicamente, de entre 2 y 4 bares). El filtrado atraviesa el filtro y a la salida de la carcasa es recogido en otra bombona. La materia particulada queda retenida en el filtro (de cartucho o de manga).

La unidad del filtro y la bomba están situadas en una bandeja de goteo que ofrece contención en caso de fuga o derrame. Las bombonas de alimentación de desechos acuosos y de recolección del filtrado deben levantarse y colocarse en esta bandeja de goteo para el procesamiento.

5.6.2. Módulo B5 — Base de diseño

La base de diseño resumida en el cuadro 5.11 indica los principales parámetros y supuestos utilizados para determinar el diseño de este módulo de procesamiento.

CUADRO 5.11. BASE DE DISEÑO DEL MÓDULO B5–FILTRACIÓN

Características de los desechos iniciales	
Volumen líquido total	Típicamente de 0,5 m ³ a 10 m ³ por año; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 5 m ³ por año.
Llegada	Periódicamente, en lotes de alrededor de 50 L.
Tasa máxima de procesamiento	100 L/h.
Contenido de actividad de los desechos iniciales	Niveles de actividad bajos, un único o varios radionucleidos.
Forma física	Líquidos, principalmente acuosos. Se presupone que no contienen aceites ni otros líquidos inmiscibles.
Contenido de sólidos	Probablemente pequeñas cantidades de partículas finas.
Contenido de sustancias químicas	Sin contenidos significativos de sustancias químicas, salvo, posiblemente, pequeñas cantidades de agentes complexantes.
Características del efluente tratado	
Contenido de actividad de la descarga	El factor de descontaminación previsto es de entre 10 y 100. La actividad del efluente tratado dependerá de la actividad inicial.
pH	Se presupone un pH de 6 a 9.
Otros componentes	Ningún sólido en la corriente de desechos tratada.
Disponibilidad de servicios	
Servicios	Los diseños esquemáticos deberían indicar las opciones de conexión a los servicios existentes o la necesidad de servicios especiales.
Agua	Necesaria.
Electricidad	Necesaria.
Calefacción del edificio	Necesaria, si la temperatura desciende por debajo de 5 °C.
Calefacción, ventilación y aire acondicionado	No necesarios.
Reactivos químicos	No necesarios.
Drenaje	No necesario. Cualquier fuga o derrame que se produzca quedará retenido en una bandeja de goteo y será devuelto a un contenedor de desechos con ayuda de una pequeña bomba.

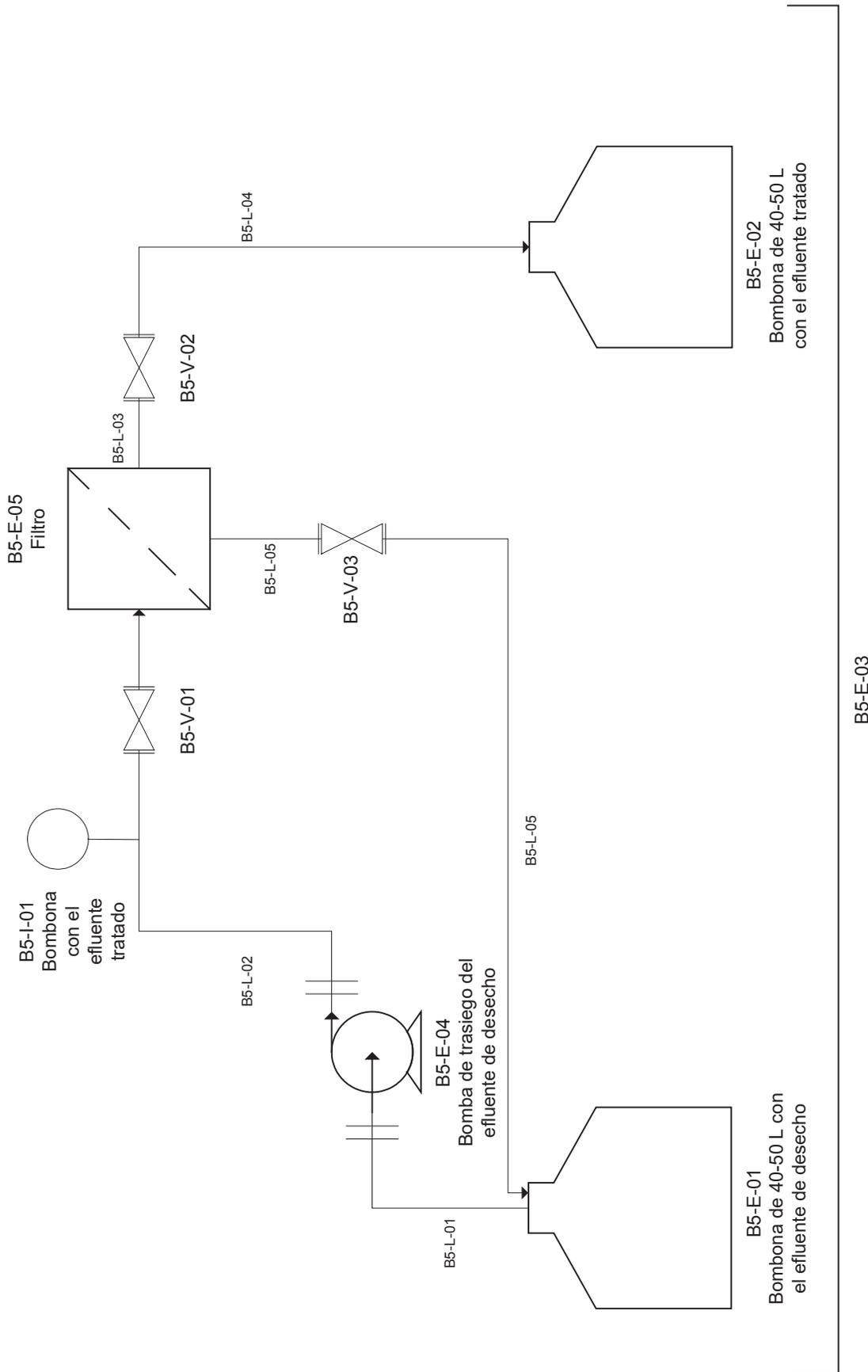


Fig. 5.20. Diagrama de flujo del proceso del Módulo B5—Filtración.

5.6.3. Módulo B5 — Diagrama de flujo del proceso

La figura 5.20 ilustra la planta y el equipo en un diagrama de flujo del proceso.

5.6.4. Módulo B5 — Lista del equipo

El diagrama de flujo indica que se requerirá el equipo enumerado en el cuadro 5.12.

CUADRO 5.12. LISTA DEL EQUIPO PARA EL MÓDULO B5–FILTRACIÓN

Equipo				
Identificador marcado	Descripción	Material	Tipo	Caudal
B5-E-01	Contenedor de desechos acuosos	Plástico	Bombona de 40-50 L	
B5-E-02	Contenedor de efluentes tratados	Plástico	Bombona de 40-50 L	
B5-E-03	Bandeja de goteo	Plástico o acero inoxidable		
B5-E-04	Bomba de alimentación de desechos	Plástico o acero inoxidable	Autocebante, de desplazamiento positivo (bridada)	100 L/h
B5-E-05	Filtro	Plástico o acero inoxidable	Filtro de cartucho	100 L/h
Tuberías				
Identificador marcado	Descripción	Dimensión de la tubería	Presión de diseño	Temperatura de diseño
B5-L-01	Manguera succionadora de alimentación	15 mm	2 bar	Ambiente
B5-L-02	Tubería de salida de la bomba	15 mm	2 bar	Ambiente
B5-L-03	Tubería del efluente tratado	15 mm	2 bar	Ambiente
B5-L-04	Manguera del efluente tratado	15 mm	2 bar	Ambiente
B5-L-05	Tubería de drenaje/retorno del filtro	15 mm	2 bar	Ambiente
Válvulas				
Identificador marcado	Descripción	Dimensión de la tubería	Tipo	Modelo
B5-V-01	Válvula de aislamiento del filtro	15 mm	De diafragma (bridada)	Plástico o acero inoxidable

CUADRO 5.12. LISTA DEL EQUIPO PARA EL MÓDULO B5–FILTRACIÓN (cont.)

Válvulas				
Identificador marcado	Descripción	Dimensión de la tubería	Tipo	Modelo
B5-V-02	Válvula de aislamiento del filtro	15 mm	De diafragma (bridada)	Plástico o acero inoxidable
B5-V-03	Válvula de purga del filtro	15 mm	De diafragma (bridada)	Plástico o acero inoxidable
Instrumentos				
Identificador marcado	Descripción	Dimensión de la conexión		
B5-I-01	Monitor de la presión en la entrada del filtro	15 mm		

Nota: Las tuberías y válvulas serán de plástico o acero inoxidable.

5.6.5. Módulo B5 — Descripción del equipo

En la figura 5.21 se presenta un modelo simple del módulo de filtración.

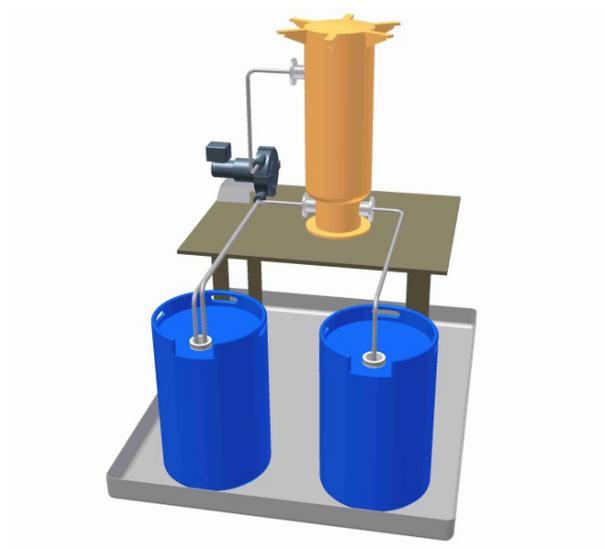


Fig. 5.21. Modelo del Módulo B5–Filtración.

El módulo de proceso comprende lo siguiente:

- a) Un contenedor de alimentación de desechos acuosos, B5-E-01, consistente en un recipiente de polietileno reutilizable de 45 L, doble pared y alta integridad, diseñado para líquidos químicos peligrosos y certificado por las Naciones Unidas. El contenedor tendrá un asidero anular estructural

- y ergonómico para el izado manual, una boca de vaciado descentrada y características que permitan el apilado seguro. Su geometría debería ser lo más lisa posible, para que pueda limpiarse fácilmente.
- b) Una manguera succionadora de alimentación, B5-L-01, de 15 mm de diámetro nominal y de plástico reforzado flexible, para transferir los desechos líquidos acuosos del contenedor de alimentación a la bomba de alimentación.
 - c) Una bomba de alimentación autocebante, B5-E-04, peristáltica o de otro tipo de cavidad progresiva (desplazamiento cuasipositivo) o equivalente, con piezas húmedas de plástico y/o acero inoxidable y conexiones de proceso de 15 mm de diámetro nominal, típicamente de un caudal nominal de 100 L/h, para bombear los desechos líquidos acuosos del contenedor de alimentación, a través del filtro, hacia un segundo contenedor.
 - d) Un sistema de tuberías de trasiego de la bomba de alimentación, B5-L-02, de 15 mm de diámetro nominal y de acero inoxidable o plástico, para transferir los desechos líquidos acuosos de la bomba de alimentación al filtro, provisto de una válvula de control de la alimentación, B5-V-01, de 15 mm de diámetro nominal, de diafragma y de acero inoxidable o plástico, para regular el flujo y la presión del desecho líquido en el filtro.
 - e) Un filtro de cartucho o de manga patentado, B5-E-05, en una carcasa de acero inoxidable o plástico, capaz de procesar 100 L de desechos por hora y un total de 5000 L/año. Además:
 - i) el filtro estará dotado de un instrumento de monitorización de la presión, B5-I-01, para vigilar la presión de trabajo y detectar las caídas de presión, que indicarían que el filtro se está cegando;
 - ii) el filtro puede ser de manga o de cartucho; los filtros de manga son más baratos y más fáciles de sustituir que los de cartucho y ofrecen una amplia gama de tamaños micrométricos, de 1 μm a 800 μm .
 - f) Una tubería de trasiego del filtrado, B5-L-03, de 15 mm de diámetro nominal y de acero inoxidable o plástico, para transferir el filtrado al contenedor de desechos tratados B5-E-02.
 - g) Una manguera de trasiego del filtrado, B5-L-04, de 15 mm de diámetro nominal y de plástico reforzado flexible, para transferir los desechos líquidos acuosos de la válvula de salida al contenedor de efluentes tratados.
 - h) Un sistema de tuberías de retorno del filtrado, B5-L-05, de 15 mm de diámetro nominal y de acero inoxidable o plástico, para devolver el desecho líquido acuoso filtrado de la salida del filtro al contenedor de alimentación de desechos, o para purgar el filtro entre un lote y otro.
 - i) Una válvula de modulación de la salida, B5-V-03, de 15 mm de diámetro nominal y de acero inoxidable o plástico, para controlar la presión de trabajo del filtro.
 - j) Un contenedor para recibir los desechos acuosos tras su paso por el filtro, B5-E-02, consistente en un recipiente de polietileno reutilizable de 45 L, doble pared y alta integridad, diseñado para líquidos químicos peligrosos y certificado por las Naciones Unidas. El contenedor tendrá un asidero anular estructural y ergonómico para el izado manual, una boca de vaciado descentrada y características que permitan el apilado seguro. Su geometría debería ser lo más lisa posible, para que pueda limpiarse fácilmente.
 - k) Las tuberías, las válvulas y la bomba estarán dispuestas de modo que esta última pueda bombear directamente el líquido del contenedor de desechos a través del filtro.
 - l) Las tuberías deberían estar diseñadas de modo que el módulo sea lo más compacto y simple posible.
 - m) Tendrá que ser posible aislar mediante válvulas, lavar a fondo y purgar todas las tuberías, bombas, recipientes y demás equipo.
 - n) Las conexiones de proceso entre las tuberías y el equipo deberían ser de bridas.
 - o) Las bombas deberían ser de desplazamiento positivo, por ejemplo, una bomba peristáltica o una bomba neumática de diafragma. Esto permitirá aspirar los líquidos de la parte superior de los contenedores de almacenamiento, en lugar de utilizar los orificios de salida del fondo, lo que protegerá mejor la integridad de los contenedores de almacenamiento de líquidos.
 - p) La bomba debería utilizarse también para la recirculación del líquido del contenedor de almacenamiento del módulo, a fin de poder tomar una muestra representativa.

- q) Si la carcasa del filtro no se drena por sí sola cuando se detiene el flujo, debería estar provista de un drenaje, con una válvula de aislamiento, para poder vaciarla antes de cambiar el filtro.
- r) Un armazón de acero inoxidable o acero dulce revestido de epoxi, que sostendrá todo el equipo:
 - i) El armazón estará provisto de una bandeja de goteo, B5-E-03, con un contenedor de fondo plano de acero inoxidable o plástico para recoger los derrames que puedan producirse. La bandeja de goteo tendrá cabida para los contenedores de alimentación y de recepción de desechos, el filtro y la bomba de alimentación, y una capacidad que equivaldrá típicamente al 110 % del volumen total de líquidos presente en los contenedores y en todos los demás equipos y tuberías montados dentro o encima de ella (unos 15 L).
 - ii) El armazón tendrá patas regulables para la nivelación.
- s) Un panel de control eléctrico (no ilustrado en la imagen del modelo) accionado desde el armazón, que reciba el suministro de energía eléctrica y controle el funcionamiento de todo el equipo eléctrico del módulo. El panel de control debería incluir un botón de parada de emergencia, para detener todos los componentes del módulo, y un aislador eléctrico que permita aislar todo el equipo.
- t) Todo el equipo eléctrico del módulo debería tener el grado de protección IP adecuado para permitir el lavado a fondo de la planta y el equipo del módulo (un grado de protección IP54 o superior).

5.6.6. Módulo B5 — Consideraciones relativas a la instalación

- a) Tendrá que haber una zona de recepción de desechos provista de contención, con capacidad para un máximo de 20 contenedores de líquidos, presumiblemente bombonas de entre 40 y 50 litros.
- b) Se requerirá un carrito de transporte manual patentado para el desplazamiento de los contenedores.
- c) Se precisará equipo de monitorización radiológica de mano para vigilar los niveles de radiación de la carcasa del filtro.
- d) Tendrá que haber una zona dotada de contención para almacenar los filtros gastados. Puede ser necesario un blindaje localizado.
- e) Tendrá que haber una zona dotada de contención para almacenar los desechos acuosos filtrados, presumiblemente en bombonas de entre 40 y 50 litros.
- f) Se requerirá un laboratorio radioquímico para el muestreo de los líquidos acuosos y el análisis de su contenido de sólidos antes y después del tratamiento.
- g) Se necesitará un suministro de agua para el lavado a fondo de la planta y el equipo, por ejemplo antes del mantenimiento.
- h) Deberá existir un lugar de almacenamiento para los filtros, bombas y válvulas de repuesto y para las piezas de recambio de los instrumentos, los recipientes de muestreo y el equipo de laboratorio.
- i) Se requerirá una conexión adecuada a la alcantarilla del emplazamiento, o a otro punto de descarga de líquidos aprobado, con las debidas autorizaciones.

5.6.7. Módulo B5 — Requisitos

- a) Deben existir barreras y/o controles adecuados para gestionar el acceso del personal a la zona de procesamiento por filtración.
- b) El operador o los operadores deberán llevar equipo de protección personal apropiado, por ejemplo, un mono, calzado protector, gafas de seguridad o máscara y guantes.
- c) Un supervisor de protección radiológica debería vigilar todas las operaciones del módulo, con inclusión de la recepción y el despacho de los contenedores de desechos y la retirada de la tubería del contenedor de desechos líquidos.
- d) El módulo de filtración es adecuado para eliminar las partículas finas (de 1 μm a 100 μm). Para las cantidades grandes de sólidos, es aconsejable aplicar la sedimentación por gravedad (en el Módulo B1) antes del tratamiento por filtración, para eliminar los sólidos gruesos y evitar la rápida colmatación del filtro.

5.6.8. Módulo B5 — Descripción y funcionamiento del proceso

- a) Tras la instalación del módulo y antes de su puesta en funcionamiento, debería tomarse y analizarse una muestra de los desechos acuosos. Podrá tomarse una pequeña muestra de estos desechos para medir localmente el pH y la actividad.
- b) La bombona de desechos líquidos destinados al procesamiento puede ser levantada y colocada en la bandeja de goteo por dos personas. También pueden utilizarse dispositivos de sujeción para levantar la bombona de desechos B5-E-01 y una bombona vacía B5-E-02 de recolección del efluente tratado con una horquilla elevadora u otro medio de izado mecánico y colocarlas en la bandeja de goteo.
- c) Bajo supervisión de protección radiológica, introducir el tubo succionador de alimentación B5-L-01 en el contenedor de alimentación de desechos B5-E-01. Asimismo introducir el tubo de retorno del filtrado B5-L-05 en el contenedor de alimentación de desechos y asegurarlo. Introducir la manguera de trasiego B5-L-04 en el contenedor de efluentes tratados vacío y asegurarla. Abrir las válvulas de entrada y salida B5-V-01 y B5-V-03. Utilizando la bomba de alimentación B5-E-04, impulsar los desechos acuosos a través de la carcasa del filtro. Cuando el filtrado esté transparente, abrir la válvula B5-V-02 y cerrar la B5-V-03.
- d) El filtrado, que ha atravesado el filtro y está libre de los sólidos que quedaron retenidos, se descargará en el contenedor de efluentes tratados B5-E-02.
- e) El caudal del filtrado disminuirá a medida que se vaya colmatando el cartucho del filtro con el procesamiento repetido de los lotes, por lo que es importante monitorizar los caudales para controlar el proceso. Obsérvese el instrumento de monitorización de la presión B5-I-01, a fin de detectar las caídas de presión en la carcasa del filtro, que indicarían un proceso de colmatación. Las especificaciones del fabricante del filtro señalarán las caídas de presión aceptables.
- f) Proseguir la filtración hasta que se haya vaciado el contenedor de efluentes de desecho y se haya llenado el de efluentes tratados.
- g) La caída de presión en el filtro indicará la necesidad de sustituirlo.
- h) Debería monitorizarse también la acumulación de actividad en el filtro. Puede ser preciso sustituirlo antes de lo previsto (es decir, antes de que la medición de una caída de presión indique que se está cegando) para permitir una manipulación segura o para cumplir los requisitos de aceptación del emplazamiento de disposición final.
- i) Parar la bomba de alimentación B5-E-04, cerrar las válvulas de aislamiento B5-V-01, B5-V-02 y B5-V-03 y, cuidadosamente, bajo supervisión de protección radiológica, retirar los tubos B5-L-01, B5-L-04 y B5-L-05 de los respectivos contenedores.
- j) Tomar una muestra del contenedor de efluentes tratados y medir la actividad para determinar el grado de descontaminación alcanzado.
- k) Si es adecuado, sellar el contenedor de efluentes tratados, trasladarlo a la zona de almacenamiento que corresponda, y colocar uno vacío en su lugar. Asimismo, retirar el contenedor de desechos de alimentación y reemplazarlo por uno lleno. Los desechos concentrados del contenedor de alimentación se pueden transferir a otra vasija de almacenamiento de desechos concentrados (que podría requerir blindaje), después de lo cual ese contenedor se podrá enjuagar con agua de proceso limpia, vaciando el agua del enjuague en otro contenedor de desechos de alimentación.
- l) Se supone que cada contenedor de desechos líquidos estará procesado después de una pasada por el filtro, lo que minimizará el tiempo de procesamiento de cada contenedor.

5.6.9. Módulo B5 — Inconvenientes del proceso

- a) El proceso crea una corriente de desechos secundaria (filtros gastados) que podría suministrar altas dosis a los operadores.
- b) Solo sirve para líquidos con un contenido de sólidos relativamente bajo.
- c) Puede requerir un tratamiento previo, como la sedimentación por gravedad, para eliminar los volúmenes altos de sólidos en suspensión.

5.6.10. Módulo B5 — Requisitos de interconexión e integración

Los requisitos de interconexión del módulo de proceso comprenden lo siguiente:

- a) Los sólidos retenidos que se acumulan en el filtro tendrán que ser tratados como un desecho sólido no compactable (véase el Módulo E1) cuando se sustituya el filtro.

La integración con otros módulos de proceso comprende:

- i) el uso después del Módulo B1;
- ii) el uso antes del Módulo B4, es decir, del módulo de flujo tangencial, para eliminar las partículas gruesas antes de proceder a ese tipo de filtración;
- iii) el uso antes del Módulo B2, es decir, del módulo de intercambio iónico, ya que el filtrado puede requerir también un procesamiento adicional antes de la disposición final, por ejemplo, por intercambio iónico para eliminar los iones solubles no retenidos por el filtro.

Este módulo es adecuado también para otras corrientes de desechos, como los líquidos orgánicos.

5.7. MÓDULO B6—SOLIDIFICACIÓN

5.7.1. Módulo B6 — Consideraciones generales

El módulo de solidificación mezclará los desechos acuosos con una mezcla de cemento previamente calibrada en un bidón de acero de 200 L utilizando un mezclador ‘de paleta descartable’. En esta técnica de uso común, la paleta agitadora queda retenida en el bidón después del proceso de mezcla, pasando a formar parte del bulto de desechos sólidos. De este modo, se reduce el riesgo de propagación de la contaminación. Los desechos y la matriz de cemento se solidificarán, y una nueva lechada vertida encima de esa masa sólida proporcionará una protección adicional contra el escape de la contaminación.

La solidificación puede aplicarse ya sea al volumen inicial de desechos acuosos o a los desechos concentrados obtenidos tras el tratamiento de ese volumen, por ejemplo a:

- a) los lodos precipitados durante el tratamiento químico (Módulo B1);
- b) las resinas de intercambio iónico gastadas tras el tratamiento por intercambio iónico (Módulo B2);
- c) el concentrado retenido en el tratamiento por ósmosis inversa (Módulo B3) o por filtración de flujo tangencial (Módulo B4).

La figura 5.22 ilustra el funcionamiento de un módulo de hormigonado relativamente simple, en que la mezcla se efectúa con un agitador de paleta descartable dentro del bidón.

Este módulo comprende:

- i) una estación de mezcla ventilada, para la contención durante el proceso de mezcla;
- ii) un sistema alimentador de cementos en polvo, para dosificar exactamente los cementos en polvo vertidos en el bidón durante la mezcla;
- iii) una estación de control, en que se controla y monitoriza el proceso;
- iv) una planta extractora (no mostrada en la fotografía), con un ventilador y un filtro para la ventilación de la estación de mezcla.

La figura 5.23 muestra un bidón típico con un agitador de paleta descartable. La paleta es de acero dulce, y el bidón tiene puntos de fijación simple soldados en la parte superior y en el fondo, para sostener la paleta en el centro.

En la figura 5.24 se presenta un bidón terminado después de la mezcla. Si es necesario, puede añadirse una capa de lechada inactiva, preparada con un mezclador de lechada (Módulo E1-Encapsulamiento).



Fig. 5.22. Ilustración fotográfica del Módulo B6-Solidificación.



Fig. 5.23. Bidón típico con agitador de paleta descartable.



Fig. 5.24. Bidón terminado después de la mezcla.

5.7.2. Módulo B6 — Base de diseño

La base de diseño resumida en el cuadro 5.13 indica los principales parámetros y supuestos utilizados para determinar el diseño de este módulo de procesamiento.

CUADRO 5.13. BASE DE DISEÑO DEL MÓDULO B6–SOLIDIFICACIÓN

Características de los desechos iniciales	
Volumen líquido total	Típicamente de 0,5 m ³ a 10 m ³ por año; para el diseño de referencia debería utilizarse un valor de 5 m ³ .
Llegada	Periódicamente, en lotes de alrededor de 50 L.
Tasa máxima de procesamiento	50 L de desechos por bidón.
Contenido de actividad de los desechos iniciales	No se conoce.
Forma física	Líquidos, principalmente acuosos.
Contenido de sólidos	Podrían tener contenidos de sólidos de hasta el 20 %.
Contenido de sustancias químicas	Sin contenidos significativos de sustancias químicas, salvo, posiblemente, pequeñas cantidades de agentes complexantes.
Características del efluente tratado	
Contenido de actividad de la descarga	n.a.
pH	n.a.
Otros componentes	n.a.
Disponibilidad de servicios	
Servicios	Los diseños esquemáticos indicarán las opciones de conexión a los servicios existentes o la necesidad de servicios especiales.
Agua	Necesaria.
Electricidad	Necesaria.
Calefacción del edificio	Necesaria, si la temperatura desciende por debajo de 5 °C.
Calefacción, ventilación y aire acondicionado	Necesarios.
Reactivos químicos	Necesarios.
Drenaje	No necesario. Cualquier fuga o derrame que se produzca quedará retenido en una o varias bandejas de goteo y será devuelto a un contenedor de desechos con ayuda de una pequeña bomba.

5.7.3. Módulo B6 — Diagrama de flujo del proceso

La figura 5.25 ilustra la planta y el equipo en un diagrama de flujo del proceso.

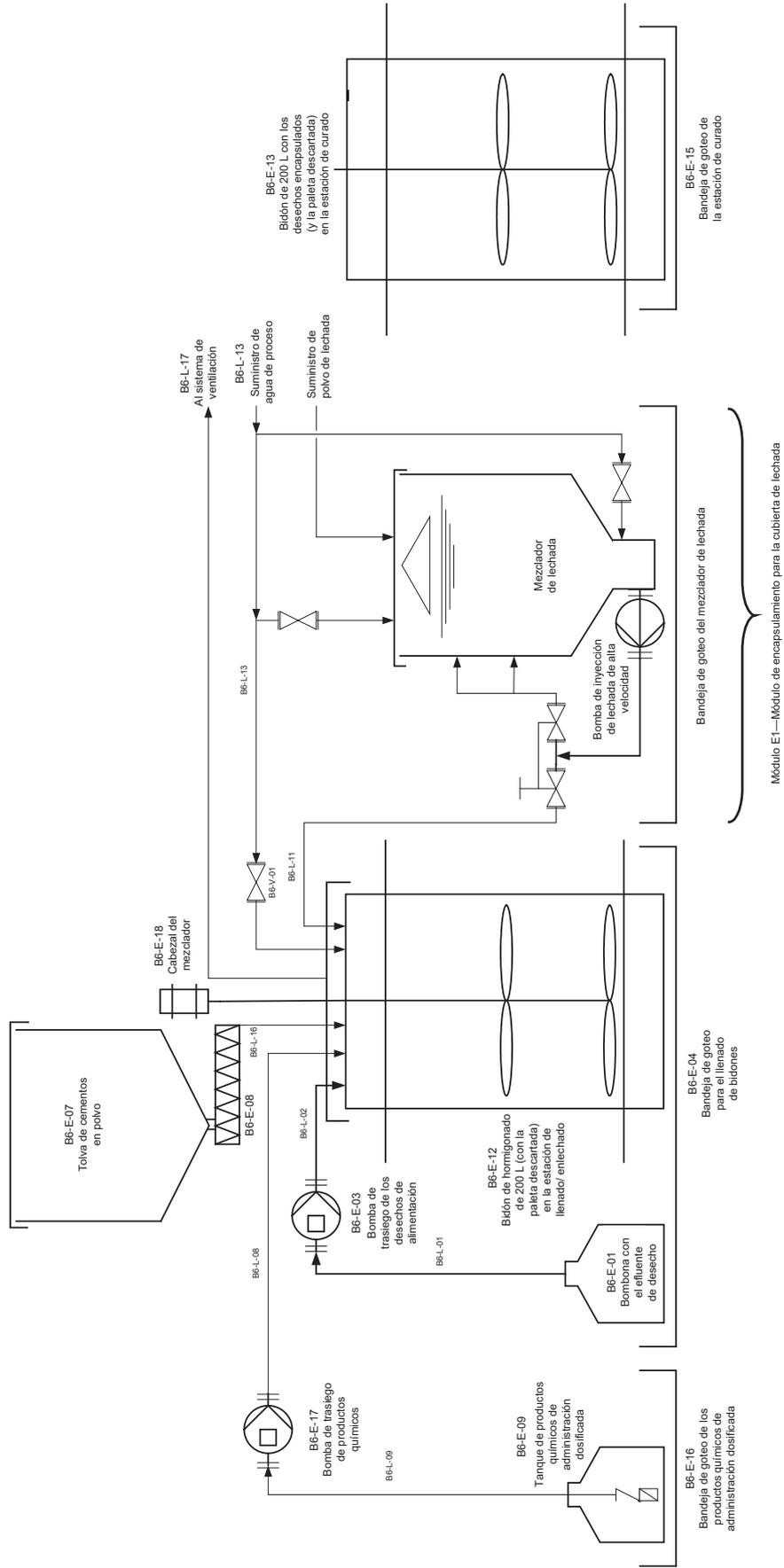


Fig. 5.25. Diagrama de flujo del proceso del Módulo B6-Solidificación.

5.7.4. Módulo B6 — Lista del equipo

El diagrama de flujo indica que se requerirá el equipo enumerado en el cuadro 5.14.

CUADRO 5.14. LISTA DEL EQUIPO PARA EL MÓDULO B6–SOLIDIFICACIÓN

Equipo				
Identificador	Descripción	Material	Tipo	Caudal
B6-E-01	Contenedor de desechos no tratados	Plástico	Bombona de 45 L	
B6-E-02	No utilizado	—	—	—
B6-E-03	Bomba de trasiego de desechos	Plástico o acero inoxidable	Autocebante, de desplazamiento positivo	100 L/h
B6-E-04	Bandeja de goteo para el llenado de bidones	Plástico o acero inoxidable		
B6-E-07	Tolva de cementos en polvo	Acero inoxidable		
B6-E-08	Tubo alimentador de tornillo sin fin	Acero inoxidable		
B6-E-09	Tanque de productos químicos de administración dosificada	Plástico	Cerrado o tapado	
B6-E-12	Bidón de solidificación	Acero dulce o acero inoxidable	Bidón de 200 L (con paleta descartable)	
B6-E-13	Bidón de solidificación (curado)	Acero dulce o acero inoxidable	Bidón de 200 L (con paleta descartable)	
B6-E-15	Bandeja de goteo de la estación de curado	Plástico o acero inoxidable		
B6-E-16	Bandeja de goteo de los productos químicos de administración dosificada	Plástico o acero inoxidable		
B6-E-17	Bomba de administración de productos químicos	Plástico o acero inoxidable	Autocebante, desplazamiento positivo	50 L/h
B6-E-18	Mezclador del bidón de solidificación	Acero dulce		

CUADRO 5.14. LISTA DEL EQUIPO PARA EL MÓDULO B6–SOLIDIFICACIÓN (cont.)

Tuberías				
Identificador	Descripción	Dimensión de la tubería	Presión de diseño	Temperatura de diseño
B6-L-01	Tubo de aspiración de la bomba de trasiego de desechos	15 mm	2 bar	Ambiente
B6-L-02	Tubo de descarga de la bomba de trasiego de desechos	15 mm	2 bar	Ambiente
B6-L-09	Tubo de administración dosificada de productos químicos	15 mm	2 bar	Ambiente
B6-L-11	Tubo de suministro de la mezcla de lechada al bidón	50 mm	2 bar	Ambiente
B6-L-13	Tubo de suministro de agua de proceso al bidón	15 mm	2 bar	Ambiente
B6-L-16	Tubo alimentador de cementos en polvo	50 mm	2 bar	Ambiente
B6-L-17	Conducto de ventilación del bidón a través de la campana	50 mm	2 bar	

Válvulas			
Identificador	Descripción	Dimensión de la tubería	Clase de válvula
B6-V-01	Válvula de aislamiento del filtro	15 mm	Válvula esférica (bridada)

5.7.5. Módulo B6 — Descripción del equipo

El equipo de solidificación puede integrarse en un único módulo. El corte de sección de la figura 5.26 muestra el equipo integrado en un contenedor ISO.

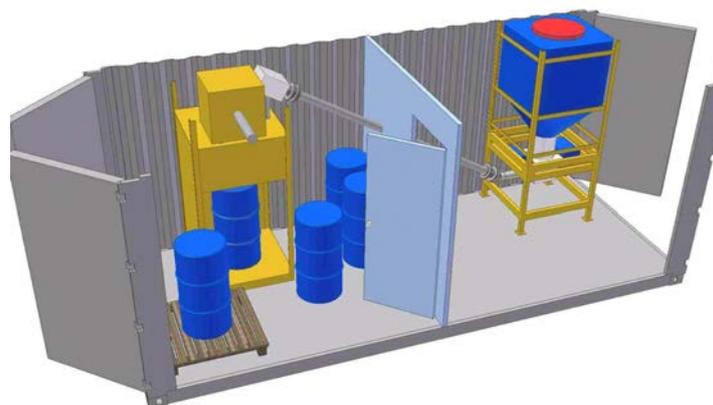


Fig. 5.26. Modelo del Módulo B6–Solidificación en un contenedor ISO.

El módulo de proceso comprende lo siguiente:

- a) Contenedores de alimentación de desechos acuosos, B6-E-01, consistentes en recipientes de polietileno reutilizables de 45 L, doble pared y alta integridad, diseñados para líquidos químicos peligrosos y certificados por las Naciones Unidas. Los contenedores tendrán un asidero anular estructural y ergonómico para el izado manual, una boca de vaciado descentrada y características que permitan el apilado seguro. Su geometría debería ser lo más lisa posible, para que puedan limpiarse fácilmente.
- b) Una manguera succionadora de alimentación, B6-L-01, de 15 mm de diámetro nominal y de plástico reforzado flexible, para transferir los desechos líquidos acuosos del contenedor de alimentación a la bomba de alimentación.
- c) Una bomba de alimentación autocebante, B6-E-03, peristáltica o de otro tipo de cavidad progresiva (desplazamiento cuasipositivo) o equivalente, con piezas húmedas de plástico y/o acero inoxidable y conexiones de proceso de 15 mm de diámetro nominal, típicamente de un caudal nominal de 100 L/h, para bombear los desechos líquidos acuosos del contenedor de alimentación al bidón de hormigonado de acero de 200 L, a razón de unos 100 a 120 litros de desechos líquidos por bidón.
- d) Un tubo de descarga de la bomba, B6-L-02, de 15 mm de diámetro nominal y de acero inoxidable o plástico, para transferir los desechos líquidos acuosos de la bomba de alimentación al bidón de hormigonado.
- e) Un contenedor, B6-E-12, para la solidificación de los desechos líquidos acuosos por hormigonado, consistente en un bidón de 200 L de acero dulce o acero inoxidable con:
 - i) Un agitador interno de paleta descartable y soportes de acero dulce.
 - ii) Una campana de contención para evitar las salpicaduras durante la mezcla.
 - iii) El cabezal de mezclador, B6-E-18, que atraviesa la campana para accionar el agitador de paleta descartable dentro del bidón.
 - iv) Un conducto de ventilación a través de la campana, B6-L-17, de 50 mm de diámetro nominal y de acero inoxidable, conectado a un sistema de ventilación activa del módulo para prevenir la contaminación aerotransportada. Este sistema de ventilación comprende un ventilador, tuberías y un filtro HEPA, y es específico para este módulo.
- f) Una tolva de 200 L de acero inoxidable, montada encima y hacia un lado del bidón de hormigonado, con los cementos en polvo premezclados, provista de:
 - i) un tubo alimentador de tornillo sin fin, B6-E-08, de 50 mm de diámetro nominal y de acero inoxidable, para el suministro controlado de los cementos en polvo al bidón de hormigonado (típicamente a razón de 10 kg/min);
 - ii) una tubería, B6-E-16, de acero inoxidable de 50 mm de diámetro nominal, para conectar el alimentador de tornillo sin fin con el bidón a través de la campana de contención.
- g) Un sistema de tuberías de agua de proceso, B6-L-13, de 15 mm de diámetro nominal y de plástico, para suministrar agua de proceso al bidón de hormigonado y al mezclador de lechada, provisto de una válvula de aislamiento, B6-V-01, esférica, de 15 mm de diámetro nominal y de plástico, para controlar el flujo hacia el bidón de hormigonado.
- h) Un armazón de acero inoxidable o acero dulce revestido de epoxi, que sostendrá el equipo mencionado.
- i) El armazón estará provisto de una bandeja de goteo, B6-E-04, con un contenedor de fondo plano de acero inoxidable o plástico para recoger los derrames que puedan producirse. La bandeja de goteo tendrá cabida para el contenedor de desechos de alimentación, la bomba de trasiego y el bidón de hormigonado, y una capacidad que equivaldrá típicamente al 110 % del volumen total de líquidos presente en los contenedores y en todos los demás equipos y tuberías montados dentro o encima de ella (unos 200 L):
 - i) Debería haber espacio suficiente para construir un blindaje temporal en torno al bidón de hormigonado, por ejemplo con ladrillos de plomo, si es necesario.
 - ii) El armazón debería tener patas regulables para la nivelación.

- j) Un tanque patentado para los productos químicos de administración dosificada, B6-E-09, que podrá ser el contenedor de plástico o de acero inoxidable en que el fabricante suministre los productos químicos, por ejemplo las soluciones cáusticas.
- k) Un sistema de tuberías de administración dosificada de productos químicos, B6-L-09, de 15 mm de diámetro nominal y de acero inoxidable o plástico, provisto de una válvula de pie con filtro, para la adición de productos químicos a los desechos líquidos acuosos del bidón de 200 L (B6-E-12).
- l) Una bomba de administración de productos químicos autocebante y de desplazamiento positivo, B6-E-17, con piezas húmedas de plástico y/o acero inoxidable y conexiones de proceso de 15 mm de diámetro nominal, típicamente de un caudal nominal de 50 L/h.
- m) Un armazón de acero inoxidable o acero dulce revestido de epoxi, que sostendrá todo el equipo de administración dosificada de productos químicos:
 - i) El armazón estará provisto de una bandeja de goteo, B6-E-16, con un contenedor de fondo plano de acero inoxidable o plástico para recoger los derrames que puedan producirse. La bandeja de goteo tendrá cabida para el tanque de alimentación de productos químicos y la bomba de administración dosificada, y una capacidad que equivaldrá típicamente al 110 % del volumen total de líquidos presente en el tanque y en todos los demás equipos y tuberías montados dentro o encima de ella (unos 50 L).
 - ii) El armazón debería tener patas regulables para la nivelación.
- n) Una planta patentada de mezcla de lechadas por lotes de 150 L para las cubiertas de lechada. Este componente se describe con más detalle en el Módulo E1–Encapsulamiento. La necesidad de una cubierta de lechada dependerá de los criterios de aceptación de desechos que se apliquen al transporte y la disposición final de los bidones.
- o) Una zona de curado en que puedan dejarse los bidones solidificados para un período de curado, que suele ser de 24 h. Típicamente, se almacenarán juntos, para el curado, los cinco bidones producidos en un día de funcionamiento. La zona de curado debería estar provista también de una bandeja de goteo, B6-E-15, capaz de retener hasta el 110 % del volumen total de líquidos que contenga (un máximo de cinco bidones).
- p) Un panel de control eléctrico (no ilustrado en la imagen del modelo) accionado desde el armazón, que reciba el suministro de energía eléctrica y controle el funcionamiento de todo el equipo eléctrico del módulo. El panel de control debería incluir un botón de parada de emergencia, para detener todos los componentes del módulo, y un aislador eléctrico que permita aislar todo el equipo.
- q) Todo el equipo eléctrico de la cabina debería tener el grado de protección IP adecuado para permitir el lavado a fondo de la planta y el equipo (por ejemplo, un grado de protección IP54 o superior).

5.7.6. Módulo B6 — Consideraciones relativas a la instalación

- a) El módulo de solidificación (B6) podría estar situado y funcionar junto al módulo de encapsulamiento (E1), para compartir fácilmente el equipo de enlechado.
- b) Se requerirá un laboratorio radioquímico para la toma y el análisis de muestras de los desechos líquidos antes del tratamiento, a fin de aplicar la formulación correcta de la mezcla de desechos y cementos.
- c) Se requerirá un suministro de agua para el lavado a fondo de la planta y el equipo, por ejemplo antes del mantenimiento.
- d) Tendrá que haber un carrito de transporte manual para el desplazamiento de las bombonas y los bidones vacíos.
- e) Tendrá que haber una horquilla elevadora para desplazar los bidones cargados.
- f) Se requerirá una zona de almacenamiento de bidones dotada de contención, con capacidad para los bidones correspondientes a cinco días de funcionamiento.

5.7.7. Módulo B6 — Requisitos

- a) Deben existir barreras y/o controles adecuados para gestionar el acceso del personal a la zona de procesamiento por solidificación.
- b) Los operadores deberán llevar equipo de protección personal adecuado, por ejemplo, un mono, zapatos o botas protectoras, gafas de protección o máscara, un respirador y guantes.
- c) Un técnico de laboratorio y/o un químico tomarán y analizarán muestras de los desechos líquidos no tratados para confirmar la aceptabilidad del tratamiento y adaptar la dosificación química a los distintos bidones, si es necesario.
- d) Tiene que haber un supervisor de protección radiológica por día de funcionamiento, para vigilar las operaciones, con inclusión de la recepción y el despacho de los contenedores de desechos, el llenado, la mezcla y el despacho de los bidones, y la retirada de la tubería de vaciado de los contenedores vacíos.
- e) Habrá que realizar ensayos piloto para desarrollar y poner a prueba la formulación adecuada de la mezcla de desechos y cemento (incluida la mezcla óptima de cementos en polvo), optimizar la carga de desechos y optimizar también el comportamiento del producto, es decir, las propiedades de los desechos hormigonados, como su resistencia a la compresión y la tasa de lixiviación. El equipo requerido para los ensayos piloto comprende lo siguiente:
 - i) una campana de gases o un espacio de contención pequeño para manipular líquidos activos;
 - ii) muestras de líquidos activos;
 - iii) medios de análisis radiactivo de líquidos;
 - iv) cemento en polvo;
 - v) medios de medición del par de torsión/la viscosidad;
 - vi) un calorímetro para medir la temperatura.
- f) El cemento en polvo que se seleccione será una formulación premezclada que presente las propiedades físicas y químicas ideales para la solidificación de los desechos líquidos. Es importante que no haya errores en la formulación, porque el reprocesamiento del producto hormigonado es muy difícil en la práctica.
- g) Un químico o técnico de laboratorio podrá tomar una pequeña muestra de los desechos líquidos reales y efectuar mediciones locales para confirmar la aceptabilidad de la formulación y adaptar la dosificación química a los distintos bidones de desechos, si es necesario.

5.7.8. Módulo B6 — Descripción y funcionamiento del proceso

- a) Debería ser posible solidificar hasta cinco bidones de desechos por día de funcionamiento. El diseño de referencia se basa en un valor de 5 m³ de desechos líquidos por año, lo que supone la generación de entre 40 y 50 bidones anuales y menos de diez días de funcionamiento al año.
- b) Un bidón de hormigonado vacío de 200 L puede ser levantado y colocado bajo el cabezal del mezclador de cemento por dos personas. También pueden utilizarse dispositivos de sujeción para levantar el bidón de acero con una horquilla elevadora u otro medio de izado mecánico y colocarlo en la posición correcta. El agitador de paleta descartable estará engranado con su sistema de accionamiento en el cabezal del mezclador.
- c) Llenar la tolva de cemento con la mezcla de cementos en polvo adecuada. Si es necesario, colocar en la bandeja de goteo una bombona con el producto químico de administración dosificada escogido —por ejemplo, una solución cáustica— e introducir y asegurar cuidadosamente en ella la manguera de succión de la bomba de administración B6-E-17.
- d) La bombona de desechos líquidos destinados al procesamiento puede ser levantada y colocada en la bandeja de goteo por dos personas. También pueden utilizarse dispositivos de sujeción para levantar las bombonas con una horquilla elevadora u otro medio de izado mecánico y colocarlas en la bandeja de goteo.

- e) Bajo supervisión de protección radiológica, introducir la manguera succionadora de alimentación B6-L-01 en el contenedor de desechos de alimentación B6-E-01 y asegurarla.
- f) Utilizar la bomba de alimentación B6-E-03 para trasegar un volumen medido de desechos líquidos acuosos al bidón de hormigonado. Dado que típicamente se requerirán entre 100 y 120 litros, harán falta un máximo de tres contenedores de alimentación.
- g) Cuando se vacíe un contenedor, parar la bomba de trasiego B6-E-03 y, bajo supervisión de protección radiológica, retirar el tubo succionador B6-L-01 del contenedor de desechos de alimentación B6-E-01. Vaciar completamente este contenedor de alimentación y enjuagarlo con agua de proceso, vertiendo esa agua en otro contenedor de alimentación. Retirar el contenedor vacío de la bandeja de goteo y dejarlo a un lado. Repetir la operación con un nuevo contenedor de desechos de alimentación hasta que el bidón contenga el volumen de desechos líquidos requerido.
- h) En caso de error, los desechos en exceso podrán extraerse del bidón por decantación y devolverse al contenedor de alimentación con ayuda de la bomba, para obtener el contenido de desechos requerido.
- i) Mezclar los desechos líquidos con la paleta del bidón accionada por el cabezal del mezclador B6-E-18. Si es necesario, acondicionar químicamente el contenido líquido del bidón, por ejemplo añadiendo solución cáustica con ayuda de la bomba de administración de productos químicos B6-E-17.
- j) Cuando los desechos líquidos estén bien mezclados, se puede tomar una pequeña muestra para confirmar mediante mediciones locales la aceptabilidad del tratamiento.
- k) Verificar que el sistema de ventilación de la campana de mezcla esté encendido y en funcionamiento. Con ayuda del tubo alimentador de tornillo sin fin B6-E-08, añadir un lote de cemento en polvo al bidón sin dejar de mezclar. Seguir mezclando los desechos líquidos y el cemento durante unos 30 min, hasta que todo el cemento en polvo se haya dispersado.
- l) Apagar el mezclador B6-E-18, y dejar que el contenido del bidón fragüe. Cuando haya fraguado, desengranar el agitador de paleta descartable de su sistema de accionamiento y retirar el bidón de la estación de mezcla. Para ello se requerirá la ayuda de todos los operadores. Como alternativa, podrían utilizarse dispositivos de sujeción para levantar el bidón con una horquilla elevadora u otro medio de izado mecánico y retirarlo de la estación de mezcla.
- m) Colocar el bidón con su producto hormigonado en una zona de curado dotada de contención, y dejarlo allí durante 24 h como mínimo. Controlar el fraguado del producto hormigonado.
- n) Una vez concluido el proceso de curado, el bidón de desechos hormigonados y curados podrá recubrirse con una nueva lechada. De este modo, el producto del bidón tendrá una superficie superior limpia, lo que reducirá al mínimo el riesgo de propagación de la contaminación. La necesidad de una cubierta de lechada dependerá de los criterios de aceptación de desechos que se apliquen al transporte y la disposición final. Para esta operación, trasladar nuevamente el bidón hormigonado a la estación de mezcla (para lo que se requerirán por lo menos dos personas) y utilizar una lechada premezclada o mezclar un nuevo lote empleando el Módulo E1.
- o) Cuando la lechada esté debidamente mezclada, transferir la cantidad necesaria al bidón de hormigonado a través de la tubería B6-L-11.
- p) Por último, tapar el bidón hormigonado y guardarlo hasta el transporte autorizado a su destino final.

5.7.9. Módulo B6 — Inconvenientes del proceso

- a) Es preciso realizar ensayos para encontrar la formulación correcta de la mezcla de desechos y cemento y confirmar que cumple los criterios de aceptación de desechos para el almacenamiento provisional o la disposición final.
- b) Los desechos no son recuperables.
- c) La manipulación de cemento en polvo requiere la adopción de disposiciones de ventilación adecuadas e introduce el peligro de inhalación de polvo.

5.7.10. Módulo B6 — Requisitos de interconexión e integración

Este módulo es compatible con otras corrientes de desechos, tales como:

- a) las resinas de intercambio iónico (procedentes del Módulo B2 o de otras fuentes);
- b) los lodos.

5.8. MÓDULO D2—COMPACTACIÓN DE BAJA FUERZA

5.8.1. Módulo D2 — Consideraciones generales

La compactación de baja fuerza tiene por objeto reducir el volumen de desechos secos y compactables, como el papel y el plástico, comprimiéndolos en un bidón de 200 L. Los desechos comprimidos estarán listos para su almacenamiento a largo plazo en una instalación adecuada. La compresión puede generar una pequeña cantidad de desechos líquidos, debido a la liberación de los líquidos absorbidos en los materiales. El equipo deberá enjuagarse periódicamente entre el tratamiento de distintos lotes.

El módulo de compactación comprime los desechos dentro del bidón, añade nuevos desechos y vuelve a comprimir, repitiendo este proceso hasta que el bidón está lleno.

Los principales componentes del módulo son los bidones de desechos y un compactador de bidón de baja fuerza.

5.8.2. Módulo D2 — Base de diseño

La base de diseño resumida en el cuadro 5.15 indica los principales parámetros y supuestos utilizados para determinar el diseño de este módulo de procesamiento.

CUADRO 5.15. BASE DE DISEÑO DEL MÓDULO D2—COMPACTACIÓN DE BAJA FUERZA

Características de los desechos

Volumen total de desechos	Típicamente menos de 20 m ³ por año; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 5 m ³ por año.
Llegada	Periódicamente, en lotes de alrededor de 200 L.
Tasa máxima de procesamiento	X lotes por día.
Contenido de actividad de los desechos iniciales	La actividad total de estos desechos es <50 GBq. No habrá cantidades importantes de radionucleidos de período largo.
Forma física	Típicamente, se tratará de desechos sólidos blandos compuestos por papel, cartón, plásticos, caucho, guantes, etc.
Contenido de líquidos	Los desechos no deberían contener líquidos. Podría haber pequeñas cantidades de líquidos absorbidos en los desechos.
Contenido de sustancias químicas	Podría haber pequeñas cantidades de sustancias químicas absorbidas en los desechos.

CUADRO 5.15. BASE DE DISEÑO DEL MÓDULO D2–COMPACTACIÓN DE BAJA FUERZA (cont.)

Características del efluente tratado	
Contenido de actividad de la descarga	n.a.
pH	n.a.
Otros componentes	Los desechos podrían liberar cierta cantidad de líquidos durante la compactación. Estos líquidos deberían recogerse en una bandeja de goteo y procesarse como corresponda.
Disponibilidad de servicios	
Servicios	Los diseños esquemáticos deberían indicar las opciones de conexión a los servicios existentes o la necesidad de servicios especiales.
Agua	Necesaria.
Electricidad	Necesaria.
Calefacción del edificio	No necesaria.
Calefacción, ventilación y aire acondicionado	No necesarios.
Reactivos químicos	No necesarios.
Drenaje	No necesario.

5.8.3. Módulo D2 — Descripción del equipo

La figura 5.27 muestra un ejemplo típico de un compactador de baja fuerza.



Fig. 5.27. Fotografía de un Módulo D2–Compactador de baja fuerza.

- a) Un compactador de baja fuerza, con las siguientes características:
 - i) Típicamente, una fuerza de compactación de entre unas pocas toneladas y 40 t. Para los desechos blandos (papel, cartón, plásticos, caucho), es suficiente una fuerza de compactación menor, porque los desechos se recuperarán (retomarán su forma) de todas maneras cuando se suspenda la aplicación de esa fuerza. Las fuerzas de compactación más altas permiten compactar latas vacías, filtros de cartucho, botellas (vacías) y componentes plásticos. La unidad de un compactador de fuerza menor será más fácil de instalar dentro de la cabina sin blindaje (Módulo D3).
 - ii) Capacidad para recibir desechos secos, ligeros y previamente clasificados en diversos contenedores, normalmente bidones de acero de 200 L o sacos de polialgodón. Para el procesamiento puede ser necesario transferir los desechos a sacos de polialgodón antes de la compactación.
 - iii) Comprable directamente del fabricante.
- b) Principales especificaciones del equipo:
 - i) Una fuerza hidráulica de hasta 40 t para la compactación dentro del bidón, adecuada para compactar materiales ligeros como el papel y el plástico. Cabeza de compactación de acero inoxidable, para evitar la corrosión.
 - ii) Resistencia al enjuague con agua entre un lote y otro.
 - iii) Gran espacio libre en torno a los bidones para el desborde de materiales.
 - iv) Collarín de escape para la ventilación de la cámara.
 - v) Circuito hidráulico regenerativo para un ciclo rápido.
 - vi) El compactador de bidón puede utilizar fuerza neumática o hidráulica para comprimir los desechos. La fuerza hidráulica es preferible y es de uso más común.
 - vii) Bandeja de goteo integrada para la recolección de los líquidos que puedan ser expulsados del bidón.
- c) Contenedores de desechos compactables: bidones de 200 L, de acero dulce o acero inoxidable, con tapa (figura 5.28).



Fig. 5.28. Contenedor de desechos compactables (bidón de 200 L).

- d) Sacos de polialgodón para colocar los desechos previamente clasificados y evitar el polvo aerotransportado durante la compactación.
- e) Equipo para pesar el producto terminado, el bidón con los desechos compactados, destinado a la disposición final. Debería ser una balanza industrial estándar para palés o bidones, montada sobre una plataforma dentro del módulo. Deberá tenerse en cuenta la facilidad de limpieza.

- f) Equipo para manipular los bidones, especialmente para cargarlos y descargarlos del compactador. Una carretilla de horquilla elevadora manual con un dispositivo de enganche de bidones será adecuada para este propósito.
- g) Equipo de monitorización de la radiactividad:
 - i) equipo de mano para monitorizar la contaminación;
 - ii) equipo de mano para monitorizar la radiación.
- h) Equipo especial de calefacción, ventilación y aire acondicionado para ventilar el compactador (o la cabina sin blindaje, si el compactador está integrado en ella), compuesto por un ventilador, un filtro HEPA, amortiguadores de aislamiento, instrumentos de regulación de la presión diferencial de los filtros, instrumentos de regulación del caudal, un aparato de toma de muestras de la descarga, conductos y una chimenea de descarga.
- i) Un panel de control eléctrico accionado desde el armazón del módulo, que reciba el suministro de energía eléctrica y controle el funcionamiento de todo el equipo eléctrico del módulo. El panel de control deberá incluir un botón de parada de emergencia, para detener todos los componentes del módulo, y un aislador eléctrico que permita aislar todo el equipo.
- j) Todo el equipo eléctrico del módulo debería tener el grado de protección IP adecuado para permitir el lavado a fondo de la planta y el equipo (por ejemplo, un grado de protección IP54 o superior).

5.8.4. Módulo D2 — Consideraciones relativas a la instalación

- a) Se requerirá un lugar de almacenamiento para las piezas de recambio del compactador.
- b) Deberá existir un lugar de almacenamiento para hasta 10 bidones estándar de 200 L a la espera de la compactación y cinco bidones de desechos compactados.
- c) Tendrá que haber una zona para almacenar los desechos que no se consideren idóneos para la compactación.
- d) Se precisará una zona de recepción para los contenedores de desechos compactables, presumiblemente bidones de 200 L.
- e) Deberá existir un espacio de almacenamiento adecuado para los desechos compactados y no compactados correspondientes a un día de funcionamiento.
- f) El módulo debería estar adyacente a la zona de clasificación de desechos, es decir, a la cabina sin blindaje (véase el Módulo D3).
- g) Tendrá que haber una vía de disposición final para los bidones de desechos compactados completamente cargados. Antes de la disposición final puede ser necesario un procesamiento adicional (véase el Módulo E1).
- h) Se supone que el compactador funcionará conjuntamente con una cabina sin blindaje (véase el Módulo D3) en que los desechos puedan clasificarse/segregarse y irse añadiendo a los bidones de 200 L. Lo ideal es que el compactador se encuentre dentro de la cabina sin blindaje.
- i) La preparación de los bidones puede comprender varios ciclos de llenado, compactación, y nuevo llenado para utilizar el espacio creado mediante la compresión. Por lo tanto, el módulo debería tener un medio de contención que impida la propagación de la contaminación durante el llenado y la compactación. Un modo de lograr esta contención es colocando el compactador dentro de la cabina sin blindaje (Módulo D3). Otra posibilidad es que el compactador tenga un recinto ventilado que albergue el bidón durante la compactación, con una puerta de acceso para introducirlo y retirarlo, y para añadirle más desechos.

5.8.5. Módulo D2 — Requisitos

- a) Deben existir barreras y/o controles adecuados para gestionar el acceso del personal a la zona de procesamiento.
- b) El operador o los operadores deberán llevar equipo de protección personal adecuado, por ejemplo, un mono, calzado protector, gafas de seguridad o máscara y guantes.

- c) La preparación de los aerosoles (es decir, su perforación y purga) debería tener lugar antes de la llegada al módulo de compactación (véase el Módulo D3).
- d) Los desechos se clasificarán (por ejemplo, en el Módulo D3) para eliminar los elementos no compactables antes del suministro al compactador, y se colocarán en bidones de 200 L.
- e) Se recomienda que los desechos compactables se coloquen en sacos de polialgodón antes de cargarlos en los bidones de 200 L para la compactación. Ello evitará la emisión de polvos durante el proceso de compactación.
- f) Los desechos deberían estar secos; sin embargo, es posible que la compactación libere algo de humedad, que permanecerá en el bidón.

5.8.6. Módulo D2 — Descripción y funcionamiento del proceso

- a) Retirar la tapa de un bidón de 200 L vacío y cargarlo en el compactador; puede requerirse equipo de protección respiratoria en algunas etapas de la operación, como la carga y descarga del compactador de baja fuerza, cuando el sistema de ventilación no esté manteniendo la contención.
- b) Introducir los sacos de polialgodón con los desechos previamente clasificados en el bidón vacío y comprimir. Añadir nuevos sacos y comprimir, hasta que el bidón esté completamente lleno.
- c) Cuando el bidón esté completamente lleno, retirarlo del compactador y taponarlo. El supervisor de protección radiológica debería controlar si hay contaminación en la superficie del bidón. Si no la hay, transferir el bidón a un lugar de almacenamiento a corto plazo para su disposición final ulterior. De lo contrario, limpiar el bidón, bajo el control del supervisor de protección radiológica.
- d) Los operadores pueden tener que limpiar por frotamiento las superficies externas del bidón una vez compactados los desechos; como orientación, el límite para los materiales de baja actividad específica (BAE) es de 4 Bq/cm² para los emisores β y/o γ , y de 0,4 Bq/cm² para los emisores α .
- e) Los operadores deberán monitorizar el bulto de desechos completo y verificar que la tasa de dosis en la superficie del bidón cumpla los requisitos para el transporte [5.1] y los criterios de aceptación de desechos para el almacenamiento y la disposición final.
- f) El equipo del módulo deberá limpiarse antes de reanudar el procesamiento, a fin de reducir el riesgo de contaminación.

5.8.7. Módulo D2 — Inconvenientes del proceso

- a) La clasificación previa a la compactación de los desechos requiere mucha mano de obra.
- b) Existe el riesgo de contaminación aerotransportada.
- c) La tasa de dosis en la zona deberá monitorizarse para verificar que se mantenga en niveles aceptables.

5.8.8. Módulo D2 — Requisitos de interconexión e integración

Los requisitos de interconexión del módulo de proceso comprenden:

- la necesidad de una salida de ventilación a través de una chimenea externa.

La integración con otros módulos de proceso comprende:

- el uso junto con el Módulo D3–Cabina sin blindaje.

5.9. MÓDULO D3–CABINA SIN BLINDAJE

5.9.1. Módulo D3 — Consideraciones generales

La cabina sin blindaje se utilizará para clasificar los desechos sólidos secos en corrientes de desechos compactables y no compactables. También podrá emplearse para la manipulación de fuentes selladas en desuso de baja actividad y su colocación en bidones de 200 L con vistas a su encapsulamiento (no a la compactación). La cabina es un gabinete de acero inoxidable, de acero dulce pintado o posiblemente incluso de un material plástico reforzado con vidrio. Tiene ventanas y una abertura de guillotina para que el operador introduzca las manos y manipule/clasifique los desechos sólidos. La figura 5.29 ilustra una cabina típica, aunque de dimensiones bastante grandes; una unidad más pequeña (más estrecha) podría ser más adecuada para los Estados Miembros.



Fig. 5.29. Ejemplo de una cabina sin blindaje para la clasificación de desechos sólidos.

La cabina tiene una boca para la carga horizontal de bidones en la parte trasera. El bidón con los desechos en bruto se introduce en esta boca y se empuja hasta que se encuentre parcialmente dentro de la cabina. El operador retira la tapa y descarga los desechos sobre la mesa para clasificarlos y segregarlos. La cabina puede tener incorporado un compactador de desechos en bidones (como se muestra en la figura) para ir comprimiendo los desechos a medida que se llena el bidón.

Típicamente, debería ser posible clasificar y segregar aproximadamente 1 m³ de desechos compactables por día, lo que supone un mínimo de cinco días de funcionamiento al año.

La cabina estará dotada de un sistema de ventilación por extracción que ofrecerá cierto grado de control de la contaminación durante el funcionamiento.

5.9.2. Módulo D3 — Base de diseño

La base de diseño resumida en el cuadro 5.16 indica los principales parámetros y supuestos utilizados para determinar el diseño de este módulo de procesamiento.

CUADRO 5.16. BASE DE DISEÑO DEL MÓDULO D3–CABINA SIN BLINDAJE

Características de los desechos	
Volumen total de desechos	Menos de 25 m ³ por año; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 5 m ³ por año.
Llegada	Periódicamente, en lotes de alrededor de 200 L.
Tasa máxima de procesamiento	Típicamente hasta cinco bidones por día.
Contenido de actividad de los desechos iniciales	La actividad total de estos desechos es <50 GBq. No habrá cantidades importantes de radionucleidos de período largo.
Forma física	Típicamente, se tratará de una mezcla de desechos sólidos ligeros y pesados, que incluirán papel, cartón, plásticos, caucho, guantes, materiales de vidrio, objetos metálicos, chatarra, etc.
Contenido de líquidos	Podría haber pequeñas cantidades de líquidos absorbidos en los desechos.
Contenido de sustancias químicas	Podría haber pequeñas cantidades de sustancias químicas absorbidas en los desechos.
Características del efluente tratado	
Contenido de actividad	n.a.
pH	n.a.
Otros componentes	n.a.
Disponibilidad de servicios	
Servicios	Los diseños esquemáticos deberían indicar las opciones de conexión a los servicios existentes o la necesidad de servicios especiales.
Agua	Necesaria.
Electricidad	Necesaria.
Calefacción del edificio	Puede ser necesaria, según la aplicación.
Calefacción, ventilación y aire acondicionado	Necesarios.
Reactivos químicos	No necesarios.
Drenaje	No necesario.

5.9.3. Módulo D3 — Descripción del equipo

La figura 5.30 ilustra el procesamiento con un Módulo D3–Cabina sin blindaje provisto de un compactador de bidones.

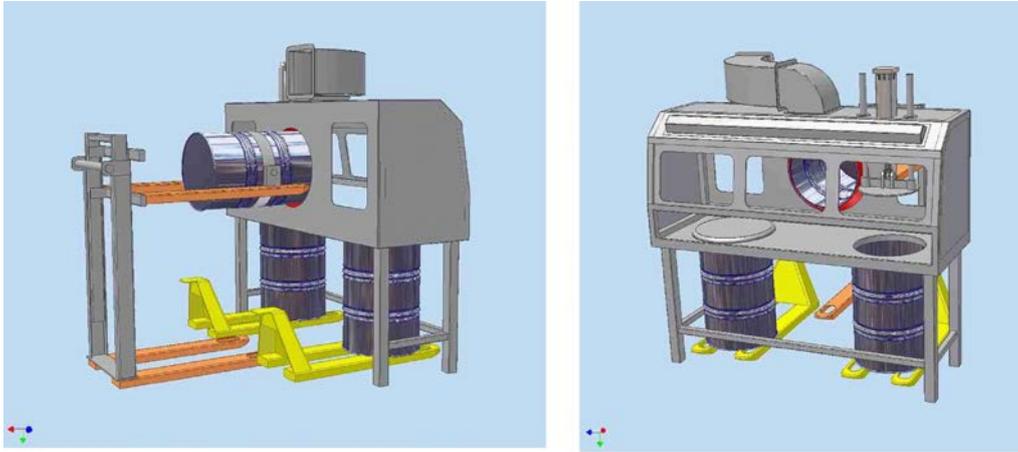


Fig. 5.30. Imágenes de un modelo del Módulo D3–Cabina sin blindaje con compactador de bidones.

El módulo de proceso de la cabina sin blindaje comprende lo siguiente:

- a) Contenedores de almacenamiento de desechos compactables, por ejemplo bidones de 200 L. Los bidones para fuentes selladas en desuso de baja actividad y su posterior encapsulamiento tendrán revestimientos anulares de hormigón que aumenten el blindaje.
- b) Contenedores de almacenamiento/sacos para los desechos clasificados como compactables; sacos de polialgodón (esenciales para contener el polvo durante la compactación, véase el Módulo D2).
- c) Un gabinete, de acero inoxidable, acero dulce pintado o plástico reforzado con vidrio, con las siguientes especificaciones:
 - i) Ventanas para ver la mesa de clasificación.
 - ii) Una abertura por la que el operador pueda introducir las manos para clasificar los desechos. Esta abertura puede tener todo el ancho del gabinete, como en el ejemplo de la fotografía anterior, o consistir en una serie de orificios corredizos de manipulación con guantes para reducir la superficie abierta y, de este modo, el volumen del movimiento de aire requerido para mantener la contención.
 - iii) Un equipo especial de calefacción, ventilación y aire acondicionado para ventilar la cabina y ofrecer contención, compuesto por un ventilador, un filtro HEPA, amortiguadores de aislamiento, instrumentos de regulación de la presión diferencial de los filtros, instrumentos de regulación del caudal, un aparato de toma de muestras de la descarga, conductos y una chimenea de descarga. Para mantener la contención en el gabinete, se requiere una velocidad del aire de aproximadamente 0,5 m/s.
 - iv) Una mesa de clasificación dentro del gabinete, de acero inoxidable, a una altura cómoda para el trabajo y con superficies lisas fáciles de limpiar.
 - v) Una boca de entrada para los desechos no clasificados, adecuada para un bidón de desechos de 200 L y situada de modo que los desechos puedan descargarse fácilmente sobre la mesa de clasificación. En la imagen anterior, la boca de entrada está situada en posición vertical en el fondo del gabinete y los desechos extraídos por el operador caen directamente sobre la mesa de clasificación.

- vi) Una boca para el contenedor de desechos clasificados como compactables, con sellado y tapa extraíble para mantener una conexión hermética o cubrir la boca cuando no se esté utilizando.
- vii) Una boca para el contenedor de desechos clasificados como no compactables, con sellado y tapa extraíble para mantener una conexión hermética o cubrir la boca cuando no se esté utilizando.
- d) Equipo de mano para monitorizar la contaminación
- e) Equipo de mano para monitorizar la radiación.
- f) Herramientas de mano para manipular los desechos, que pueden incluir rastrillos para separarlos, pinzas para agarrar los distintos elementos, y cortadores para reducir el volumen.
- g) Un monitor portátil de la radiación β ambiental local.
- h) Un panel de control eléctrico (no ilustrado en la imagen del modelo) accionado desde el armazón del módulo, que reciba el suministro de energía eléctrica y controle el funcionamiento de todo el equipo eléctrico del módulo. El panel de control incluirá un botón de parada de emergencia, para detener todos los componentes del módulo, y un aislador eléctrico que permita aislar todo el equipo.
- i) Todo el equipo eléctrico del módulo tendrá el grado de protección IP adecuado para permitir el lavado a fondo de la planta y el equipo (por ejemplo, un grado de protección IP54 o superior).

5.9.4. Módulo D3 — Consideraciones relativas a la instalación

- a) Las superficies internas deberán ser lisas y fáciles de descontaminar, sin elementos que dificulten la descontaminación por frotamiento.
- b) El módulo de la cabina sin blindaje puede recibir desechos secos, pesados y ligeros, en diversos contenedores, que normalmente serán bidones de acero de 200 L. Para el procesamiento, los desechos pueden tener que transferirse a bidones de acero de 200 L antes de su clasificación en la cabina.
- c) Tendrá que haber una chimenea exterior para la descarga de la ventilación.
- d) Se requerirá una zona de almacenamiento en seco de los desechos, protegida de la intemperie.
- e) El módulo debería ser capaz de recibir una gran variedad de desechos compactables, como ropa, calzado, guantes y objetos afilados.
- f) Los desechos pueden llegar con un cierto grado de clasificación previa; por ejemplo, los objetos afilados, como las agujas, podrían llegar en un recipiente especial.
- g) Se requerirán vías para el procesamiento ulterior de los desechos clasificados, es decir, para los desechos no comprimibles (véase el Módulo E1) y comprimibles (véase el Módulo D2).
- h) La preparación de los desechos puede incluir la reducción de volumen mediante el desmantelamiento o el troceado, o la extracción de los gases a presión de los aerosoles.
- i) El módulo podría integrarse con el compactador de baja fuerza y la planta de enlechado (véanse los Módulos D2 y E1). La ventaja de la integración de la cabina con este otro equipo es que reduce al mínimo la manipulación de los desechos y, por lo tanto, también el riesgo de propagación de la contaminación.
- j) Existen herramientas especializadas para la compactación de aerosoles, que combinan la perforación, purga y compactación en un solo paso. Otra posibilidad es efectuar la purga manualmente en un entorno controlado, por ejemplo en una caja de manipulación con guantes.
- k) El módulo debería ser capaz de manipular y clasificar todos los tipos de desechos no compactables, como los cartuchos de filtros gastados.

5.9.5. Módulo D3 — Requisitos

- a) Deben existir barreras y/o controles adecuados para gestionar el acceso del personal a la zona de procesamiento.

- b) El operador o los operadores deberán llevar equipo de protección personal, por ejemplo, un mono, calzado protector, gafas de seguridad o máscara y guantes.
- c) Deberían monitorizarse los niveles de actividad en la zona de trabajo, ya que cada vez que se abra la cabina existirá el riesgo de salida de contaminación.
- d) Los desechos compactables húmedos no son aptos para la compactación y pueden requerir un tratamiento adicional de eliminación de la humedad antes de la compactación.

5.9.6. Módulo D3 — Descripción y funcionamiento del proceso

- a) Encender el sistema de ventilación del gabinete para poner en marcha el flujo de aire y establecer una contención de la contaminación aerotransportada.
- b) Colocar bidones de 200 L vacíos en las bocas correspondientes para los desechos compactables y no compactables.
- c) Levantar el bidón de desechos e introducirlo en la boca de entrada del gabinete, verificando que quede debidamente sellada. Retirar la tapa del bidón y vaciar los desechos sobre la mesa de clasificación.
- d) Comenzar a clasificar los desechos. Poner los desechos no compactables (como el material de vidrio, los objetos metálicos o la chatarra) en el bidón de desechos correspondiente. Poner los desechos compactables (como el papel, el cartón, los plásticos, el caucho y los guantes) en sacos de polialgodón y luego en el bidón correspondiente.
- e) Una vez terminada la clasificación de los desechos, o cuando el bidón de los desechos no clasificados esté vacío, desconectar este bidón de la boca de entrada y extraerlo. La clasificación debería interrumpirse durante esa desconexión, cuando la boca de entrada esté abierta a la atmósfera, para reducir el riesgo de contaminación aerotransportada debido a la pérdida de la contención.
- f) Cuando los bidones de los desechos clasificados estén llenos, cerrar las bocas correspondientes, retirar los bidones para su procesamiento ulterior (véanse el Módulo D2—Compactación o el Módulo E1—Encapsulamiento) y sustituirlos por bidones vacíos.
- g) El equipo debería limpiarse entre un lote y otro.

5.9.7. Módulo D3 — Inconvenientes

- a) El proceso requiere mucha mano de obra.
- b) Puede ser necesaria cierta clasificación previa en el origen (por ejemplo, la recogida de los objetos afilados en contenedores aparte).
- c) Existe el riesgo de contaminación aerotransportada.
- d) Deberá monitorizarse la tasa de dosis en la zona para verificar que se mantenga en niveles aceptables.

5.9.8. Módulo D3 — Integración con otros módulos de proceso

El módulo puede utilizarse junto con otros módulos de procesamiento tales como:

- a) el Módulo E1, de encapsulamiento;
- b) el Módulo D2, de compactación de baja fuerza.

Las fuentes selladas en desuso de actividad alta se tratan por separado (Módulo L4—Celda caliente móvil).

5.10. MÓDULO E1-ENCAPSULAMIENTO

5.10.1. Módulo E1 — Consideraciones generales

El encapsulamiento tiene por objeto inmovilizar los desechos y su contaminación radiactiva para evitar la dispersión.

El módulo puede utilizarse para el encapsulamiento de desechos no compactables y de fuentes selladas en desuso (si son aceptables en una instalación de disposición final operativa) y para la cobertura con lechada de los bidones de desechos líquidos solidificados. Los desechos se encontrarán en bidones de 200 L, a los que se añadirá la lechada de cemento.

Se presupone que los desechos no compactables llegarán en bidones de 200 L ya clasificados y segregados de modo que cumplan los criterios de aceptación de desechos. Esa clasificación y segregación habrá tenido lugar probablemente en una cabina sin blindaje (véase el Módulo D3). Por consiguiente, la función de este módulo será preparar nuevos lotes de lechada de cemento, y descargar esa lechada en los bidones para inmovilizar los desechos no compactables. El vertido de la lechada puede efectuarse con el bidón de desechos aún dentro de la cabina sin blindaje, o posteriormente. Las especificaciones de este módulo incluyen también la preparación del bidón para recibir los desechos y la lechada.

El módulo será capaz de preparar hasta cinco lotes de lechada por día, suficientes para encapsular cinco bidones de 200 L diarios.

La figura 5.31 muestra un ejemplo típico de un mezclador de lechada patentado. Este equipo es capaz de mezclar un lote y bombearlo luego a un bidón de 200 L para encapsular los desechos.



Fig. 5.31. Mezclador de lechada.

La ventaja de este tipo de mezclador de lechada, en comparación con la mezcla manual o con las hormigoneras de tambor giratorio, es que produce una lechada muy fluida (de baja viscosidad), que se distribuye bien y rellena y encapsula completamente los desechos, sin dejar ningún hueco.

Se sugiere que esta unidad se utilice conjuntamente con la cabina sin blindaje. El bidón se llenará con los desechos no compactables tras la clasificación en la cabina. La lechada se preparará en el mezclador y luego se verterá por bombeo en el bidón, situado bajo la boca correspondiente de la cabina sin blindaje.

5.10.2. Módulo E1 — Base de diseño

La base de diseño resumida en el cuadro 5.17 indica los principales parámetros y supuestos utilizados para determinar el diseño de este módulo de procesamiento.

CUADRO 5.17. BASE DE DISEÑO DEL MÓDULO E1–ENCAPSULAMIENTO

Características de los desechos iniciales	
Volumen total de desechos	Menos de 5 m ³ por año; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 1 m ³ por año.
Llegada	Periódicamente, en lotes de alrededor de 50 L.
Tasa máxima de procesamiento	Típicamente, cinco lotes por día.
Contenido de actividad de los desechos iniciales	La actividad total de estos desechos es <10 GBq. No habrá cantidades importantes de radionucleidos de período largo.
Forma física	Típicamente, se tratará de desechos de laboratorio sólidos y pesados, como materiales de vidrio, objetos metálicos, chatarra, etc.
Contenido de líquidos	Podría haber pequeñas cantidades de líquidos en los desechos.
Contenido de sustancias químicas	Podría haber pequeñas cantidades de sustancias químicas en los desechos.
Características del efluente tratado	
Contenido de actividad	n.a.
pH	n.a.
Otros componentes	n.a.
Disponibilidad de servicios	
Servicios	Los diseños esquemáticos deberían indicar las opciones de conexión a los servicios existentes o la necesidad de servicios especiales.
Agua	Necesaria.
Electricidad	Necesaria.
Calefacción del edificio	Necesaria, si la temperatura desciende por debajo de 5 °C.
Calefacción, ventilación y aire acondicionado	Necesarios.
Reactivos químicos	Necesarios.
Drenaje	No necesario. Cualquier fuga o derrame que se produzca quedará retenido en una zona dotada de contención para evitar la propagación. Esa zona debería estar limpia, es decir, exenta de contaminación radiológica.

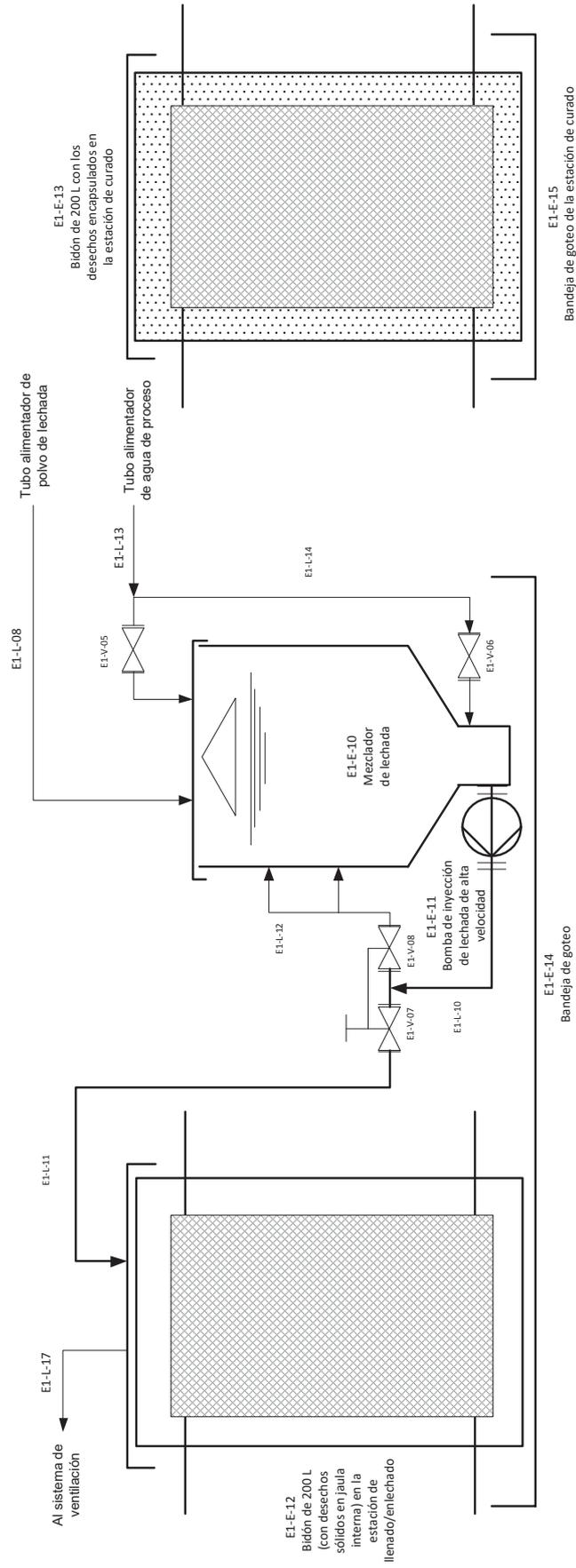


Fig. 5.32. Diagrama de flujo del proceso del Módulo E1-Encapsulamiento.

5.10.3. Módulo E1 — Diagrama de flujo del proceso

La figura 5.32 ilustra la planta y el equipo en un diagrama de flujo del proceso.

5.10.4. Módulo E1 — Lista del equipo

El diagrama de flujo indica que se requerirá el equipo enumerado en el cuadro 5.18.

CUADRO 5.18. LISTA DEL EQUIPO PARA EL MÓDULO E1-ENCAPSULAMIENTO

Equipo				
Identificador	Descripción	Material	Tipo	Caudal
E1-E-10	Mezclador de lechada.	Acero dulce.	Agitado, con tapadera.	
E1-E-11	Bomba de inyección de lechada de alta velocidad.	Hierro fundido.		
E1-E-12	Bidón de desechos vacío (con jaula interna).	Acero.		
E1-E-13	Bidón de desechos en proceso de curado.	Acero.		
E1-E-14	Bandeja de goteo del mezclador de lechada.	Plástico o acero inoxidable.		
E1-E-15	Bandeja de goteo para el curado.	Plástico o acero inoxidable.		
Tuberías				
Identificador	Descripción	Dimensión de la tubería	Presión de diseño	Temperatura de diseño
E1-L-08	Tubo alimentador de polvo de lechada.	n.a.	n.a.	n.a.
E1-L-10	Tubería de recirculación de la lechada.	50 mm	2 bar	Ambiente
E1-L-11	Tubo de descarga de lechada en el bidón de desechos.	50 mm	2 bar	Ambiente
E1-L-12	Tubo de retorno de la lechada al mezclador.	50 mm	2 bar	Ambiente
E1-L-13	Tubo alimentador de agua de proceso.	15 mm	2 bar	Ambiente (<12 °C)
E1-L-14	Tubo de suministro de agua de proceso al mezclador de lechada.	15 mm	2 bar	Ambiente (<12 °C)
E1-L-17	Respiradero.	50 mm	2 bar	Ambiente

CUADRO 5.18. LISTA DEL EQUIPO PARA EL MÓDULO E1-ENCAPSULAMIENTO (cont.)

Válvulas			
Identificador	Descripción	Dimensión	Clase de válvula
E1-V-05	Válvula de control del suministro de agua de proceso al mezclador de lechada.	15 mm	Válvula esférica (bridada)
E1-V-06	Válvula de control del suministro de agua de proceso a la bomba de inyección de lechada.	15 mm	Válvula esférica (bridada)
E1-V-07	Válvula de control de la descarga de lechada en el contenedor de desechos.	50 mm	Válvula de estrangulación (bridada)
E1-V-08	Válvula de control del retorno de la lechada al mezclador.	50 mm	Válvula de estrangulación (bridada)

Nota: Las tuberías y válvulas serán de plástico, caucho o acero inoxidable.

5.10.5. Módulo E1 — Descripción del equipo

El Módulo E1 para el proceso de encapsulamiento comprende lo siguiente:

- a) Un contenedor para el encapsulamiento de desechos sólidos, E1-E-12, consistente en un bidón de 200 L de acero dulce o acero inoxidable con:
 - i) Una jaula interna de apoyo de malla de acero reforzado (como la que se utiliza para el hormigón armado en el sector de la ingeniería civil) y alambre de fijación (figura 5.33). Esto ayudará a mantener los desechos en la parte central del bidón y puede evitar el desplazamiento ascendente de los desechos más ligeros.
 - ii) Para los desechos de actividad más alta, posiblemente un revestimiento anular interno de hormigón prefabricado que distancie los desechos de las paredes y proporcione un blindaje adicional.

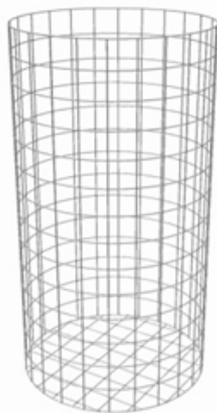


Fig. 5.33. Malla de acero reforzado.

- b) Un equipo mezclador de lechada patentado como el que se ilustra en la figura 5.32:
 - i) El elemento principal del mezclador coloidal es el molino coloidal, E1-E-11, que comprende un rotor de alta velocidad de 2100 r/min, con una cámara acoplada y ajustada inmediatamente por debajo de la vasija del mezclador, todo ello en hierro fundido. El molino coloidal de alta velocidad actúa también como bomba centrífuga con un caudal nominal de hasta 700 L/min a 200 kPa (2 bar).
 - ii) El tanque de mezcla de la lechada, E1-E-10, de acero dulce revestido con epoxi, tiene una capacidad nominal de 150 L. Dentro del tanque se encuentra un cono que distribuye uniformemente el cemento en polvo premezclado en el agua en circulación.
 - iii) Un sistema de tuberías de descarga de la lechada, E1-L-10, E1-L-11 y E1-L-12, de 50 mm de diámetro nominal y de acero, permite ya sea la recirculación por bombeo o la descarga por medio de dos válvulas de estrangulación, E1-V-07 y E1-V-08, que están conectadas y se manejan con una misma palanca. La corriente en recirculación se divide en dos partes y entra en la vasija tangencialmente para mejorar el proceso de mezcla.
 - iv) Un tubo alimentador de agua de proceso, E1-L-13, de 15 mm de diámetro nominal, de plástico y dotado de una válvula esférica de cierre, E1-V-05, entra en la parte superior de la vasija, mientras que un segundo tubo, E1-L-14, provisto también de una válvula de cierre, E1-V-06, suministra agua directamente al molino coloidal, en la base de la vasija.
 - v) El equipo de mezcla está montado en un armazón transportable, con patas regulables para la nivelación.
- c) Debería existir un medio para aislar eléctricamente el equipo eléctrico del módulo antes del mantenimiento, por ejemplo, un aislador eléctrico.
- d) Debería existir un medio para detener todo el equipo eléctrico del módulo en caso de emergencia.
- e) Todo el equipo eléctrico de la plataforma debería tener el grado de protección IP adecuado para permitir el lavado a fondo de la planta y el equipo (por ejemplo, un grado de protección IP54).

5.10.6. Módulo E1 — Consideraciones relativas a la instalación

- a) Este módulo podría situarse junto al Módulo B6–Solidificación, para compartir el equipo de enlechado. También podría funcionar junto a la cabina sin blindaje (Módulo D3) para reducir al mínimo el transporte de desechos.
- b) El mezclador de lechada podría ubicarse en un edificio o un contenedor ISO de altura máxima, o estar montado sobre ruedas para su desplazamiento entre el módulo de encapsulamiento (E1) y el módulo de solidificación (B6).
- c) Tendrá que haber zonas de almacenamiento para los bidones de desechos sin tratar, los bidones de desechos curados y los bidones de desechos encapsulados, cada una de ellas con capacidad para cinco bidones de 200 L.
- d) La zona de curado es el lugar donde se dejan los bidones solidificados para el proceso de curado, que suele durar 24 h. Típicamente, se almacenarán juntos, para el curado, los cinco bidones producidos en un día de funcionamiento. La zona de curado debería estar provista de una bandeja de goteo, E1-E-15, capaz de retener hasta el 110 % del volumen total de líquidos que contenga (un máximo de cinco bidones).
- e) Deberán adoptarse disposiciones para la recepción y el almacenamiento de cementos en polvo, ya que se podrán utilizar pequeñas cantidades, por ejemplo sacos de 25 kg de cemento Portland ordinario (OPC) y ceniza de combustible pulverizado, para el enlechado y el recubrimiento de los bidones.
- f) Los desechos tratados y sin tratar deberían almacenarse en zonas separadas. Los contenedores deberán estar marcados con identificadores exclusivos para facilitar su identificación.
- g) Se recomienda utilizar agua enfriada a temperaturas de entre 4 °C y 10 °C. De este modo, el curado de la lechada preparada no será demasiado rápido.

- h) Se requerirá una vía adecuada de descarga de desechos no radiactivos para las aguas del lavado del mezclador de lechada.
- i) La manipulación manual de los bidones se efectuará con ayuda de un carrito de transporte de bidones patentado, por ejemplo un portapalés manual.
- j) Se requerirá una horquilla elevadora con un dispositivo de enganche de bidones para mover los contenedores enlechados.
- k) Se precisará un suministro de agua para el lavado a fondo de la planta y el equipo, por ejemplo antes del mantenimiento.

5.10.7. Módulo E1 — Requisitos

- a) Deben existir barreras y/o controles adecuados para gestionar el acceso del personal a la zona de procesamiento.
- b) El operador o los operadores deberán llevar equipo de protección personal adecuado, por ejemplo, un mono, calzado protector, gafas de seguridad o máscara y guantes.
- c) Habrá que realizar ensayos piloto para desarrollar y demostrar las propiedades de la lechada utilizando los cementos en polvo disponibles (cenizas de combustible pulverizado y OPC). El equipo requerido para los ensayos piloto comprenderá lo siguiente:
 - i) muestras de cementos en polvo;
 - ii) medios de medición del par de torsión/la viscosidad;
 - iii) medios de medición de la temperatura;
 - iv) muestras de materiales inactivos;
 - v) un medidor del flujo de la lechada.
- d) Los desechos no comprimibles deberían llegar al módulo de encapsulamiento listos para el enlechado (por ejemplo, el material de desecho más ligero podrá estar retenido en una malla dentro del bidón para evitar su desplazamiento ascendente).
- e) El cemento en polvo será una formulación premezclada que tenga las propiedades físicas y químicas adecuadas (véase más arriba). Es importante que no haya errores en la formulación, porque la recuperación es muy difícil en la práctica.
- f) Un técnico de laboratorio o un químico deberá tomar y analizar muestras del cemento de vez en cuando.
- g) Un supervisor de protección radiológica deberá vigilar las operaciones, con inclusión de la recepción y el despacho de los contenedores de desechos.
- h) Se precisará un monitor de mano para vigilar los niveles de radiación emitidos por los bidones de desechos entrantes y por los bidones de desechos terminados.
- i) Se requerirá equipo de ensayo para tomar y analizar muestras de la lechada de cemento de vez en cuando.
- j) Tendrá que haber un bidón para recoger las aguas del lavado del equipo de mezcla de lechadas. Las lechadas fraguan y se solidifican dentro de los bidones, de modo que el agua presente podrá decantarse y descargarse en un desagüe adecuado para efluentes de proceso inactivos.
- k) Se necesitará un espacio de almacenamiento para las piezas de recambio, los cementos en polvo, los bidones de desechos vacíos y la malla reforzada.
- l) Se requerirán cortaalambres para cortar la malla reforzada, y tenazas para torcer los alambres y dar a la malla la forma requerida a fin de obtener ‘cestas’ que contengan los desechos dentro del bidón.

5.10.8. Módulo E1 — Descripción y funcionamiento del proceso

- a) Transportar hasta la tolva (situada justo encima del mezclador de lechada) el cemento requerido para producir la lechada, que habrá sido pesado y premezclado por los operadores. Retirar la tapa de la tolva y verter manualmente en ella los cementos en polvo premezclados (si los polvos no

- estuvieran premezclados, deberá descargarse primero la ceniza de combustible pulverizada y luego el OPC). Tapar nuevamente la tolva.
- b) Añadir un volumen de agua conocido al tanque de agua enfriada de la unidad correspondiente. A continuación, bombear el agua de ese tanque a la vasija del mezclador de lechada E1-E-10. Poner el mezclador en modo de reciclado abriendo la válvula de reciclado E1-V-08 y poniendo en marcha el molino coloidal E1-E-11.
 - c) El cemento premezclado se descargará en el mezclador de lechada a través de un breve transportador de tornillo sin fin, poniendo en marcha el mezclador para que comience a mezclar el cemento, los aditivos y el agua.
 - d) Una vez terminada la mezcla, al cabo de unos 15 a 25 minutos, según la potencia de la unidad mezcladora (la superficie del vórtice tendrá un aspecto liso y uniforme), será importante que la lechada siga circulando para evitar el depósito de los constituyentes más pesados en el fondo de la vasija.
 - e) Tomar una muestra y hacer una prueba del flujo para verificar que la fluidez de la lechada esté dentro del intervalo requerido.
 - f) Una vez lista la lechada, el mezclador podrá bombearla al bidón de desechos de manera controlada, a través del conducto de descarga. Utilizando la palanca, abrir la válvula E1-V-07 y simultáneamente cerrar la E1-V-08, procediendo de forma gradual para limitar la entrada de lechada al bidón. En la descarga controlada de la lechada para el encapsulamiento y el recubrimiento, la tasa de bombeo debería ser de aproximadamente 20 L/min (una pequeña fracción de la plena capacidad de la bomba), para obtener una buena penetración en torno a los desechos no compactables.
 - g) Es importante no llenar completamente el bidón de 200 L en esta etapa, ya que, una vez concluido el curado de ese primer vertido, deberá añadirse una cubierta de lechada. Esto se debe a que la lechada del vertido inicial puede captar una parte de la actividad de los desechos a medida que sube por el bidón, pudiendo arrastrar contaminación hasta la parte superior de la lechada. Una capa no activa sellará este primer vertido, y es una buena práctica para el caso de un fallo de la tapa del bidón en un accidente. Un volumen de entre 10 y 15 litros de lechada debería bastar para recubrir la parte superior del bidón de desechos encapsulados. Poner nuevamente el mezclador de lechada en modo de reciclado y, utilizando la palanca, abrir la válvula E1-V-08 y simultáneamente cerrar la E1-V-07.
 - h) Dejar que la lechada fragüe. Cuando haya fraguado, utilizar una carretilla de horquilla elevadora con el dispositivo de enganche adecuado para retirar el bidón encapsulado del módulo y transportarlo a la zona de curado, donde permanecerá hasta el día siguiente.
 - i) Verificar que el curado ha terminado.
 - j) Con ayuda de la horquilla elevadora, colocar nuevamente el bidón curado en la bandeja de goteo del módulo, y preparar y añadir un segundo vertido de entre 10 y 15 litros de lechada en la parte superior del bidón. Llevar el bidón de vuelta a la zona de curado y dejarlo allí hasta el día siguiente.
 - k) Tapar nuevamente el bidón.
 - l) Limpiar el equipo mezclador de lechada con agua de proceso y vaciar esta agua en el bidón reservado para ese fin.
 - m) Los operadores deberán monitorizar el bulto de desechos completo y verificar que la tasa de dosis en su superficie cumpla los requisitos para el transporte y los criterios de aceptación de desechos para el almacenamiento y/o la disposición final.

5.10.9. Módulo E1 — Inconvenientes del proceso

- a) El equipo es caro en comparación con la mezcla a mano o con una hormigonera de tambor giratorio.
- b) Se requerirá una vía de descarga de desechos no radiactivos para las aguas del lavado del mezclador de lechada.
- c) Los desechos no son recuperables.
- d) Las operaciones deberán realizarse en una zona bien ventilada, debido al riesgo de inhalación de cemento en polvo.

5.10.10. Módulo E1 — Requisitos de interconexión e integración

Las posibilidades de interconexión de este módulo de proceso comprenden lo siguiente:

- a) Los sólidos filtrados recogidos en el Módulo B5–Filtración pueden tratarse como desechos sólidos no compactables.
- b) En lo posible, el Módulo E1–Encapsulamiento debería funcionar conjuntamente con el Módulo D3–Cabina sin blindaje.

La integración con otros módulos de proceso comprende:

- i) el uso después de la segregación de los desechos y el reembalaje de las fuentes de baja actividad en el Módulo D3–Cabina sin blindaje (que puede ser una campana de gases o una caja de guantes);
- ii) el uso después del Módulo B6–Solidificación para colocar la cubierta de lechada.

Este módulo es adecuado para encapsular también otras corrientes de desechos, tales como:

- las fuentes selladas en desuso;
- los cadáveres de animales;
- los bidones de desechos líquidos solidificados del Módulo B6, a los que podrá añadir una cubierta de lechada.

Cabe señalar aquí que el encapsulamiento de fuentes selladas en desuso mediante la mezcla con una lechada constituye un acondicionamiento irreversible y debería tomarse en consideración solo para las fuentes que puedan ser aceptadas en una instalación de disposición final operativa. En general, las fuentes de período largo y las fuentes de actividad más alta requerirán una disposición final en un pozo barrenado o en una instalación geológica profunda, en que los requisitos de aceptación pueden comprender la posibilidad de recuperación y reacondicionamiento de las fuentes en el futuro. Cuando el tamaño y la actividad lo permitan, estas fuentes podrán colocarse en un cofre blindado y luego dentro de un bidón de acero revestido de hormigón, de 200 L, debidamente cerrado. En este caso, el mezclador de lechada podrá utilizarse para preparar el revestimiento de hormigón dentro del bidón siguiendo los procedimientos expuestos en otras publicaciones del OIEA.

5.11. MÓDULO L4–CELDA CALIENTE

5.11.1. Módulo L4 — Consideraciones generales

Las fuentes radiactivas selladas tienen aplicaciones en muchos usos agrícolas, industriales y médicos, así como en otros ámbitos de la investigación técnica y científica. Algunos de estos ámbitos y aplicaciones requieren altos niveles de radiactividad. Como ejemplos de equipos que contienen fuentes radiactivas selladas cabe mencionar los irradiadores industriales, los aparatos de teleterapia, los irradiadores de investigación, el equipo de radiografía industrial, el equipo de braquiterapia, el equipo de diagrafía nuclear y algunos medidores industriales.

La manipulación de fuentes selladas en desuso de actividad alta exige el uso de una celda caliente dotada de dispositivos de manipulación a distancia, ventilación y otros sistemas auxiliares. Esas celdas calientes pueden diseñarse con una configuración ya sea estacionaria o móvil. La información sobre el diseño presentada en esta sección se refiere a la instalación de acondicionamiento de fuentes selladas en desuso (de actividad alta) del OIEA, una celda caliente móvil que se puede desmontar, embalar y transportar al lugar en que se necesite [5.2 a 5.4]. El desarrollo y el despliegue de esta instalación se han realizado en cooperación con la South African Nuclear Energy Corporation (Necsa). La instalación consta de un escudo biológico, con una ventana para ver el trabajo realizado en su interior. Utiliza manipuladores

maestro-esclavo (MSM) y una grúa interna para manipular e izar diversos objetos dentro de la celda. También hay una grúa en el exterior, para introducir o retirar objetos pesados del escudo biológico. Un sistema de ventilación mantiene una presión negativa dentro de la celda para contener la propagación de la posible contaminación. El contenedor de almacenamiento de la fuente a largo plazo se acoplará a la pared del escudo biológico para facilitar la retirada segura de las fuentes de la celda. La figura 5.34 muestra una instalación de celda caliente móvil montada en un emplazamiento.



Fig. 5.34. Instalación de acondicionamiento de fuentes selladas en desuso montada en un emplazamiento.

5.11.2. Módulo L4 — Base de diseño

La base de diseño resumida en el cuadro 5.19 indica los principales parámetros y supuestos utilizados para determinar el diseño de este módulo de procesamiento.

CUADRO 5.19. BASE DE DISEÑO DEL MÓDULO L4–CELDA CALIENTE

Características de los desechos iniciales (fuentes radiactivas selladas en desuso de actividad alta)

Volumen total de desechos	Hasta 20 fuentes por año.
Llegada	n.a.
Tasa máxima de procesamiento	1 o 2 fuentes por día.
Contenido de actividad de los desechos iniciales	La naturaleza de los radionucleidos utilizados y su cantidad dependerán del fin al que haya estado destinada la fuente. Aunque la mayoría de las fuentes tienen una actividad relativamente baja, algunas son de actividad alta o muy alta.
Forma física	Materiales radiactivos ya sea: a) permanentemente sellados en una cápsula, o b) fuertemente consolidados y en forma sólida. Típicamente, la cápsula o los materiales de una fuente sellada serán suficientemente resistentes para garantizar la estanqueidad en las condiciones de uso y las condiciones previstas en el diseño, así como durante cualquier accidente previsible.

CUADRO 5.19. BASE DE DISEÑO DEL MÓDULO L4–CELDA CALIENTE (cont.)

Características de los desechos iniciales (fuentes radiactivas selladas en desuso de actividad alta)	
Contenido de sólidos	La fuente es un cuerpo sólido.
Contenido de sustancias químicas	Sin contenidos significativos de sustancias químicas.
Características del efluente tratado	
Contenido de actividad de la descarga	n.a.
pH	n.a.
Otros componentes	La cubierta original de la fuente puede eliminarse separadamente como material no radiactivo.
Disponibilidad de servicios	
Servicios	Los diseños esquemáticos deberían indicar las opciones de conexión a los servicios existentes o la necesidad de servicios especiales.
Agua	Necesaria.
Electricidad	Necesaria.
Calefacción del edificio	Según sea necesario para la comodidad de los operadores.
Calefacción, ventilación y aire acondicionado	Necesarios.
Reactivos químicos	No necesarios.
Drenaje	No necesario.

5.11.3. Módulo L4 — Descripción del equipo

5.11.3.1. Escudo biológico

Esta es la pared de la celda caliente, que protege a los operadores, el público y el medio ambiente de la radiación ionizante e impide la propagación de la contaminación. Típicamente, estará diseñada para trabajar con niveles de radiación de hasta el equivalente de una fuente de ^{60}Co de 1000 Ci por vez. El escudo biológico comprende una plataforma para montar manipuladores maestro-esclavo, una grúa interna, un sistema de ventilación y una abertura para la transferencia de fuentes, entre otros elementos.

El escudo biológico está constituido por una cavidad de 1,55 m de ancho, contenida entre dos paredes de acero dulce y rellena con arena como material de blindaje. Este material debería tener una densidad de por lo menos 1,6 kg/L. Esta densidad reduce la radiación de una fuente de 1000 Ci situada en el interior a 0,03 mSv/h medidos en la superficie de la pared externa. El volumen útil del escudo biológico es de 2,5 m de longitud, 1,6 m de anchura y 3,0 m de altura. En la figura 5.35 se presenta una vista en corte del escudo biológico.

Todas las juntas de los paneles de encofrado adyacentes están rellenas de sellante de silicona para obtener superficies lisas y herméticas. La superficie interna del escudo biológico está tratada con pintura de epoxi para facilitar la descontaminación.

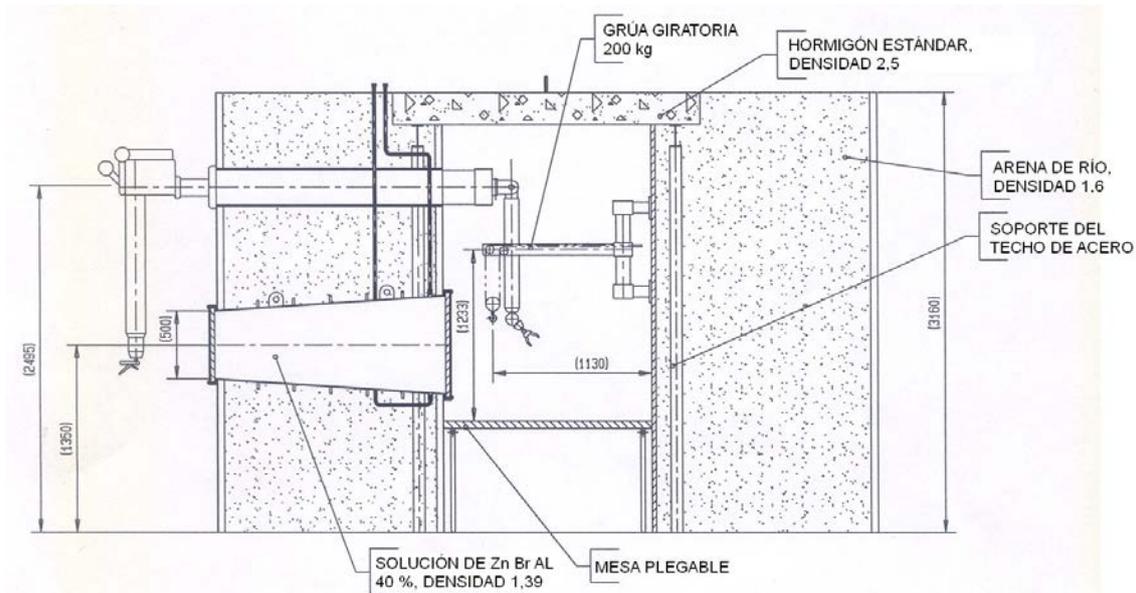


Fig. 5.35. Vista en corte del escudo biológico.

5.11.3.2. Mesa de trabajo

Una mesa, que abarca todo el espacio interno de la celda a 800 mm del piso, ofrece una superficie de trabajo. La mesa está indicada en la figura 5.35. Su altura debería ser regulable para obtener una mejor vista de la zona de trabajo. Durante las operaciones, la mesa debería estar cubierta con un revestimiento plástico para facilitar la descontaminación. Los manipuladores tendrán acceso a cualquier punto de la superficie de trabajo.

5.11.3.3. Techo del escudo biológico

El techo consta de tres losas de hormigón de 23 cm de grosor con protectores esquineros de acero dulce y barras de refuerzo estándar. El hormigón proporciona blindaje y reduce la radiación de cielo. El techo reduce esta radiación de una dosis efectiva equivalente de 0,215 mSv/h a 0,036 mSv/h para los operadores de la instalación. El peso total del techo es de 4 t aproximadamente. Esto significa que cada losa pesa alrededor de 1,3 t, bastante menos que las 2 t de capacidad de izaje nominal de la grúa.

5.11.3.4. Ventana

La ventana de policarbonato proporciona un blindaje equivalente al que ofrecen las paredes del escudo biológico (figura 5.36). La ventana está situada de modo que el operador pueda ver la zona de operaciones estando de pie.

La ventana se compone de un espacio interno lleno de un líquido pesado transparente, circundado por paneles transparentes. Para que esta ventana de la misma profundidad que la cavidad proporcione el mismo grado de blindaje, el líquido de blindaje debe ser una solución de bromuro de cinc al 40 %. La solución reduce la dosis emanante de una fuente de 1000 Ci situada dentro del escudo biológico a una dosis efectiva equivalente de 0,062 mSv/h en la pared externa. Una cortina plomada en la parte inferior de la ventana proporcionará un blindaje adicional en caso de que la arena se asiente y cree vacíos por los que pueda fluir la radiación.

La ventana tiene dos paneles transparentes a través de los cuales se ve la celda. Estos son paneles de policarbonato irrompibles. La ventana se instala vacía y se llena luego con una solución de bromuro de zinc a través del tubo de llenado. Para vaciarla, la solución de blindaje se drena utilizando un sifón al que

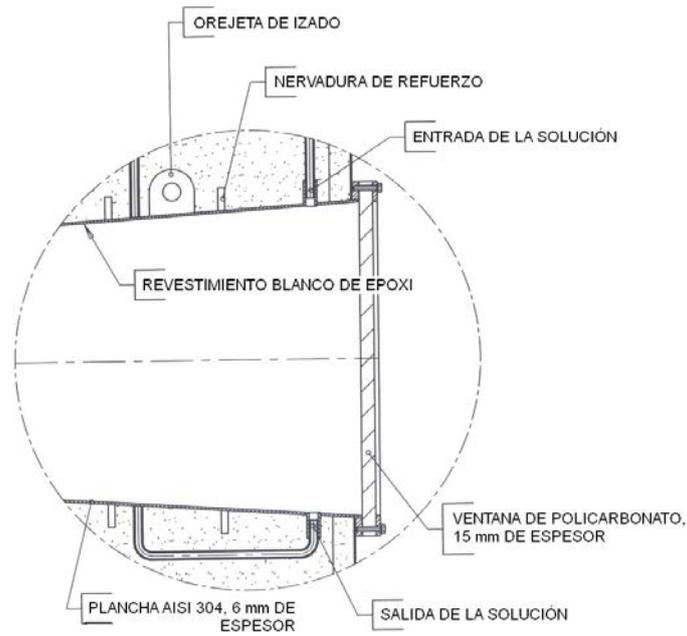


Fig. 5.36. Bosquejo de la ventana de visualización.

se accede desde lo alto del escudo biológico. La ventana está sostenida por un conjunto de dos paneles de encofrado hechos a medida a cada lado de la pared del escudo biológico.

5.11.3.5. Manipuladores maestro-esclavo

La principal función de los manipuladores maestro-esclavo es realizar el desmantelamiento final del blindaje de trabajo para exponer la fuente sellada desprotegida. Los manipuladores abarcan toda la superficie de la celda, de modo que pueden manipular objetos que se encuentren en cualquier lugar de esta hasta una altura de 1,2 m sobre la mesa de trabajo (figura 5.37).

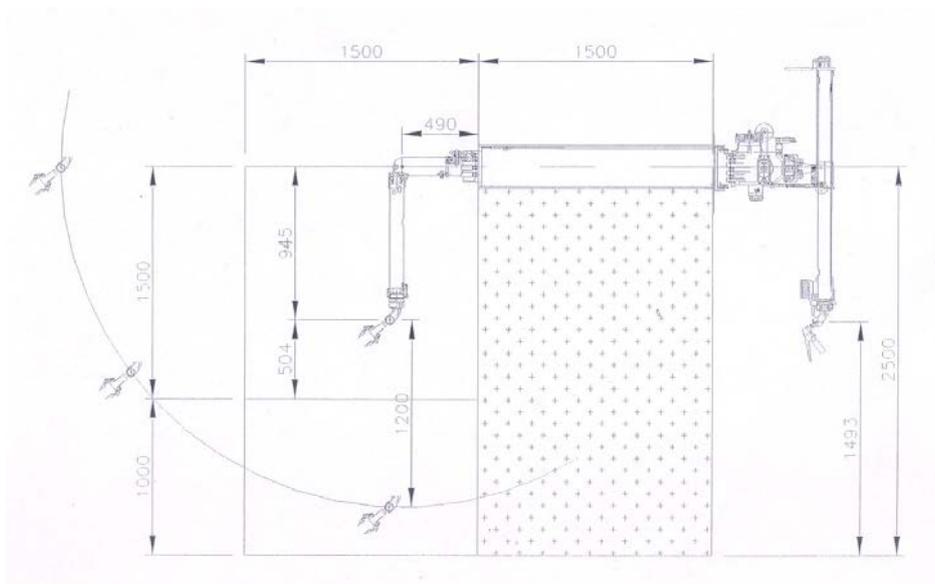


Fig. 5.37. Manipuladores maestro-esclavo telescópicos.

Los MSM telescópicos son capaces de levantar pesos de hasta 20 kg. Es necesario introducir algunas modificaciones para que el tubo de la pared atraviese los 1,5 m de espesor del escudo biológico. Estos manipuladores deberían suministrarse con fundas para la estanqueidad, y pueden desmontarse fácilmente en sus tres componentes para el transporte.

5.11.3.6. Grúa interna

Una grúa interna eleva los objetos que son demasiado pesados para los manipuladores maestro-esclavo. Esta grúa debe tener el mayor alcance posible, especialmente en la parte posterior de la celda, donde se realizará la mayor parte del trabajo. Es una grúa giratoria montada en la pared interna del escudo biológico. Su brazo tiene una rotación de 180° en torno al punto de sujeción. El dispositivo de izaje de la grúa, accionado eléctricamente, recorre toda la longitud del brazo. La altura de izaje total es de 1,2 m sobre la mesa de trabajo. La capacidad de esta grúa es de 200 kg.

5.11.3.7. Grúa externa

La finalidad principal de la grúa externa es levantar objetos pesados, como los blindajes de trabajo de las fuentes, para introducirlos en el escudo biológico y retirarlos de él. Esta grúa se utiliza también durante el montaje del escudo biológico y de la ventana, y para la colocación de las losas del techo.

La grúa externa es una grúa pórtico como la que se ilustra en la figura 5.38. Cuatro grandes ruedas de caucho permiten su desplazamiento sobre superficies planas. El dispositivo de izaje tiene una capacidad de 2 t. Se desplaza a lo largo del puente mediante un sistema motorizado de piñón y cremallera. La grúa necesita una altura libre de 5,5 m. Tiene una altura de izaje de 3,9 m sobre el suelo, lo que le da un espacio de trabajo de 750 mm sobre el escudo biológico.

La grúa externa debería tener instalado un trinquete que permita situarla exactamente sobre el punto deseado.

5.11.3.8. Sistema de ventilación

El sistema de ventilación cumple la finalidad de evitar que la contaminación migre hacia fuera del escudo biológico manteniendo una presión negativa dentro de la celda. Todas las fuentes posibles

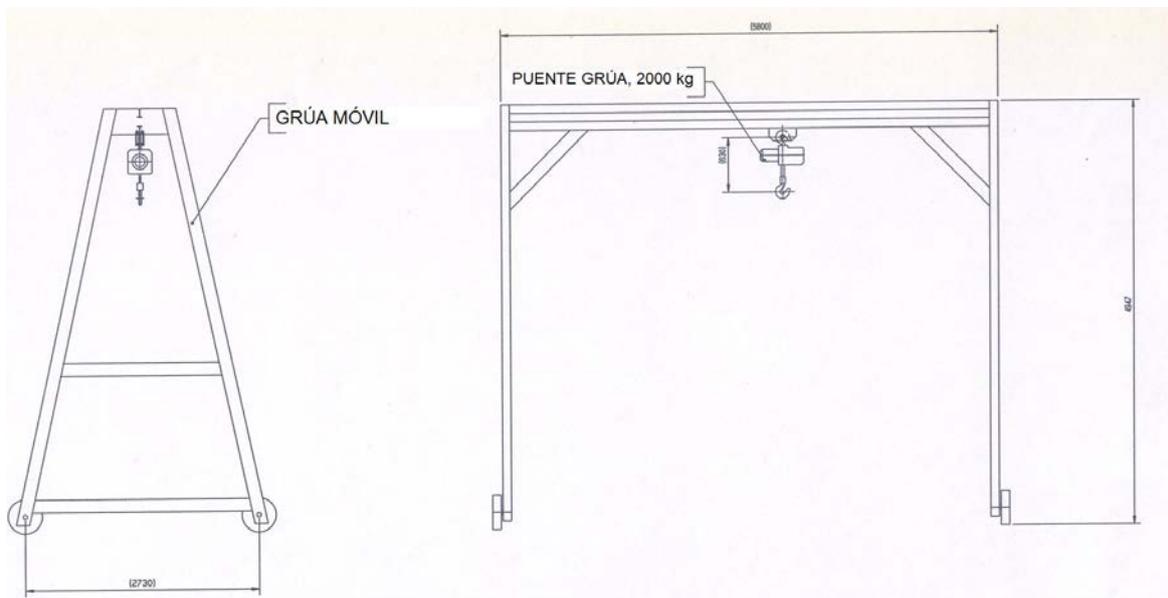


Fig. 5.38. Grúa externa.

de contaminación aerotransportada quedarán atrapadas en los filtros HEPA de la salida al exterior. El personal que trabaje dentro del escudo biológico no necesitará ventilación, ya que el techo estará abierto en esa etapa. Por consiguiente, la ventilación está prevista para los escenarios de accidentes en que haya fuentes con fugas.

El sistema de ventilación es un sistema autónomo acoplado al escudo biológico por medio de un conducto diseñado especialmente para ese fin (figura 5.39). Consiste en 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.

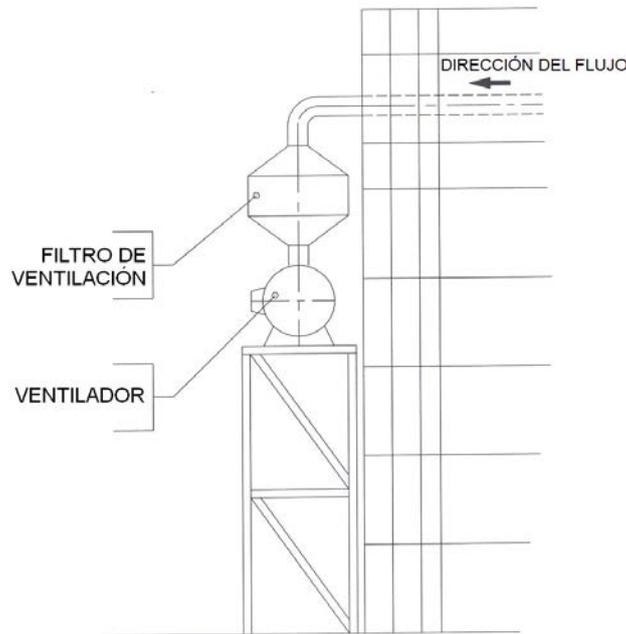


Fig. 5.39. Sistema de ventilación de la instalación móvil de acondicionamiento en celda caliente.

Además del equipo descrito e ilustrado más arriba, debería preverse lo siguiente:

- a) Equipo de soldadura totalmente automático.
- b) Equipo para ensayos de estanqueidad.
- c) Equipo de protección radiológica.
- d) Equipo de carga de arena.
- e) Herramientas para desmantelar los cabezales de teleterapia, construir y desarmar el escudo biológico, y otras aplicaciones generales.
- f) Un contenedor de transporte, modificado y adaptado para el transporte de la instalación.
- g) Vibradores.
- h) Una aspiradora.
- i) Luces de emergencia alimentadas por acumuladores, instaladas dentro del escudo biológico para el caso de que falle el alumbrado principal. Habrá dos cámaras de circuito cerrado instaladas dentro de la celda y conectadas con dos monitores independientes en el exterior.
- j) Un suministro de electricidad con suficiente redundancia.
- k) Un cofre blindado de almacenamiento a largo plazo:
 - i) El cofre blindado de almacenamiento a largo plazo es un contenedor basado en el diseño del contenedor de transporte de fuentes F147 de MDS Nordion o compatible con él. El contenedor

se acopla a la abertura de transferencia del escudo biológico, y su cajón de acogida de la fuente se abre hacia el interior de la celda. Cuando se ha cargado en él la fuente, el cajón se retrae hacia el cofre blindado. Este tiene un mecanismo de cierre que dificulta muchísimo el acceso no autorizado a la fuente almacenada. Para abrirlo una vez introducida la fuente, hay que tener conocimientos especiales y una autorización. La figura 5.40 muestra un bosquejo del cofre blindado de almacenamiento a largo plazo, con el cajón en la posición de carga dentro de la celda.

- ii) El cofre blindado tiene cuatro cajones capaces de contener fuentes con una actividad total de alrededor de 10 kCi. La tasa de dosis de la superficie externa del cofre blindado no debería exceder de 2,0 mSv/h.
- iii) El cofre puede acoger dos o tres fuentes de teleterapia y entre cinco y diez lápices irradiadores de sangre. Estos últimos deben caber en el cajón en posición horizontal.

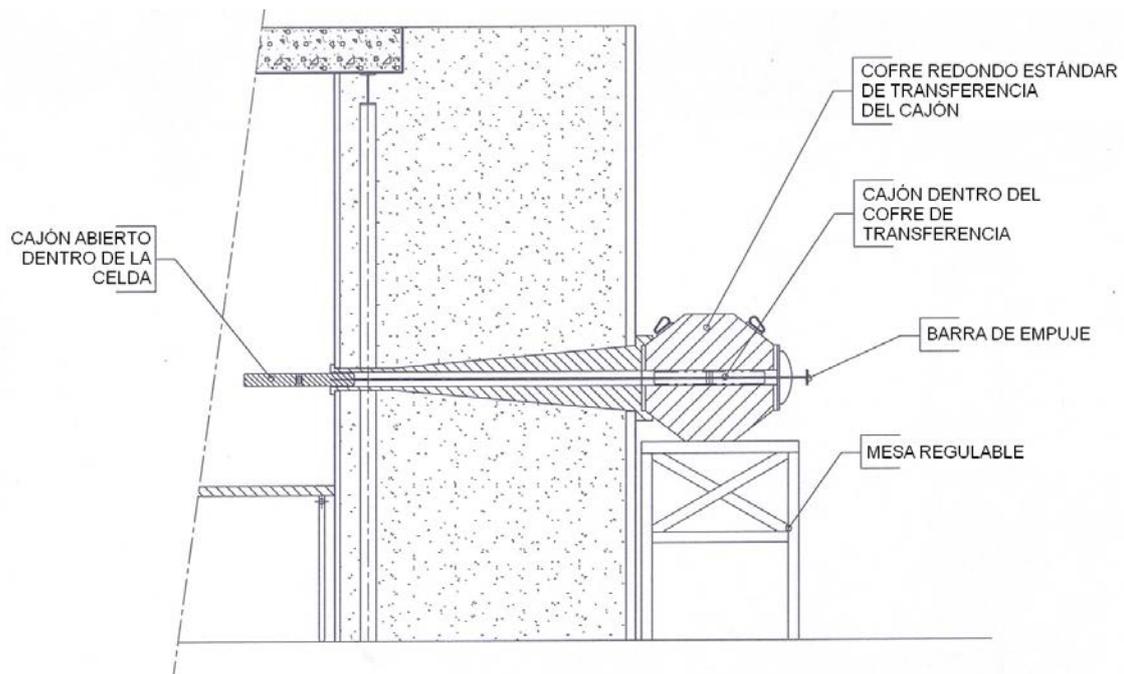


Fig. 5.40. Cofre blindado de almacenamiento a largo plazo acoplado a la abertura de transferencia.

5.11.4. Módulo L4 — Descripción y funcionamiento del proceso

Las necesidades de operadores o técnicos son las siguientes:

- a) una persona capacitada en seguridad radiológica a cargo del control administrativo en el lugar de almacenamiento temporal de la instalación de acondicionamiento;
- b) una persona capacitada en el uso de los manipuladores maestro-esclavo y en las operaciones de izaje.

5.11.4.1. Montaje de la instalación de acondicionamiento

La instalación de acondicionamiento debería montarse dentro de un edificio con una altura libre de por lo menos 5,2 m. El piso del edificio debe ser resistente y plano. La ubicación adecuada para la instalación de acondicionamiento debería determinarse en una misión preliminar a la entidad de acogida.

El escudo biológico es modular y debería ensamblarse principalmente a mano, con ayuda de la grúa pórtico externa. La carga del material de blindaje en la cavidad del escudo biológico debería ser manual. Se requerirán alrededor de 90 m³ de arena para el blindaje.

5.11.4.2. Extracción de la fuente de su blindaje de trabajo

Un supervisor de protección radiológica debería vigilar esta operación en todo momento.

El *blindaje de trabajo* de la fuente debería desmantelarse parcialmente fuera del escudo biológico para soltar los pernos de sujeción, y luego introducirse en el escudo biológico a través del techo abierto con ayuda de la grúa externa. Allí, los operadores verificarán que todas las conexiones y todos los pernos de sujeción y tuercas estén suficientemente sueltos para poder desmantelarlo utilizando los manipuladores.

Una vez cerrado el techo, se procederá al desmantelamiento final del blindaje de trabajo. Tras verificar que no tenga fugas, la fuente se recuperará, encapsulará y transferirá al contenedor de almacenamiento.

5.11.4.3. Colocación de la fuente en un contenedor a largo plazo

El contenedor de almacenamiento debería estar acoplado a la abertura de transferencia de fuentes por la parte exterior del escudo biológico. Este acoplamiento, que se realiza antes del desmantelamiento final del blindaje de trabajo, debe ser hermético a la radiación.

Para transferir la fuente a este contenedor, se empujará el cajón hacia el interior de la celda a través de la abertura de transferencia. Una vez colocada y asegurada la fuente dentro de él, el cajón se retraerá hacia el contenedor de almacenamiento.

5.11.5. Otras consideraciones operacionales

- a) Como se mencionó anteriormente, deberá haber una persona capacitada en seguridad radiológica que esté a cargo del control administrativo del lugar de almacenamiento temporal. Para ello debería establecerse un plan escrito que exija, como mínimo, lo siguiente:
 - i) controles de los sistemas de seguridad física de la zona de almacenamiento;
 - ii) las pruebas especiales que sean necesarias para verificar la integridad del contenedor de la fuente;
 - iii) ensayos de frotis, reconocimientos radiológicos y pruebas de funcionamiento de los monitores de radiación;
 - iv) comprobaciones de la presencia y legibilidad de todas las señales y etiquetas;
 - v) comprobaciones de que todas las personas autorizadas a entrar en la zona de almacenamiento estén debidamente capacitadas;
 - vi) esfuerzos para reducir al mínimo el período de almacenamiento temporal;
 - vii) esfuerzos para lograr que no haya vacíos de responsabilidad en caso de cambios del personal o de la propiedad de la instalación.
- b) La información de la documentación conservada para cada fuente que se encuentre en almacenamiento temporal debería incorporarse al inventario nacional de fuentes selladas.
- c) Toda la documentación oficial relativa a la fuente y al dispositivo deberá conservarse para su consulta y traspaso cuando la fuente se traslade a un almacenamiento provisional. La documentación debería mantenerse en un lugar evidente, pero seguro y bajo control. Como mínimo, debería incluir lo siguiente:

- i) el certificado de la fuente u otra información pertinente sobre esta;
- ii) los procedimientos para la manipulación de la fuente, como las instrucciones para su carga y descarga;
- iii) la indicación de los contenedores de expedición y almacenamiento adecuados;
- iv) dibujos y otra información técnica sobre la fuente y el dispositivo;
- v) información sobre los controles administrativos realizados durante el almacenamiento.

REFERENCIAS DE LA SECCIÓN 5

- [5.1] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Reglamento para el Transporte Seguro de Materiales Radiactivos, Colección de Normas de Seguridad del OIEA N° TS-R-1*, OIEA, Viena, 2005.
- [5.2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Management of Spent High Activity Radioactive Sources (SHARS)*, IAEA-TECDOC-1301, IAEA, Vienna (2002).
- [5.3] POTIER, J.-M.; AL-MUGHRABI, M.; “SHARS: Una solución compartida para las fuentes radiactivas peligrosas”, *Boletín del OIEA 49/1*, Viena 2007.
- [5.4] LIEBENBERG, G., AL-MUGHRABI, M., “The development of a mobile hot cell facility for the conditioning of spent high activity radioactive sources (SHARS)”, *Waste Management '08 (Proc. Int. Conf. Phoenix)*, (2008).

6. INTEGRACIÓN DE LOS MÓDULOS DE PROCESAMIENTO

En muchos casos, será improbable que los módulos de proceso se utilicen de forma aislada. Como se puede ver en los diagramas de flujo de la gestión de desechos, normalmente se requerirán dos o más módulos de proceso para gestionar una corriente de desechos. Por ejemplo, en el caso de los desechos radiactivos sólidos pueden ser necesarios:

- la cabina sin blindaje (Módulo D3) para recibir, clasificar y segregar los desechos, por ejemplo en materiales compactables y materiales no compactables y fuentes selladas en desuso;
- el compactador de baja fuerza (Módulo D2) para compactar los desechos pertinentes en bidones de 200 L;
- el módulo de encapsulamiento (Módulo E1) para encapsular los desechos no compactables en bidones de 200 L.

Desde el punto de vista de cómo utilizarlos conjuntamente o integrarlos para procesar una determinada corriente de desechos, los módulos de procesamiento conforman tres grupos básicos:

- para procesar corrientes de desechos sólidos es preciso integrar dos o más de los siguientes módulos: la cabina sin blindaje (Módulo D3), el compactador de baja fuerza (Módulo D2) y el módulo de encapsulamiento (Módulo E1);
- para procesar corrientes de altos volúmenes de desechos acuosos es preciso integrar dos o más de las siguientes operaciones: el tratamiento químico (Módulo B1), el intercambio iónico (Módulo B2), la ósmosis inversa (Módulo B3), la filtración de flujo tangencial (Módulo B4), la filtración (Módulo B5) y la solidificación (Módulo B6).

Además, existe un grupo especial de desechos, las fuentes selladas en desuso de actividad alta, que pueden requerir el módulo de celda caliente para el reembalaje antes de su colocación en contenedores blindados especiales.

La integración puede entrañar la ubicación en un mismo lugar físico y el uso secuencial de los módulos de proceso, con los siguientes beneficios:

- la minimización de la doble manipulación de los desechos y, por lo tanto, una reducción de la dosis captada por los operadores;
- un uso más eficiente y eficaz del personal y los recursos, ya que los desechos podrán procesarse en campañas cortas;
- una reducción del almacenamiento provisional de desechos no acondicionados o tratados de forma incompleta, ya que las corrientes de desechos se procesarán desde su forma inicial hasta el acondicionamiento final en una misma campaña.

En las secciones siguientes se describe cómo integrar los módulos de procesamiento.

6.1. MÓDULOS DE PROCESAMIENTO DE DESECHOS SÓLIDOS

A menos que los desechos sólidos lleguen a la instalación de procesamiento y almacenamiento ya clasificados y segregados, será necesario realizar estas dos operaciones. Estas constituyen el propósito fundamental de la cabina sin blindaje, que permite vaciar el contenido de los bultos de desechos en una mesa de clasificación y clasificarlo y segregarlo en función de que se trate de objetos compactables o no

compactables, y también, si es el caso, aislar las fuentes y los contenedores de desechos líquidos para su tratamiento por separado.

Para evitar la doble manipulación de los desechos, el compactador de baja fuerza puede integrarse en la cabina sin blindaje, a fin de ir colocando los desechos clasificados como compactables en un bidón y compactándolos a medida que el bidón se llena. Al mismo tiempo, los desechos no compactables pueden colocarse en un bidón adyacente y, cuando este esté lleno, solidificarse en la misma cabina sin blindaje vertiendo en ellos una lechada bombeada desde el módulo de encapsulamiento.

Así pues, estos tres módulos pueden integrarse para realizar todas las operaciones relativas a los desechos sólidos en un mismo lugar. Los módulos pueden construirse en una estructura existente o en una nueva estructura permanente. Otra posibilidad es instalarlos juntos dentro de un contenedor ISO (figura 6.1).

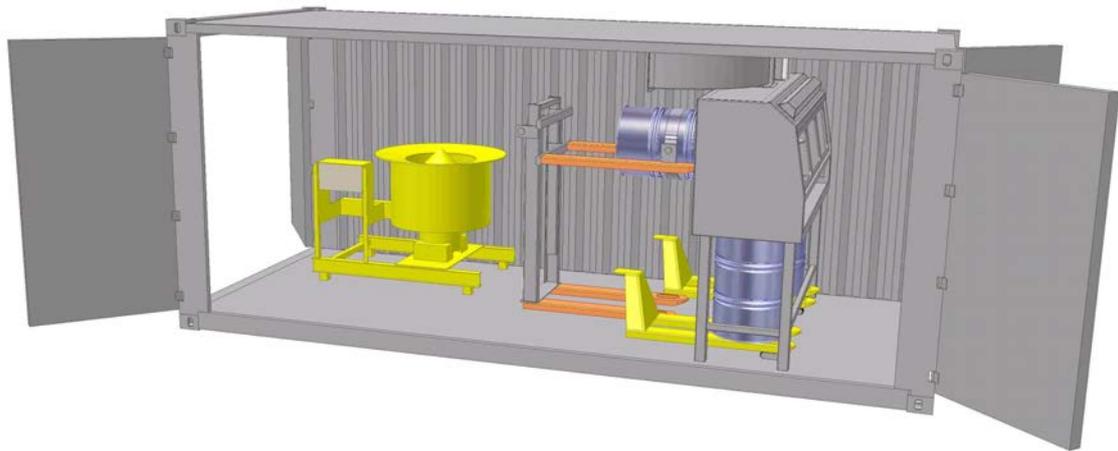


Fig. 6.1. Integración de una cabina sin blindaje, un compactador de baja fuerza y el equipo de encapsulamiento en un contenedor ISO.

En esta imagen, la cabina sin blindaje está situada a lo ancho del contenedor ISO, con acceso por un lado para introducir los bidones de desechos, ponerlos en posición horizontal y empujarlos, con el extremo de la tapa por delante, a través de la abertura del fondo de la cabina. El módulo de encapsulamiento se encuentra por ese mismo lado del gabinete. Un tubo de suministro procedente de este módulo atraviesa la cabina por un tubo guía y puede ser manipulado por el operador para verter la lechada en el bidón correspondiente.

Al otro lado de la cabina, el operador puede acceder al bidón de desechos, retirar la tapa, vaciar el contenido en la zona de clasificación de la cabina y colocar los desechos en el bidón adecuado. El compactador de desechos se acciona desde este lado de la cabina.

La cabina sin blindaje estará ventilada por un pequeño sistema de extracción con filtro. Este sistema puede situarse en un extremo del contenedor.

6.2. MÓDULOS DE PROCESAMIENTO DE BAJOS VOLÚMENES DE DESECHOS LÍQUIDOS ORGÁNICOS Y ACUOSOS

Los módulos para el procesamiento de bajos volúmenes de desechos líquidos orgánicos y acuosos consisten en equipo pequeño, del tipo utilizado en laboratorios, que puede colocarse en una campana de gases patentada con ventilación integrada. La campana de gases puede alojarse a su vez en una estructura permanente ya existente o, como en el caso anterior, instalarse dentro de un contenedor ISO.

6.3. MÓDULOS DE PROCESAMIENTO DE ALTOS VOLÚMENES DE DESECHOS ACUOSOS

Los módulos de procesamiento de altos volúmenes de desechos acuosos pueden utilizarse separadamente o combinados de distintas formas para el tratamiento de este tipo de desechos. Una de las combinaciones más complicadas consiste en la aplicación del tratamiento químico (Módulo B1), seguido de la filtración de flujo tangencial (Módulo B4) y luego del intercambio iónico (Módulo B2), en el caso del líquido, y de la solidificación (Módulo B6), en el de los lodos precipitados en el tratamiento químico y, cuando sea el momento, los medios de intercambio iónico gastados.

La disposición de estos módulos de tratamiento uno junto al otro se ilustra en la figura 6.2. La transferencia del líquido de una etapa de procesamiento a la siguiente se efectúa levantando el contenedor para retirarlo de un módulo y colocarlo en el siguiente.

Otra posibilidad es instalar el equipo de tratamiento en un contenedor ISO, como se ilustra en la figura 6.3.

Este contenedor ISO puede estar contiguo al del Módulo B6–Solidificación. Para mayor claridad, en la ilustración (figura 6.4) se ha omitido la pared divisoria central. En esta pared podría construirse una puerta que conecte los dos módulos, para transferir los contenedores de los lodos residuales de los módulos de tratamiento al módulo de solidificación.

Otra combinación probable pero más simple es el uso de la filtración (Módulo B5), seguida del intercambio iónico (Módulo B2) para el líquido y, cuando sea el momento, de la solidificación (Módulo B6) para los medios de intercambio iónico gastados.

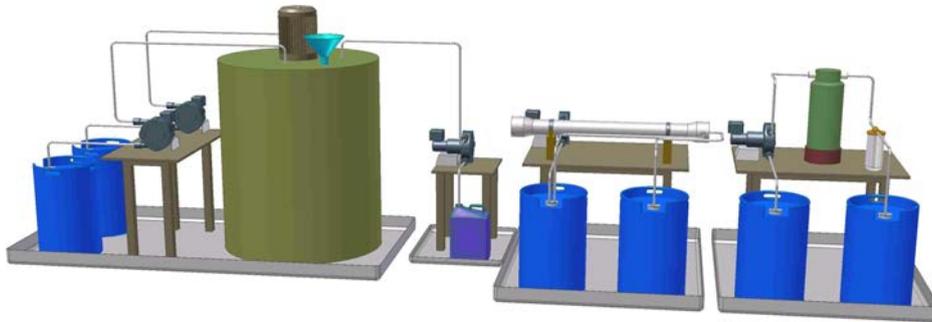


Fig. 6.2. Combinación para la aplicación secuencial del tratamiento químico (Módulo B1), la filtración de flujo tangencial (Módulo B4) y el intercambio iónico (Módulo B2).

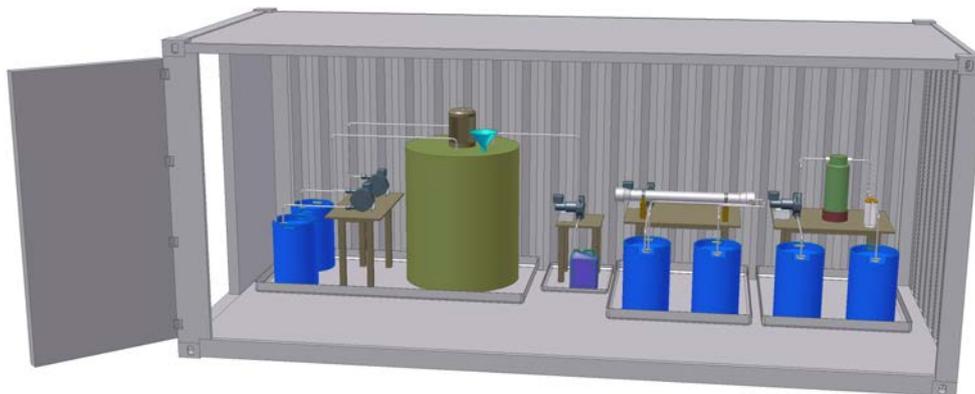


Fig. 6.3. Disposición para el uso secuencial de los módulos de tratamiento químico (Módulo B1), filtración de flujo tangencial (Módulo B4) e intercambio iónico (Módulo B2) en un contenedor ISO.

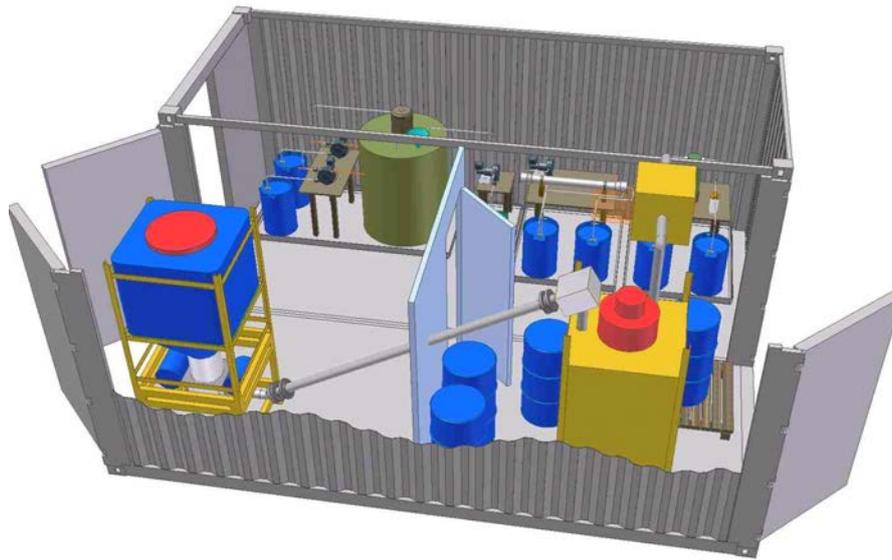


Fig. 6.4. Disposición, en dos contenedores ISO adyacentes, de los módulos para aplicar el tratamiento químico (Módulo B1), seguido de la filtración de flujo tangencial (Módulo B4), y luego del intercambio iónico (Módulo B2) o de la solidificación (Módulo B6), para los lodos precipitados en el tratamiento químico y, cuando sea el momento, los medios de intercambio iónico gastados.

Cada uno de los módulos de procesamiento comprende un espacio para colocar los contenedores que suministrarán los desechos al proceso y recibirán los desechos tratados; los tanques, bombas, válvulas e instrumentos están sostenidos por un armazón de acero y colocados en bandejas de goteo para la contención de los derrames o fugas. Las tuberías y los recipientes deberían ser de una combinación de acero inoxidable y plásticos.

Los módulos de procesamiento pueden estar uno junto al otro, de modo que el contenedor de recepción del primer módulo sea el contenedor de alimentación del segundo.

La combinación de los módulos de filtración e intercambio iónico se ilustra en la figura 6.5. Estos módulos de proceso pueden construirse dentro de una estructura ya existente o en una nueva estructura permanente.

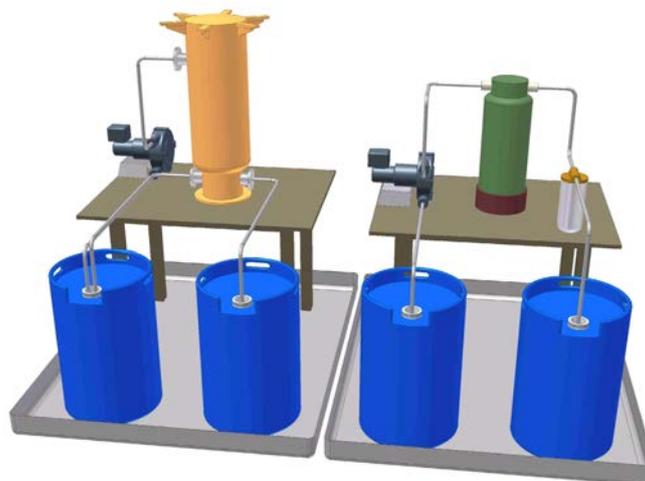


Fig. 6.5. Combinación secuencial de la filtración (Módulo B5) y el intercambio iónico (Módulo B2).

Como alternativa, y dejando aparte el módulo de solidificación, que deberá tener su propio contenedor ISO, esos módulos podrían colocarse juntos en un contenedor ISO, como se ilustra en la figura 6.6.



Fig. 6.6. Disposición para el uso secuencial de los módulos de filtración (Módulo B5) e intercambio iónico (Módulo B2) en un contenedor ISO.

Otra disposición (figura 6.7) muestra que habrá espacio para el almacenamiento temporal de los contenedores de desechos líquidos a la espera de tratamiento en bandejas con contención.

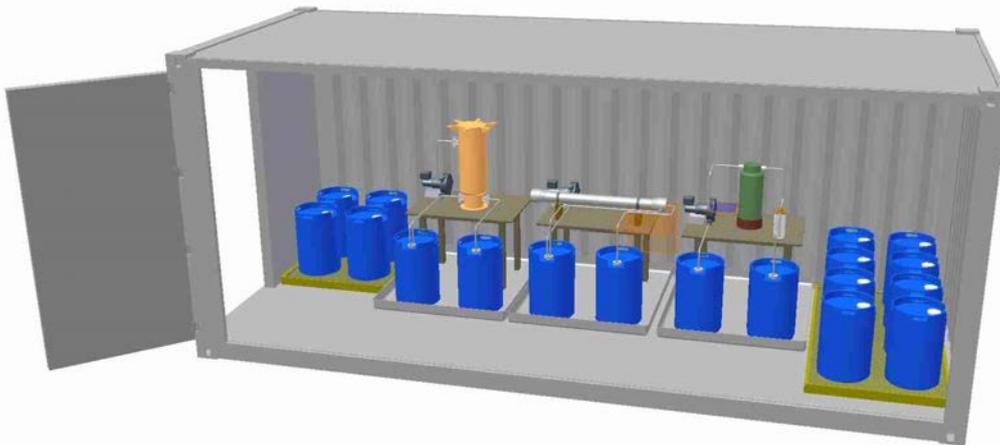


Fig. 6.7. Disposición de los módulos de filtración (Módulo B5) e intercambio iónico (Módulo B2) en un contenedor ISO, con espacios para el almacenamiento de contenedores de desechos en bandejas dotadas de contención.

6.4. CONTENEDORES ISO

El uso de contenedores ISO es una forma práctica y barata de conseguir un lugar al amparo de la intemperie para colocar los módulos de proceso. Las dimensiones externas de los contenedores ISO estándar de 20 pies son 20 pies (de largo) \times 8 pies (de ancho) \times 8-9 pies y 6 pulgadas (de alto) (6,06 m (de largo) \times 2,44 m (de ancho) \times 2,44-2,89 m (de alto)). Los contenedores se suministran normalmente con una puerta de dos hojas que abarca todo el ancho de uno de sus extremos, pero hay muchas otras opciones disponibles, como una puerta de dos hojas en cada uno de los extremos y puertas de acceso del personal en los costados.

Un gran número de empresas suministra contenedores para fines especiales, ya sea nuevos o renovados/convertidos a partir de antiguos contenedores de carga. A fin de poder ser utilizados como recintos al amparo de la intemperie para los módulos de proceso, los contenedores deberían:

- a) ser suministrados con la certificación CSC;
- b) ser estancos al viento y el agua;
- c) tener un piso de acero (o un revestimiento de acero sobre el piso de madera, sellado en las paredes), para que se pueda descontaminar;
- d) estar provistos de cajas con cerradura en las puertas, para mejorar la seguridad física;
- e) tener un buen acabado de pintura por dentro y por fuera.

Muchos sistemas de pinturas orgánicas proporcionarán una protección excelente de un contenedor de acero dulce, a condición de que se tenga el debido cuidado en la preparación de la superficie, se utilice un imprimador inhibitor adecuado y se aplique una capa de pintura de espesor de película seca suficientemente alto. La aplicación de un sistema de pintura orgánica de protección total sobre un tratamiento inorgánico, es decir, un proceso de galvanización por inmersión en baño caliente o de rociado metálico, garantiza una larga duración de la protección en casi todas las condiciones de servicio. El grado de preparación de la superficie que se requiera dependerá de la forma del acero dulce: una plancha de sección fina y laminado en frío será más fácil de preparar que una plancha de laminado en caliente cubierta total o parcialmente con batiduras de laminado, pero el acero con muchos agujeros requerirá una atención especial. Una limpieza por chorreado acorde con las normas aplicables (por ejemplo, la norma Sa 2½ del Instituto Sueco de Normalización, SS 05 59 00 u otra equivalente) es generalmente la mejor opción.

Para maximizar la resistencia a la corrosión y la facilidad de la descontaminación, se recomienda lo siguiente:

Primera mano:	Imprimación con epoxi rica en cinc (2 envases)	45 µm a 50 µm;
Acabado:	Segunda mano con epoxi sin solvente (2 envases)	200 µm a 250 µm;
	Espesor de película seca total	245 µm a 300 µm

Además de servir para alojar los módulos de proceso, como se acaba de ilustrar, los contenedores ISO pueden utilizarse también para acoger módulos tales como oficinas (figura 6.8), vestuarios, salas de servicios de protección radiológica, y la planta y el equipo de ventilación.

Los contenedores ISO pueden emplearse además para el almacenamiento, como se describe en la sección 8.2.4.



Fig. 6.8. Contenedor ISO utilizado como oficina.

7. TIPOS Y CANTIDADES DE BULTOS DE DESECHOS ACONDICIONADOS PARA EL ALMACENAMIENTO

Los bultos de desechos acondicionados deberán colocarse en un almacenamiento provisional hasta que pueda procederse a su disposición final. Esos bultos serán el resultado del tratamiento y acondicionamiento de los diferentes tipos de desechos mencionados en la sección 3, utilizando los módulos de procesamiento descritos en la sección 6. Cabe prever que los desechos que requieran almacenamiento estarán embalados de las siguientes formas:

- a) los desechos sólidos y líquidos generales, acondicionados en bidones de 200 L;
- b) las fuentes selladas en desuso, en sus contenedores de transporte y almacenamiento blindados, colocados a su vez en bidones de 200 L, como sobreembalaje.

Normalmente, no se recibirán otros tipos de bulto si los desechos proceden de la instalación o los módulos de procesamiento. Una excepción a esta regla puede darse cuando las cantidades y volúmenes de desechos son muy pequeños, por ejemplo en el caso de los Estados Miembros con un uso limitado de un número relativamente bajo de fuentes radiactivas, en que las fuentes en desuso podrán estar selladas en bultos más pequeños (por ejemplo, botes) y almacenadas en armarios. Otro tipo de bulto que puede producirse es el cofre blindado de almacenamiento a largo plazo, para las fuentes selladas en desuso de actividad alta.

A continuación se resumen los criterios de aceptación de desechos para el almacenamiento, el número de bultos, el período de almacenamiento y los requisitos funcionales y de otra índole. Los lectores que deseen más información al respecto pueden consultar otras publicaciones del OIEA sobre esos temas.

7.1. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN DE DESECHOS

En los párrafos siguientes se indican los principales criterios de aceptación que se aplicarán presumiblemente a los desechos. Los desechos que no cumplan estos criterios de aceptación tendrán que ser procesados y/o reembalados en la instalación o los módulos de procesamiento.

7.1.1. Tamaño/peso de los bultos

La mayoría de los bultos se basan en el bidón de 200 L, cuyas dimensiones típicas son de 610 mm (diámetro externo) y 880 mm (altura). El peso del bidón puede variar desde 50 kg (desechos blandos compactados dentro del bidón) hasta 400 kg (desechos encapsulados y solidificados). Las fuentes con contenedores blindados, como las fuentes de radio en cofres de almacenamiento blindados colocados dentro de bidones de 200 L a modo de sobreembalaje, podrían pesar 500 kg.

Los bidones deberían estar en buen estado, y ser ya sea de acero dulce con un revestimiento protector, por ejemplo un sistema de pintura, para prevenir la corrosión de la cara externa, o de acero inoxidable, especialmente si se prevé un almacenamiento prolongado. La figura 7.1 ilustra diferentes tipos de bidones de uso común.

7.1.2. Características radiológicas

Dado que los desechos procederán de la instalación o los módulos de procesamiento, cabe suponer que:

- a) Las tasas de dosis de radiación de los bidones serán suficientemente bajas, gracias al blindaje integrado para poderlos manipular manualmente y no tener que hacerlo a distancia. Esto no significa



Bidón de acero dulce con tapa de abrazadera



Bidón de acero dulce con tapa atornillada



Bidón de acero inoxidable

Fig. 7.1. Ejemplos de bidones de uso común para el embalaje de desechos.

que algunos bultos no tengan que ser provistos de un blindaje adicional dentro de la instalación de almacenamiento, para poder realizar las operaciones de la instalación y optimizar las tasas de dosis recibidas por los operadores.

- b) Los bidones que se reciban estarán limpios, es decir, sellados y exentos de contaminación externa.

7.2. NÚMERO DE BULTOS

En obras anteriores, el OIEA ha examinado los desechos típicos generados por los Estados Miembros en la investigación y las aplicaciones nucleares e indicado sus principales características y sus cantidades. Estas se resumen en el cuadro 7.1, junto con estimaciones del número de bultos en forma de bidones de 200 L que generará anualmente el acondicionamiento de esas corrientes de desechos.

CUADRO 7.1. VOLÚMENES DE DESECHOS

Corriente de desechos	Cantidad que se procesará anualmente	Volumen anual estimado de desechos acondicionados para el diseño de referencia	Número equivalente de bidones de 200 L por año
Bajos volúmenes de líquidos acuosos	Típicamente hasta 0,5 m ³ ; para el diseño de referencia debería emplearse un valor de 0,1 m ³	200 L	1
Altos volúmenes de líquidos acuosos	Típicamente entre 0,5 m ³ y 10 m ³ ; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 5 m ³	10 m ³ si se solidifican directamente. Si el volumen inicial se trata y descarga, 500 L de residuos acondicionados.	3 a 50
Líquidos orgánicos	Típicamente menos de 0,3 m ³ ; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 0,1 m ³	1 m ³ si se solidifican directamente.	5
Sólidos compactables	Típicamente menos de 20 m ³ ; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 5 m ³	1 m ³ una vez compactados.	5

CUADRO 7.1. VOLÚMENES DE DESECHOS (cont.)

Corriente de desechos	Cantidad que se procesará anualmente	Volumen anual estimado de desechos acondicionados para el diseño de referencia	Número equivalente de bidones de 200 L por año
Sólidos no compactables	Típicamente menos de 5 m ³ ; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 1 m ³	1 m ³ una vez encapsulados.	5
Resinas de intercambio iónico	Típicamente menos de 0,5 m ³ ; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 0,1 m ³	250 L una vez encapsuladas.	1 o 2
Lodos	Típicamente menos de 0,5 m ³ ; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 0,1 m ³	200 L una vez encapsulados.	1
Fuentes selladas en desuso con isótopos de período corto	Amplia variación en el número de fuentes; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 20	Dependerá del tamaño físico de la fuente en su contenedor blindado. Presumiblemente, de 1 m ³ a 4 m ³ una vez encapsuladas.	5 a 20
Fuentes selladas en desuso con isótopos de período largo	Amplia variación en el número de fuentes; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 20	Dependerá del tamaño físico de la fuente en su contenedor blindado. Presumiblemente, de 1 m ³ a 4 m ³ una vez encapsuladas.	5 a 20
Desechos biológicos (animales muertos)	Típicamente hasta 0,5 m ³ ; para el caso de referencia debería emplearse un valor de 0,1 m ³	Presumiblemente, 400 L una vez encapsulados.	2
Desechos y fuentes selladas en desuso que pueden almacenarse para la desintegración radiactiva (con radionucleidos de período muy corto)	Típicamente menos de 0,5 m ³ de desechos sólidos y líquidos y menos de 10 fuentes en desuso; para el caso de referencia deberían emplearse 0,2 m ³ de desechos sólidos y líquidos y 5 fuentes en desuso	Almacenamiento provisional para la desintegración radiactiva.	1 para los desechos sólidos 1 para los desechos líquidos 1 para las fuentes selladas

No todos los Estados Miembros generarán todas estas corrientes de desechos, ni lo harán necesariamente a los ritmos señalados. Además, los Estados Miembros pueden tener cantidades de desechos históricos o heredados que deban acondicionar, embalar y almacenar. También habrán de tomarse en consideración los futuros usos previsibles de materiales nucleares en los Estados Miembros y su impacto en la generación de desechos en el futuro.

Sobre la base del cuadro anterior, suponiendo que se generen todas las corrientes de desechos y que se traten y descarguen volúmenes altos de desechos líquidos acuosos, se producirán entre 30 y 40 bidones cada año. Este se considerará el volumen anual máximo de desechos embalados que llegará a la instalación de almacenamiento.

El número de bultos previsto y el ritmo al que se recibirán determinarán el tamaño de la instalación de almacenamiento y si, por ejemplo, será necesario contar con la instalación completa desde el comienzo o será posible ir la ampliando a lo largo de un período de tiempo.

8. MÓDULOS DE ALMACENAMIENTO DISPONIBLES

8.1. DETERMINACIÓN DE LAS OPCIONES

Las opciones para el almacenamiento son muy variadas [8.1 a 8.4] e incluyen lo siguiente:

- a) armario blindado;
- b) sala destinada a ese fin;
- c) contenedor de hormigón;
- d) contenedor ISO;
- e) tubería de hormigón;
- f) búnker o zanja de hormigón;
- g) cámaras acorazadas o tubos subterráneos;
- h) grutas, minas y túneles;
- i) edificio industrial construido para ese fin;
- j) edificio ya existente;
- k) almacenamiento al aire libre, sobre una superficie dura (climas secos).

8.2. EXAMEN Y EVALUACIÓN DE LAS OPCIONES

A continuación se examinan más detenidamente las distintas opciones de almacenamiento, teniendo en cuenta los requisitos señalados para una instalación de este tipo en la sección 9.

8.2.1. Armario blindado

Las cajas fuertes y los armarios de seguridad son ideales para el almacenamiento de bultos de desechos pequeños y de pequeñas cantidades de bultos. Los armarios blindados y las cajas fuertes de paredes gruesas no requieren ningún sistema de apoyo, como mecanismos de ventilación o de manipulación de los bultos de desechos. El armario puede estar situado en una instalación ya existente, por ejemplo, en una que utilice materiales radiactivos, como un hospital o un centro de investigación. Los armarios pueden cerrarse, lo que ofrece cierto grado de seguridad física. En la figura 8.1 se presentan dos ejemplos.



Fig. 8.1. Armarios blindados.

Sin embargo, un supuesto clave es que la mayoría de los bultos de desechos procedentes de la instalación de procesamiento estarán basados en el uso de un bidón de 200 L. Debido al tamaño y el peso de este bulto, los armarios blindados no serán adecuados para su almacenamiento.

8.2.2. Sala destinada a ese fin

En algunos casos, será posible utilizar una sala de una instalación ya existente para almacenar los desechos, si los volúmenes son relativamente pequeños. Una sala debería ser capaz de recibir bultos de desechos más grandes que un armario blindado. De ser necesario, los bultos con tasas de dosis más altas podrán blindarse dentro de la sala utilizando bloques de hormigón, ladrillos de plomo u otros bultos de desechos con tasas de dosis bajas.

Sin embargo, al estudiar la posibilidad de utilizar una sala de ese tipo debería tenerse en cuenta lo siguiente:

- a) Para acceder a la sala con bultos del tamaño de un bidón en una carretilla de horquilla elevadora o un portapalés manual se requerirá una puerta de dos hojas. Las puertas normales de una hoja para el acceso del personal no son suficientemente anchas.
- b) La vía de acceso a la sala desde el punto en que se reciban los bidones de desechos deberá tener un piso razonablemente plano y liso que permita el desplazamiento de las carretillas de horquilla elevadora y los portapalés manuales, y también una anchura suficiente para las maniobras.
- c) La sala debería tener una ventilación adecuada.

8.2.3. Contenedores de hormigón

Los contenedores de hormigón han tenido amplio uso en el transporte, el almacenamiento y la disposición final. Son particularmente adecuados para los bultos de desechos con tasas de dosis más altas, ya que proporcionan cierto grado de blindaje. Un contenedor de hormigón también debería ser capaz de recibir bultos más grandes que un armario blindado (incluidos los bidones de 200 L). Existen varios diseños patentados. En la figura 8.2 se presenta un ejemplo.

La mayoría de estos contenedores, si no todos, tienen una tapa que puede retirarse para cargar los bultos de desecho por arriba. Esta operación requerirá una grúa y medios de sujeción para manipular y posicionar los bultos de desechos y retirar y volver a colocar la tapa, lo que añadirá complejidad a la manipulación de los bultos.



Fig. 8.2. Contenedor de hormigón.



Fig. 8.3. Contenedor ISO.

8.2.4. Contenedores ISO

Los contenedores ISO están ampliamente disponibles en todo el mundo (figura 8.3). Han sido utilizados como bultos de transporte de materiales radiactivos y como contenedores para la disposición final. También pueden emplearse como módulos de almacenamiento. En la sección 6.4 se describieron algunas de las características básicas de la construcción y la protección superficial de estos contenedores.

En el cuadro 8.1 figuran las dimensiones y los pesos típicos de los contenedores ISO.

CUADRO 8.1. DIMENSIONES Y PESOS TÍPICOS DE LOS CONTENEDORES ISO

		Contenedor de 20 pies		Contenedor de 40 pies	
		Sistema imperial	Sistema métrico	Sistema imperial	Sistema métrico
Dimensiones externas	Longitud	20 pies 0 pulgadas	6,096 m	40 pies 0 pulgadas	12,192 m
	Anchura	8 pies 0 pulgadas	2,438 m	8 pies 0 pulgadas	2,438 m
	Altura	8 pies 6 pulgadas	2,591 m	8 pies 6 pulgadas	2,591 m
Dimensiones internas	Longitud	18 pies 10 ⁵ / ₁₆ pulgadas	5,758 m	39 pies 5 ⁴⁵ / ₆₄ pulgadas	12,032 m
	Anchura	7 pies 8 ¹⁹ / ₃₂ pulgadas	2,352 m	7 pies 8 ¹⁹ / ₃₂ pulgadas	2,352 m
	Altura	7 pies 9 ⁵⁷ / ₆₄ pulgadas	2,385 m	7 pies 9 ⁵⁷ / ₆₄ pulgadas	2,385 m
Abertura de la puerta	Anchura	7 pies 8 ¹ / ₈ pulgadas	2,343 m	7 pies 8 ¹ / ₈ pulgadas	2,343 m
	Altura	7 pies 5 ³ / ₄ pulgadas	2,280 m	7 pies 5 ³ / ₄ pulgadas	2,280 m
Volumen		1169 pies ³	33,1 m ³	2385 pies ³	67,5 m ³
Masa bruta máxima		66 139 libras	30 400 kg	66 139 libras	30 400 kg
Peso en vacío		4850 libras	2200 kg	8380 libras	3800 kg
Carga neta		61 289 libras	28 200 kg	57 759 libras	26 600 kg

Los contenedores ISO son un medio flexible, modular y barato para el almacenamiento de desechos al amparo de la intemperie. Al ser transportables, ofrecen flexibilidad en cuanto a su ubicación y pueden ser trasladados a otro lugar si es necesario. Tienen cabida para bultos de una gran variedad de tamaños y pesos. El modelo de la figura 8.4 muestra bidones de 200 L apilados dentro de un contenedor ISO. Con esa disposición, serán necesarias algunas maniobras para realizar la inspección periódica de los bidones almacenados. Según la situación, los usuarios podrían preferir otras disposiciones que requieran menos maniobras para la inspección.



Fig. 8.4. Bidones apilados dentro de un contenedor ISO.

Por ser de metal, los contenedores ISO son vulnerables a la corrosión y, en definitiva, la duración de su vida de diseño estará limitada por las condiciones ambientales.

El contenedor o los contenedores ISO deberán colocarse sobre una base adecuada. Un contenedor ISO lleno puede pesar hasta 30 t, de modo que el fundamento debería tener una capacidad de soporte de carga de 20 kN/m². Un diseño básico para el fundamento sería una simple losa de hormigón armado construida directamente sobre el suelo. La resistencia a la penetración del agua desde el suelo debería estar dada por una membrada hidrófuga de polietileno en la cara inferior de la losa. La parte superior de la losa debería estar inclinada para facilitar la escorrentía del agua de lluvia.

Dentro del contenedor ISO, un bidón particular puede protegerse con otros bidones de desechos o con bloques de hormigón. Si el número de bidones que necesitan blindaje es mayor, podría rodearse todo el contenedor ISO con un muro de blindaje externo de bloques de hormigón intertrabados o sacos de arena apilados para reducir la tasa de dosis recibida por los operadores en torno al contenedor en cuestión y la tasa de dosis procedente de los contenedores adyacentes. La figura 8.5 ilustra dos disposiciones posibles del blindaje.

8.2.5. Tubería de hormigón

Diversos depósitos de desechos radiactivos han utilizado tuberías de hormigón para segregar los bidones y mantenerlos en pilas verticales (figura 8.6). Esta solución es particularmente adecuada para los depósitos grandes, en que las pilas verticales altas reducen la superficie requerida para el almacenamiento. Las tuberías son adecuadas para los bultos de desechos con altos niveles de radiación.

Sin embargo, en este tipo de almacenamiento es necesario manipular los bidones desde lo alto, con puentes grúa y eslingas o pinzas, lo que aumenta la complejidad y el costo de la manipulación de los bidones y del diseño del depósito. La inspección y la monitorización son difíciles en este tipo de almacenamiento.

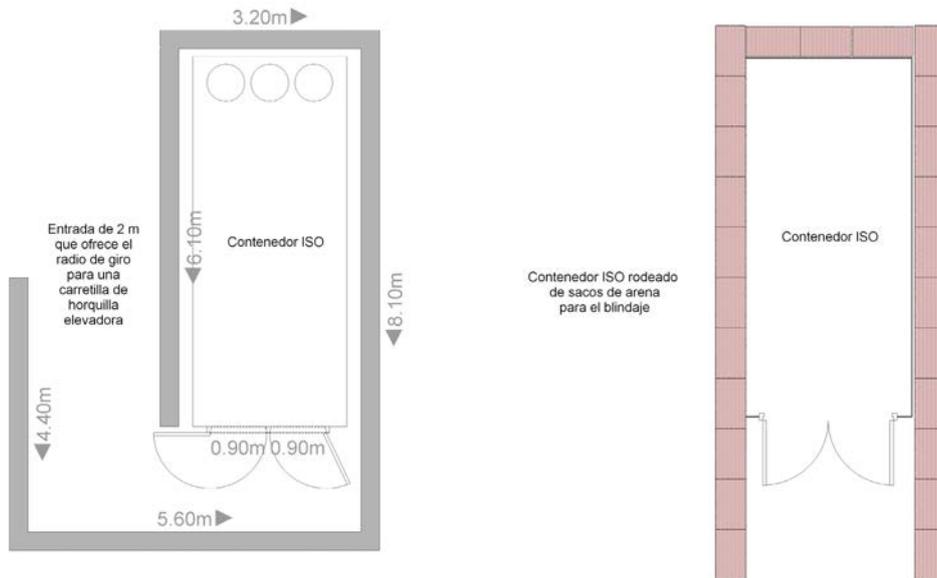


Fig. 8.5. Disposiciones del blindaje para contenedores ISO.



Fig. 8.6. Almacenamiento en tuberías de hormigón.

Además, los bultos de desechos tienen que ser uniformes, para mantener la estabilidad de la pila, y compatibles con el equipo de manipulación especializado.

Las tuberías verticales de hormigón no ofrecen beneficios importantes para el almacenamiento de volúmenes pequeños de desechos, por lo que no se examinarán más a fondo.

8.2.6. Búnker o zanja de hormigón

Para el almacenamiento de desechos se han utilizado también búnkers o zanjas de hormigón excavados en el terreno (figura 8.7). En algunos casos, estas estructuras se han empleado para colocar desechos operacionales no acondicionados, por ejemplo de reactores de potencia, vertiendo los desechos



Fig. 8.7. Búnker o zanja de hormigón.

en el búnker a través de pequeñas bocas de acceso. La recuperación posterior de estos desechos suele ser problemática. Los búnkers y zanjas son particularmente adecuados para los desechos de alta tasa de dosis, ya que no requieren blindaje en las paredes. También son apropiados para las fuentes selladas en desuso de actividad alta, por el mismo motivo de que no necesitan blindaje, pero también porque mejoran la seguridad física.

Los búnkers y zanjas requieren una cuidadosa selección del emplazamiento, que tiene que ser idóneo para la excavación y reunir las condiciones necesarias en cuanto al ingreso de agua y su drenaje.

Para cargar los bidones en un búnker o zanja desde arriba se precisa un equipo más complejo de grúas y pinzas. La carga de los bidones con carretillas de horquilla elevadora por una rampa de acceso requiere un diseño cuidadoso, que evite la entrada de aguas de lluvia o aguas superficiales en el búnker. La entrada del personal y las salidas de emergencia también plantean problemas, y por este motivo será difícil el acceso para la inspección de los bultos de desechos.

Vale la pena mencionar que las zanjas de hormigón son la base de los diseños de instalaciones de enterramiento final poco profundo en varios países, entre ellos Francia y el Reino Unido. Sin embargo, el examen de una instalación de almacenamiento que podría a la larga convertirse en la instalación de disposición final de los desechos escapa al ámbito de la presente publicación.

8.2.7. Cámaras acorazadas o tubos subterráneos

Varias de las instalaciones de almacenamiento existentes han utilizado cámaras acorazadas o tubos subterráneos para segregar y colocar los bidones, por lo general en pilas verticales. Estas soluciones son particularmente adecuadas para los bultos de alta tasa de dosis, que se cargan en el tubo o la cámara a través de una entrada para cofres con monitorización gamma.

Aunque las entradas para cofres con monitorización gamma no serían necesarias para los bultos de desechos aquí examinados, como se señaló anteriormente, este tipo de almacenamiento requiere la manipulación de los bultos desde lo alto, con puentes grúa y eslingas o pinzas. Esto aumenta la complejidad y el costo de la manipulación de los bultos de desechos y del diseño del depósito. En la figura 8.8. se presenta un ejemplo de una instalación de almacenamiento subterráneo.

Por lo general, los tubos de almacenamiento se han utilizado para bultos de desechos más pequeños (típicamente de hasta 50 L) que los considerados para esta instalación de almacenamiento provisional. El uso de pequeñas cámaras subterráneas sería adecuado para los bidones, y particularmente para las fuentes selladas en desuso de actividad alta, en razón del blindaje pero también de la mayor seguridad física.



Fig. 8.8. Cámaras acorazadas o tubos subterráneos.

Un edificio de almacenamiento podría tener una o varias cámaras pequeñas para el almacenamiento de desechos generales sobre el suelo, y un depósito blindado y con más seguridad física para los desechos de actividad alta bajo el suelo.

8.2.8. Grutas, minas y túneles

Es posible que las grutas, minas o túneles que existan ofrezcan un emplazamiento adecuado para una instalación de almacenamiento. Como en el caso de otras opciones de almacenamiento, deberán tomarse en consideración numerosos aspectos, entre ellos la ubicación en relación con las rutas de transporte, la accesibilidad para la introducción de los bidones en la gruta, túnel o mina y la entrada del personal de inspección y monitorización de los bultos de desechos, la presencia de aguas subterráneas y la posibilidad de inundación, y problemas más especiales como la estabilidad.

Si bien una gruta, túnel o mina adecuado podría constituir una instalación de almacenamiento ideal, esta será una solución excepcional y no es probable que represente una opción realista para la enorme mayoría de los Estados Miembros. Por lo tanto, esta posibilidad no se examina más a fondo.

8.2.9. Edificio industrial construido para ese fin

La construcción de un edificio industrial específica y exclusivamente para el almacenamiento de bultos de desechos representa la solución de almacenamiento más común y será una opción realista y práctica en la mayoría de los Estados Miembros.

En su forma más sencilla, el edificio (figura 8.9) es simplemente un cobertizo erigido sobre una losa de hormigón armado, dotado de puertas de acceso vehicular, para introducir los bultos de desechos con una carretilla de horquilla elevadora, y puertas de entrada para el personal (una entrada normal y posiblemente una o varias salidas de emergencia, según el tamaño del edificio). El edificio tendrá alumbrado eléctrico. La losa del suelo será lisa y estará recubierta con una pintura para pisos que sea fácil de descontaminar.

El diseño del edificio podrá adaptarse a las condiciones ambientales particulares del país (como la lluvia, la carga de nieve, la carga del viento, el calor o el frío) para obtener una vida de diseño de 25 años o más. La construcción puede proyectarse con el tamaño necesario para contener todo el volumen de desechos previsto, o basarse en un diseño modular que pueda ampliarse en el futuro para obtener un volumen de almacenamiento adicional.



Fig. 8.9. Edificio construido específicamente para el almacenamiento.

En muchos casos, la estructura del edificio no necesitará ofrecer blindaje, ya que este estará dado por la construcción de los propios bultos de desechos. Sin embargo, si hay algunos bultos con tasas de dosis altas, podrá construirse dentro del edificio una zona blindada para acogerlos.

El edificio puede tener también un diseño más sofisticado, si es necesario, por ejemplo si se añade un sistema de ventilación con aire acondicionado para el control de la humedad y la temperatura. Otro elemento de esta sofisticación puede ser la incorporación de sistemas adecuados de manipulación de materiales, como puentes grúa.

La construcción del edificio requerirá una cuidadosa selección del emplazamiento, en que habrá que tener en cuenta numerosas consideraciones, como los permisos de obra, las condiciones del terreno y las consultas con la población local.

8.2.10. Edificio ya existente

Es posible que ya exista un edificio que pueda adaptarse para su uso exclusivo como depósito de desechos. Las características requeridas en este caso serán las mismas que las descritas para un edificio nuevo.

8.2.11. Almacenamiento al aire libre, sobre una superficie dura (climas secos)

En la figura 8.10 se ilustra un ejemplo de un almacenamiento al aire libre. Este tipo de almacenamiento tiene una aplicabilidad limitada, ya que solo es posible en climas secos y en emplazamientos con una



Fig. 8.10. Almacenamiento al aire libre.

adecuada seguridad física. El almacenamiento al aire libre será una solución excepcional, y no es probable que represente una opción realista para la enorme mayoría de los Estados Miembros. Por consiguiente, esta posibilidad no se examina más a fondo.

REFERENCIAS DE LA SECCIÓN 8

- [8.1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Reference Design for a Centralized Waste Processing and Storage Facility, IAEA-TECDOC-776, IAEA, Vienna (1994).
- [8.2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Reference Design for a Centralized Spent Sealed Sources Facility, IAEA-TECDOC-806, IAEA, Vienna (1995).
- [8.3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Handling, Conditioning and Storage of Spent Sealed Radioactive Sources, IAEA-TECDOC-1145, IAEA, Vienna (2000).
- [8.4] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Storage of Radioactive Wastes, IAEA-TECDOC-653, IAEA, Vienna (1992).

9. SELECCIÓN DE LOS MÓDULOS DE ALMACENAMIENTO ADECUADOS

En la sección 8 se examinaron varias opciones de almacenamiento posibles que serían adecuadas para los bultos de desechos acondicionados resultantes del procesamiento de las corrientes de desechos examinadas en esta publicación. Se han elaborado una serie de diagramas de decisiones para orientar la determinación de las soluciones de almacenamiento posibles, teniendo en cuenta las consideraciones sobre la estrategia de almacenamiento, la selección del tipo de instalación, los requisitos de ventilación, blindaje y manipulación mecánica, y la ejecución de un proyecto de instalación de almacenamiento.

El examen que figura a continuación debería leerse conjuntamente con los diagramas de decisiones presentados en las figuras 9.1 a 9.6.

9.1. CONSIDERACIONES SOBRE LA ESTRATEGIA DE ALMACENAMIENTO

El producto de la instalación de procesamiento de desechos será un bulto de desechos acondicionados apto para el almacenamiento. Lo primero que habrá que hacer al estudiar cómo y dónde almacenar los desechos embalados y acondicionados será examinar la estrategia nacional para el almacenamiento de desechos radiactivos, el marco regulador correspondiente y las normas y directrices que lo respalden (figura 9.1). Es importante señalar que la falta de una estrategia nacional para el almacenamiento de desechos radiactivos, o de normas y directrices al respecto, no debería impedir el establecimiento de instalaciones seguras para este propósito. En ausencia de esos instrumentos, debería solicitarse asesoramiento a los órganos nacionales apropiados, y posiblemente también el apoyo del OIEA.

Una vez examinados los requisitos establecidos en la estrategia nacional y las limitaciones del sistema regulador, el propietario de los desechos debería considerar si existe alguna instalación de gestión de desechos que pueda ser adecuada (por ejemplo, un lugar de almacenamiento para la desintegración radiactiva).

9.1.1. ¿Hay desechos en muchas partes del país?

El propietario de los desechos debería examinar si se están generando tipos de desechos parecidos también en otras partes del país. De no ser así, el lugar de almacenamiento debería encontrarse cerca de la instalación de embalaje de los desechos. En cambio, si se producen desechos en zonas muy distintas del país, debería tomarse en consideración la posibilidad de establecer una instalación de almacenamiento central, o varias instalaciones locales, según la infraestructura de transporte que exista en el país y su idoneidad.

9.2. SELECCIÓN DEL TIPO DE INSTALACIÓN DE ALMACENAMIENTO

El diagrama de flujo de la figura 9.2 ayuda a seleccionar el tipo de instalación de almacenamiento adecuado para la aplicación de que se trate.

9.2.1. ¿Se conocen el inventario total y la clasificación de los desechos que se almacenarían en una nueva instalación?

Habría que determinar el inventario de desechos, su clasificación y el volumen de bultos generado para el almacenamiento en la instalación existente, después de lo cual podrán definirse los requisitos y especificaciones de diseño de la instalación de almacenamiento.

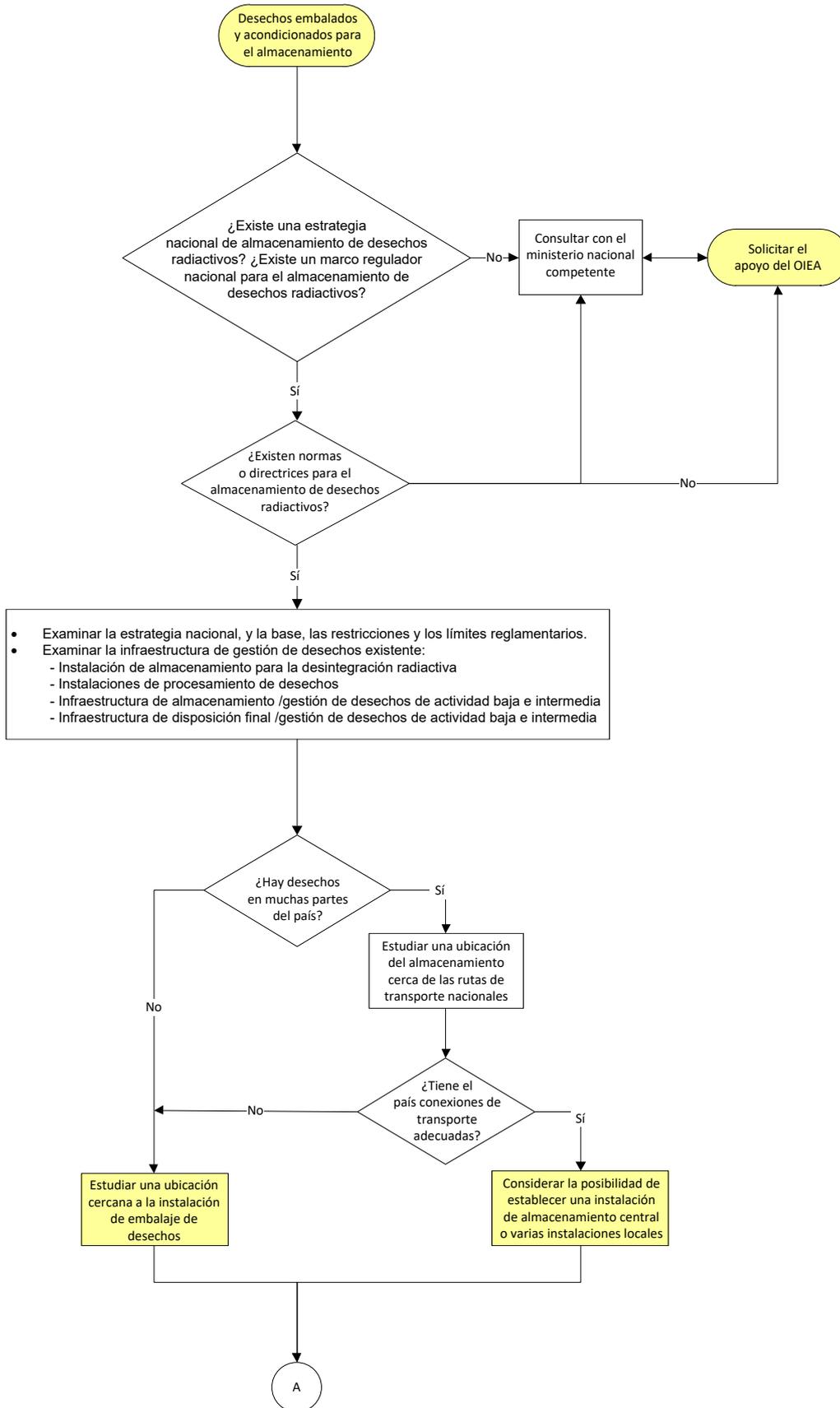


Fig. 9.1. Consideraciones sobre la estrategia de almacenamiento.

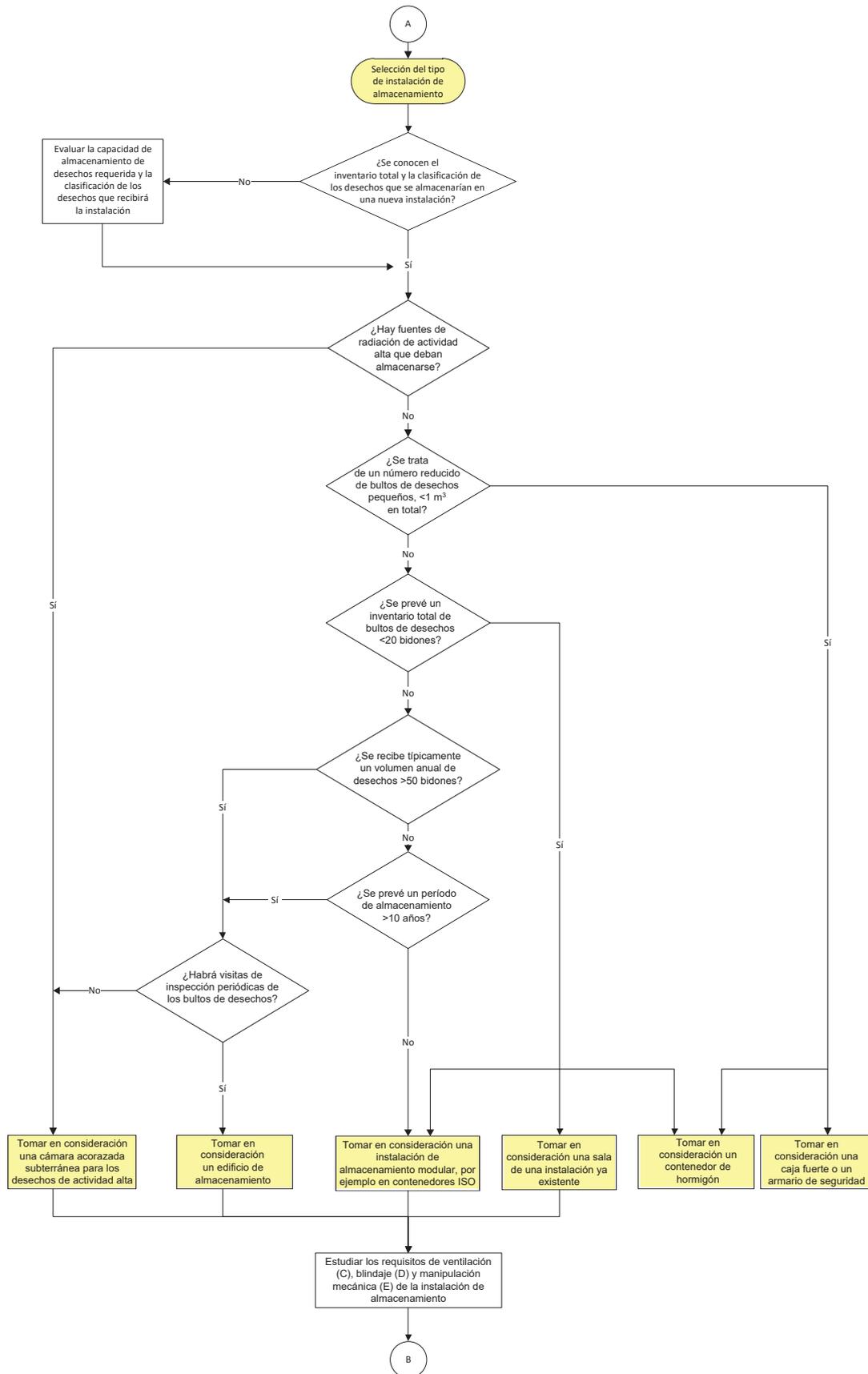


Fig. 9.2. Selección del tipo de instalación de almacenamiento.

9.2.2. ¿Hay fuentes de radiación de actividad alta que deban almacenarse?

Si hay fuentes de radiación de actividad alta que deban almacenarse, lo ideal será hacerlo bajo tierra, en un búnker, un tubo o una cámara acorazada. Las ventajas del almacenamiento subterráneo son que el blindaje está dado por el terreno y que la seguridad física es mucho mayor.

Si el volumen de los otros desechos es pequeño, podrán almacenarse también bajo tierra. En cambio, si hay un volumen mayor de otros desechos que requieran almacenamiento, debería utilizarse nuevamente el diagrama de decisiones para obtener una orientación.

Cabe señalar que es posible incorporar una o varias cámaras acorazadas subterráneas en el diseño de un edificio de almacenamiento de otros desechos.

9.2.3. ¿Se trata de un número reducido de bultos de desechos pequeños?

Si se trata de un número reducido de bultos pequeños, una solución conveniente y económica es almacenarlos en un armario de seguridad disponible en el mercado o en un contenedor de hormigón. Sin embargo, en el caso de una instalación de procesamiento y almacenamiento de desechos, el supuesto es que los bultos serán bidones de 200 L, que son demasiado grandes para ser almacenados en armarios.

9.2.4. ¿Se prevé un inventario total de bultos de desechos inferior a 20 bidones?

Si el número de bidones que se deberá almacenar es relativamente pequeño, puede ser posible utilizar una sala de una instalación ya existente, o un contenedor ISO o uno o varios contenedores de hormigón para el almacenamiento. Sin embargo, si los volúmenes de desechos y el número de bidones previstos son mayores, es poco probable que esta sea una solución práctica.

9.2.5. ¿Se recibe típicamente un volumen anual de desechos superior a 50 bidones?

Como se indica en el cuadro 7.1, es poco probable que el número de bidones de desechos para el almacenamiento exceda de 50 por año (a menos que se solidifiquen directamente volúmenes altos de desechos acuosos debido a la falta de una vía de disposición final después del tratamiento). Para las cantidades más pequeñas de bidones (menos de 50 por año), el almacenamiento modular, por ejemplo en contenedores de carga, es una solución práctica. Por encima de esa cifra, el número de contenedores requerido podría ser excesivo y es probable que sea más práctico diseñar una instalación específica para ese fin.

9.2.6. ¿Se prevé un período de almacenamiento superior a 10 años?

El almacenamiento provisional prolongado antes de la disposición final no es recomendable. Los contenedores que se utilizarían posiblemente en una instalación de almacenamiento modular pueden sufrir corrosión y, en un período de tiempo largo, esa corrosión podría afectar a la integridad de los bultos de desechos. La vida de diseño de los contenedores de almacenamiento en condiciones templadas se estima en 10 años. En un ambiente frío o caliente de alta humedad podría ser considerablemente menor.

Si se prevén períodos de almacenamiento superiores a 10 años, se requerirá una instalación con una vida de diseño más larga, lo que supondrá el uso de un edificio permanente o de un búnker de almacenamiento, en lugar de un simple diseño modular a base de contenedores.

9.2.7. ¿Habrá visitas de inspección periódicas de los bultos de desechos?

Los bidones almacenados deberán ser inspeccionados periódicamente para vigilar las condiciones físicas de los bultos y adoptar medidas correctivas tempranas si se detecta algún problema. La propia

instalación de almacenamiento debería ser objeto también de una monitorización radiológica periódica con el fin de:

- a) verificar que los niveles de radiación sean aceptables (e identificar los bultos que deban ser reubicados o colocados detrás de un blindaje, si los niveles no son aceptables); y
- b) monitorizar los niveles de contaminación aerotransportada y de las superficies, a fin de adoptar oportunamente las medidas adecuadas para reducir al mínimo la propagación de la contaminación y la dosis recibida por los operadores.

Por estas razones, es necesario almacenar los bidones de modo que:

- i) sea relativamente fácil acceder a ellos e inspeccionarlos visualmente;
- ii) no sea necesario mover un gran número de bidones para acceder a uno de ellos en particular.

El acceso de los operadores es una consideración fundamental, lo que favorece la opción de una instalación de almacenamiento sobre el suelo (ya sea un edificio o una sala dedicados a ese fin, o el uso de contenedores ISO) que permita realizar visitas de inspección, en lugar del almacenamiento en un búnker o una zanja bajo tierra.

En cambio, si se determina que los bidones no requerirán visitas de inspección frecuentes, podrá utilizarse un búnker subterráneo. En este caso, se requerirán disposiciones especiales para realizar una inspección cuando se considere necesario.

Una vez determinado el tipo de instalación de almacenamiento que se necesita, será preciso establecer los otros requisitos de diseño fundamentales que deberá cumplir la instalación. Algunos de esos requisitos, como la ventilación, el blindaje y la manipulación mecánica, son el objeto de otros diagramas de decisiones y se examinan en las secciones 9.3 a 9.5.

9.3. REQUISITOS DE VENTILACIÓN

El diagrama de flujo de la figura 9.3 ayuda a determinar si se requerirá ventilación en la instalación de almacenamiento.

9.3.1. ¿Comprenden las condiciones ambientales del lugar períodos prolongados de humedad relativa alta?

Los bidones de 200 L de acero dulce pintado que están en buen estado al comienzo del período de almacenamiento tienen una probabilidad razonablemente alta de alcanzar una vida de almacenamiento de diez años, a condición de que se almacenen en un ambiente adecuado, por ejemplo, que se mantenga seco. Habrá que realizar inspecciones periódicas de los bidones, y es posible que se requieran medidas de reparación, como una nueva mano de pintura o la colocación en un sobreembalaje, durante el período de almacenamiento.

Si las condiciones ambientales son propicias a la corrosión de los bidones de acero dulce, hay dos opciones posibles:

- a) utilizar bidones de acero inoxidable;
- b) controlar las condiciones de almacenamiento para prolongar la vida de los bultos de desechos, es decir, controlar la humedad.

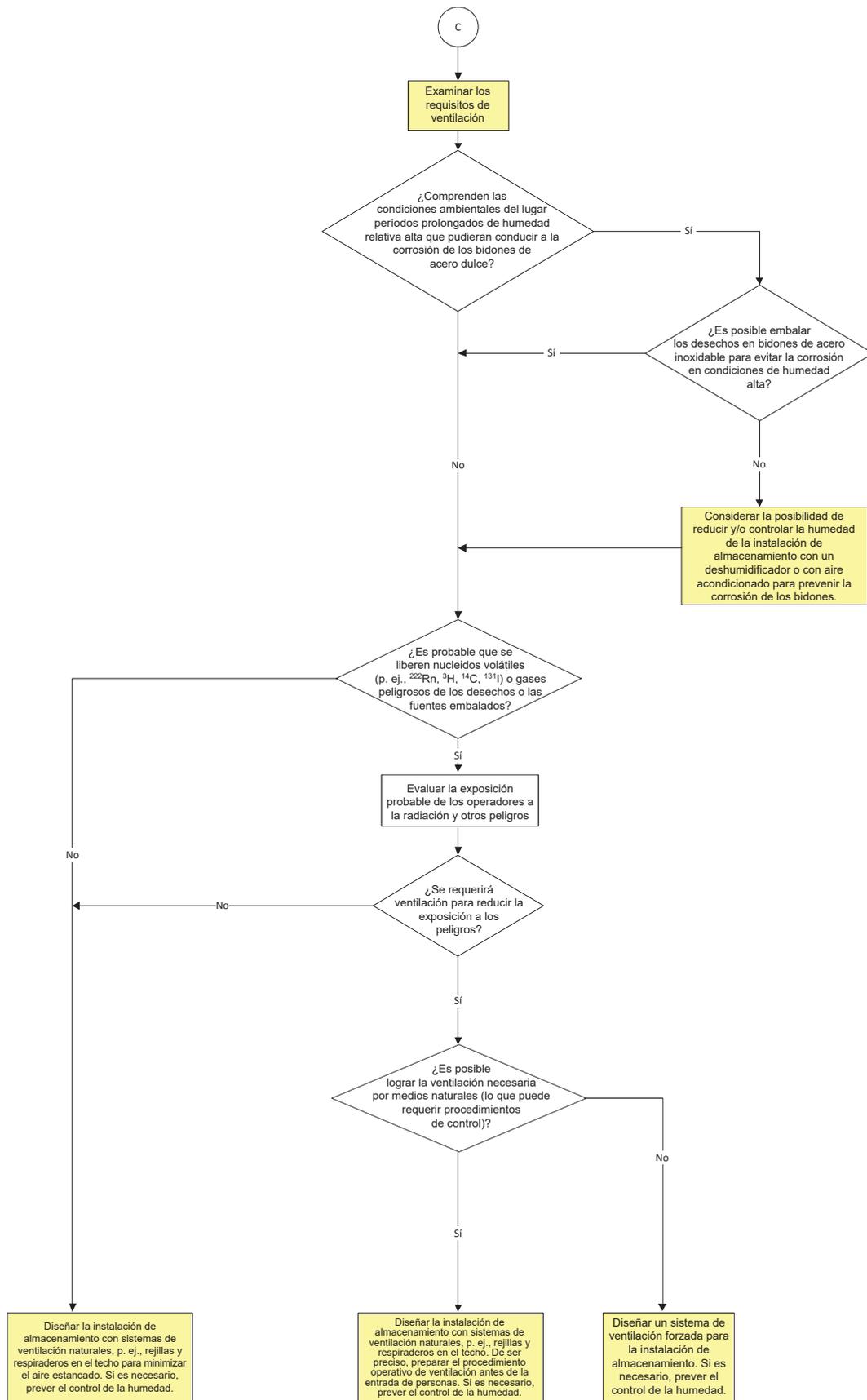


Fig. 9.3. Requisitos de ventilación.

9.3.2. ¿Es posible embalar los desechos en bidones de acero inoxidable?

El uso de bidones de acero inoxidable de buena calidad debería garantizar su integridad en condiciones ambientales difíciles y durante períodos de almacenamiento prolongados. Los bidones de acero inoxidable son considerablemente más caros que los de acero dulce ordinarios de tapa extraíble, pero aun así pueden ser una solución eficaz en relación con el costo en comparación con la alternativa de tener que controlar las condiciones dentro de la instalación de almacenamiento.

Si no se dispone de bidones de acero inoxidable o si esta opción se considera demasiado cara, habrá que adoptar otro enfoque para el almacenamiento por períodos prolongados cuando la humedad sea alta y sea probable la condensación. En este caso, habrá que reducir la humedad con un deshumidificador (si se trata de una zona de almacenamiento pequeña) o con un sistema mecánico de ventilación. Normalmente, la ventilación mantendrá la humedad relativa en menos del 80 %.

9.3.3. ¿Es probable que se liberen nucleidos volátiles o gases peligrosos?

Es posible que la instalación de almacenamiento requiera ventilación para ayudar a mantener la contención y el control de la contaminación y, de esa forma, la protección de los operadores y del público.

Los bultos de desechos pueden emitir gradualmente contaminantes gaseosos tales como el ^{222}Rn , el ^3H , el ^{14}C y el ^{131}I . En el caso de las fuentes de radio, el requisito será que estén selladas en recipientes herméticos, colocados a su vez en contenedores con un blindaje especial. Por consiguiente, la emisión de radón no será un problema.

Sin embargo, otros materiales no sellados que estén encapsulados en hormigón podrían, con el tiempo, emitir contaminantes gaseosos. La ventilación garantizará que esas especies no se acumulen hasta un nivel que sea peligroso para los operadores.

También se requerirá un sistema de ventilación debidamente diseñado si existe la posibilidad de acumulación de gases inflamables y/o explosivos.

Si no existe una emisión importante de contaminantes o gases peligrosos, bastará que la instalación de almacenamiento tenga un cierre impermeable con suficiente ventilación natural para evitar que se formen zonas de aire estancado.

9.3.4. ¿Se requerirá ventilación para reducir la exposición?

Será necesario hacer una evaluación de la tasa de emisión de contaminantes y del peligro de exposición externa y de contaminación interna de los operadores.

9.3.5. ¿Es posible lograr la ventilación necesaria por medios naturales?

Según cuál sea la tasa de emisión de esos contaminantes, podrá requerirse ventilación para diluirlos hasta un nivel aceptable y reducir así la exposición de los operadores.

En la mayoría de los casos, la ventilación natural será más que suficiente para diluir y dispersar los contaminantes. Podría ser necesario tener un procedimiento operacional que prevea la apertura de la instalación de almacenamiento para favorecer la ventilación y la monitorización del aire por un físico médico antes de la entrada en la instalación.

En el caso improbable de que la ventilación natural no sea suficiente, se requerirá un sistema mecánico de ventilación forzada para controlar los niveles de los contaminantes.

9.4. REQUISITOS DE BLINDAJE

La instalación de almacenamiento debería diseñarse de modo que ofrezca un blindaje adecuado para la protección radiológica del operador y del público. El diagrama de flujo de la figura 9.4 evalúa

la necesidad de blindaje en la instalación de almacenamiento para proteger al operador. Los aspectos relativos al diseño del blindaje para cumplir con las tasas de dosis permitidas en la superficie exterior de la instalación se examinan más adelante, en las secciones sobre los distintos tipos de instalación de almacenamiento.

9.4.1. ¿Tienen las superficies de los bultos de desechos tasas de dosis aceptables para la manipulación por contacto?

Como se señaló anteriormente, se supone que los bidones estarán debidamente autoblandados o tendrán incorporado su propio blindaje (como el cofre blindado de almacenamiento a largo plazo) de modo que sea posible la manipulación por contacto y no tengan que ser manipulados a distancia. Además, debido al tamaño y el peso de los bultos, se requerirán medios mecánicos (por ejemplo, carretillas de horquilla elevadora) para transferir y posicionar los bidones dentro de la instalación de almacenamiento. Esto ayudará a distanciar al operador del bidón que esté desplazando. En el supuesto de que todos los bidones de desechos cumplan los límites normales para el transporte de materiales radiactivos, de menos de 2 mSv/h en contacto con la superficie y menos de 0,1 mSv/h a 1 m de distancia, será posible transportarlos utilizando medios de manipulación mecánica.

Sin embargo, si la tasa de dosis de un bulto supera estos límites, habrá que tomar en consideración la posibilidad de un sobreembalaje, colocando el bidón en otro contenedor que tenga un blindaje adicional.

9.4.2. ¿Serán las tasas de dosis resultantes del conjunto de bultos de desechos inferiores a los límites reglamentarios para el trabajo en la instalación de almacenamiento?

Cuando la instalación de almacenamiento tenga un conjunto de bidones agrupados en una determinada disposición, la tasa de dosis combinada de todos ellos será superior a la de cada bidón.

Habrà que determinar el balance de dosis (evaluar la duración y la tasa de dosis de todas y cada una de las operaciones realizadas dentro de la instalación) de todas las actividades de la instalación de almacenamiento para verificar no solo que las tasas de dosis recibidas por los operadores estén dentro de los límites reglamentarios, sino también que estén optimizadas (véase más adelante).

Aunque la tasa de dosis de los distintos bidones sea aceptable, la tasa de dosis acumulada de todo el conjunto de bultos podría hacer necesaria la instalación de un blindaje adicional. Esto puede efectuarse de distintas formas:

- a) Si solo unos cuantos bidones requieren blindaje, es posible que se puedan blindar colocándolos detrás de otros bultos similares con tasas de dosis más bajas.
- b) Si se precisa un blindaje temporal, por ejemplo para un almacenamiento de breve duración antes del despacho de los bidones, podrán colocarse bloques de hormigón alrededor de cada bidón, o de un grupo de ellos, utilizando una carretilla de horquilla elevadora.
- c) Si se prevé la presencia constante de una serie de bultos con tasas de dosis más altas, podrá construirse una zona de almacenamiento blindado permanente dentro de la instalación (o una instalación aparte dedicada al almacenamiento blindado) utilizando hormigón o bloques de hormigón. La entrada deberá ser de laberinto para prevenir la radiación reflejada o dispersada; esto evitará la construcción de puertas blindadas caras y complejas.

9.4.3. ¿Se han optimizado las tasas de dosis resultantes del conjunto de bultos de desechos para los operadores de la instalación de almacenamiento?

Como se señaló anteriormente, incluso cuando las dosis recibidas por los operadores no superen los límites reglamentarios, será esencial también que estén optimizadas. Deberán estudiarse las opciones para reducir las tasas de dosis recibidas por los operadores mediante los métodos habituales de refuerzo

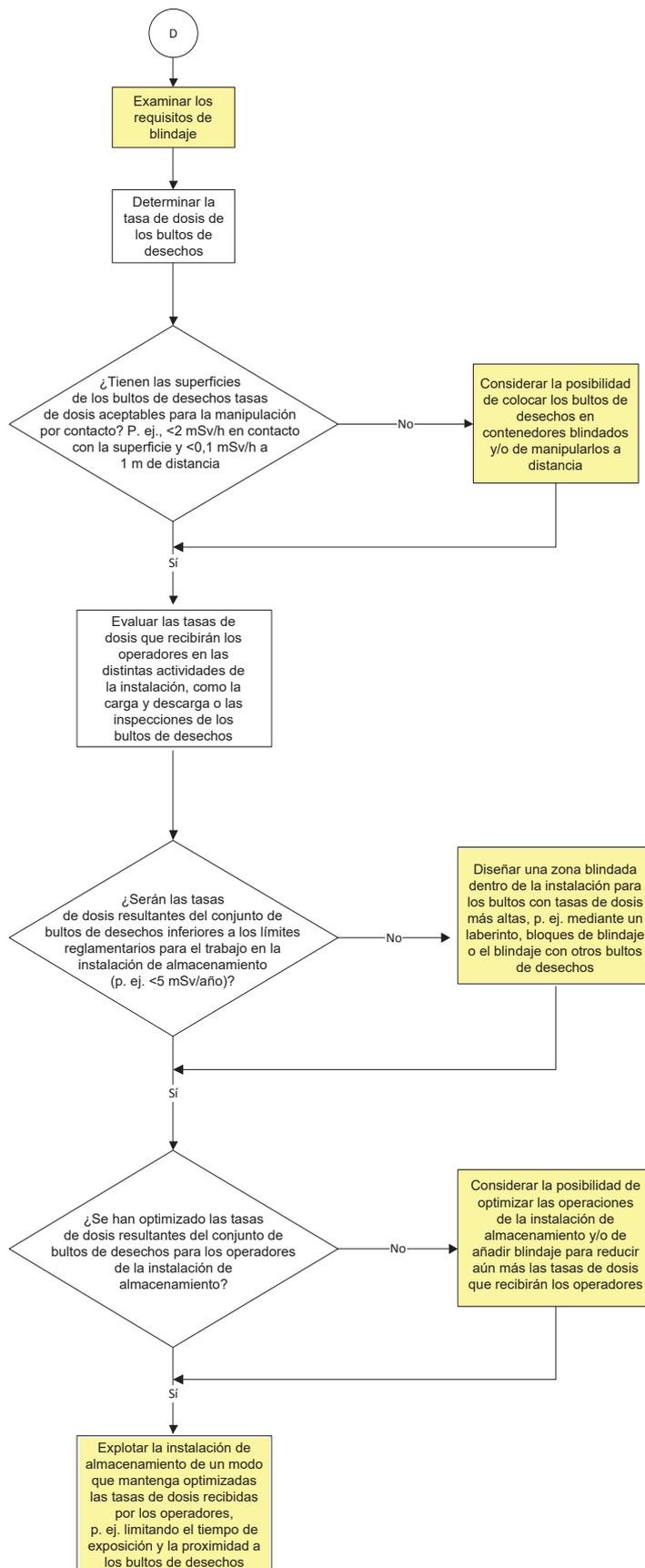


Fig. 9.4. Requisitos de blindaje.

del blindaje (como los indicados en la sección 9.4.2), aumento de la distancia o reducción del tiempo de exposición.

9.5. REQUISITOS DE MANIPULACIÓN MECÁNICA

El diagrama de flujo de la figura 9.5 evalúa los requisitos de manipulación de desechos en la instalación de almacenamiento.

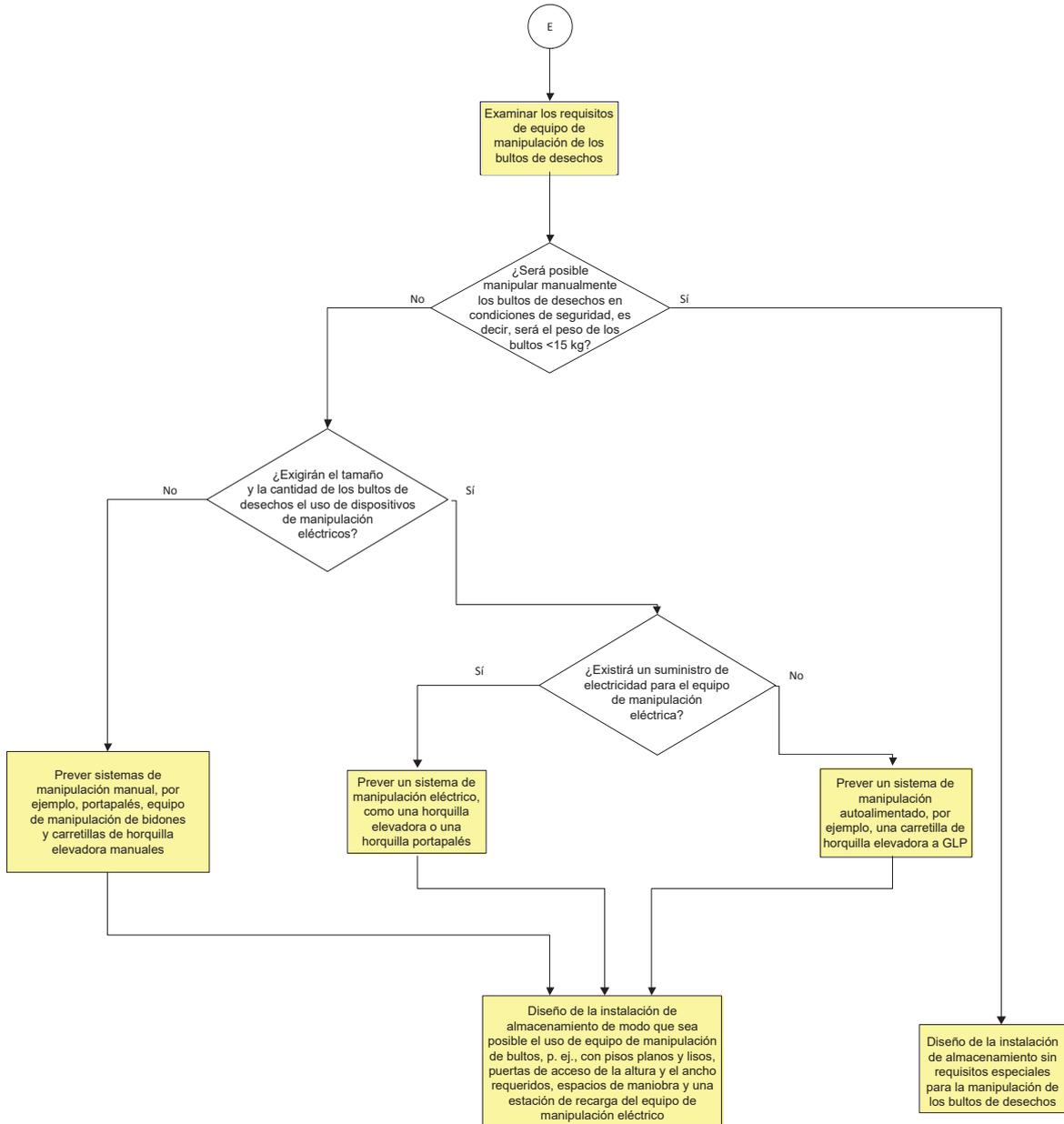


Fig. 9.5. Requisitos de manipulación mecánica.

9.5.1. ¿Será posible manipular manualmente los bultos de desechos en condiciones de seguridad?

Se supone que todos los bidones serán demasiado grandes para la manipulación manual, por lo que se requerirá equipo de manipulación e izaje.

9.5.2. ¿Exigirán el tamaño y la cantidad de los bultos de desechos el uso de dispositivos de manipulación eléctricos?

Dado el número relativamente pequeño de bidones previsto (de 30 a 40 por año, véase la sección 7), estos bidones podrán introducirse y retirarse de la instalación de almacenamiento con carretillas de horquilla elevadora y portapalés manuales, a condición de que la losa del piso sea lisa y plana.

El diseño y la disposición de la instalación de almacenamiento deberán tener en cuenta los requisitos para el uso de equipo de manipulación, entre ellos:

- a) el tamaño que deban tener las puertas de acceso;
- b) el espaciamiento requerido entre los bidones y entre las filas adyacentes de bidones;
- c) la separación de los accesos vehiculares y del personal;
- d) la necesidad de superficies razonablemente planas, lisas y con la capacidad de soporte de carga requerida.

Si es necesario transportar los bidones por un terreno más irregular, se precisará una horquilla elevadora eléctrica. Debería evitarse el equipo de manipulación especializado y optarse de preferencia por equipo fácil de conseguir, como las horquillas elevadoras con pinzas alzabidones y las horquillas portapalés.

9.5.3. ¿Existirá un suministro de electricidad para el equipo de manipulación eléctrica?

Lo ideal es utilizar equipo eléctrico, a fin de evitar la emisión de gases causada por los motores de combustión interna. Debería preverse una estación de recarga eléctrica alejada de la zona de almacenamiento principal. Este tipo de equipo disponible en el comercio requiere un acceso lateral a los bidones para levantarlos y colocarlos en su lugar. Este requisito es compatible con la mayoría de los conceptos de almacenamiento expuestos en la sección 8, pero no con todos ellos.

Si no hay electricidad, pueden utilizarse carretillas de horquilla elevadora autoalimentadas, por ejemplo a gas licuado de petróleo. Sin embargo, en este caso deberán tenerse en cuenta el riesgo de incendio y la necesidad de ventilación de los gases de escape en la instalación.

Algunos de los conceptos de almacenamiento presentados en la sección 8 requieren la manipulación de los bidones desde lo alto, con puentes grúa y con eslingas y pinzas. Esto puede aumentar la complejidad y el costo del diseño de la instalación de manipulación y almacenamiento de bidones, por razones como las siguientes:

- a) Los bidones podrían requerir elementos de izado particulares y tener que ser diseñados especialmente para la instalación de almacenamiento.
- b) La instalación de almacenamiento podría requerir elementos especiales, por ejemplo carriles para un puente grúa.
- c) Los bidones se elevarán generalmente a alturas mayores, por lo que las consecuencias de una caída podrían ser más importantes.

Debería evitarse la instalación de grúas complejas. Una simple estructura móvil en 'A' o una carretilla de horquilla elevadora conectada a una grúa giratoria deberían ser adecuadas, por ejemplo, para introducir los bidones/bultos de desechos por arriba en una cámara acorazada o un búnker construidos

bajo el suelo. Este equipo será adecuado también para levantar la cubierta blindada de la instalación de almacenamiento bajo el suelo.

9.6. EJECUCIÓN DEL PROYECTO DE LA INSTALACIÓN DE ALMACENAMIENTO

El diagrama de flujo de la figura 9.6 evalúa los requisitos para la ejecución del proyecto de la instalación de almacenamiento.

9.6.1. Instalación de almacenamiento nueva o ya existente

Habiendo establecido los requisitos de diseño de la instalación de almacenamiento, incluido su tamaño/capacidad en el presente y en el futuro, así como los requisitos de diseño fundamentales relativos, por ejemplo, al blindaje, la manipulación mecánica y, posiblemente, la ventilación, podrá tomarse una decisión con respecto a la viabilidad de adaptar una instalación ya existente para el almacenamiento de desechos o la necesidad de seleccionar un emplazamiento y construir una instalación nueva.

9.6.2. ¿Se ha seleccionado el emplazamiento?

La ubicación de la instalación de almacenamiento dependerá de varios factores, entre ellos:

- a) El lugar en que se encuentren los desechos.
- b) La distribución de los desechos (por ejemplo, si existen muchos productores de desechos en el país o solo uno o dos en una ciudad importante).
- c) La disponibilidad de personal debidamente cualificado y experimentado (como se señaló anteriormente).
- d) La seguridad física del emplazamiento (como se señaló anteriormente).
- e) La accesibilidad del emplazamiento, para llevar los bultos de desechos a la instalación de almacenamiento y despacharlos posteriormente a la instalación de disposición final.
- f) El factor de ocupación pública y el tráfico en los alrededores de la instalación (ambos deberían ser bajos).
- g) La disponibilidad de un edificio ya existente que pueda cumplir la función de almacenamiento.

Las condiciones ambientales locales también influirán en las características de diseño de la instalación de almacenamiento, que deberán tener en cuenta, por ejemplo:

- i) la carga del viento;
- ii) la carga de nieve;
- iii) las temperaturas diurnas máximas;
- iv) la posibilidad de inundaciones;
- v) las condiciones geológicas e hidrogeológicas.

De igual modo, la disponibilidad de materiales de construcción locales repercutirá en las características de diseño del depósito. Por ejemplo, los materiales para la construcción de edificios con estructura porticada de acero y revestimiento exterior (una técnica de construcción de edificios comerciales e industriales común en muchas partes del mundo) pueden no estar disponibles en algunos países.

El tema de la selección del emplazamiento escapa al ámbito de la presente publicación. El lector encontrará orientaciones sobre los criterios para la selección del emplazamiento en otra publicación del OIEA [9.1] (y en otras obras en ella citadas).

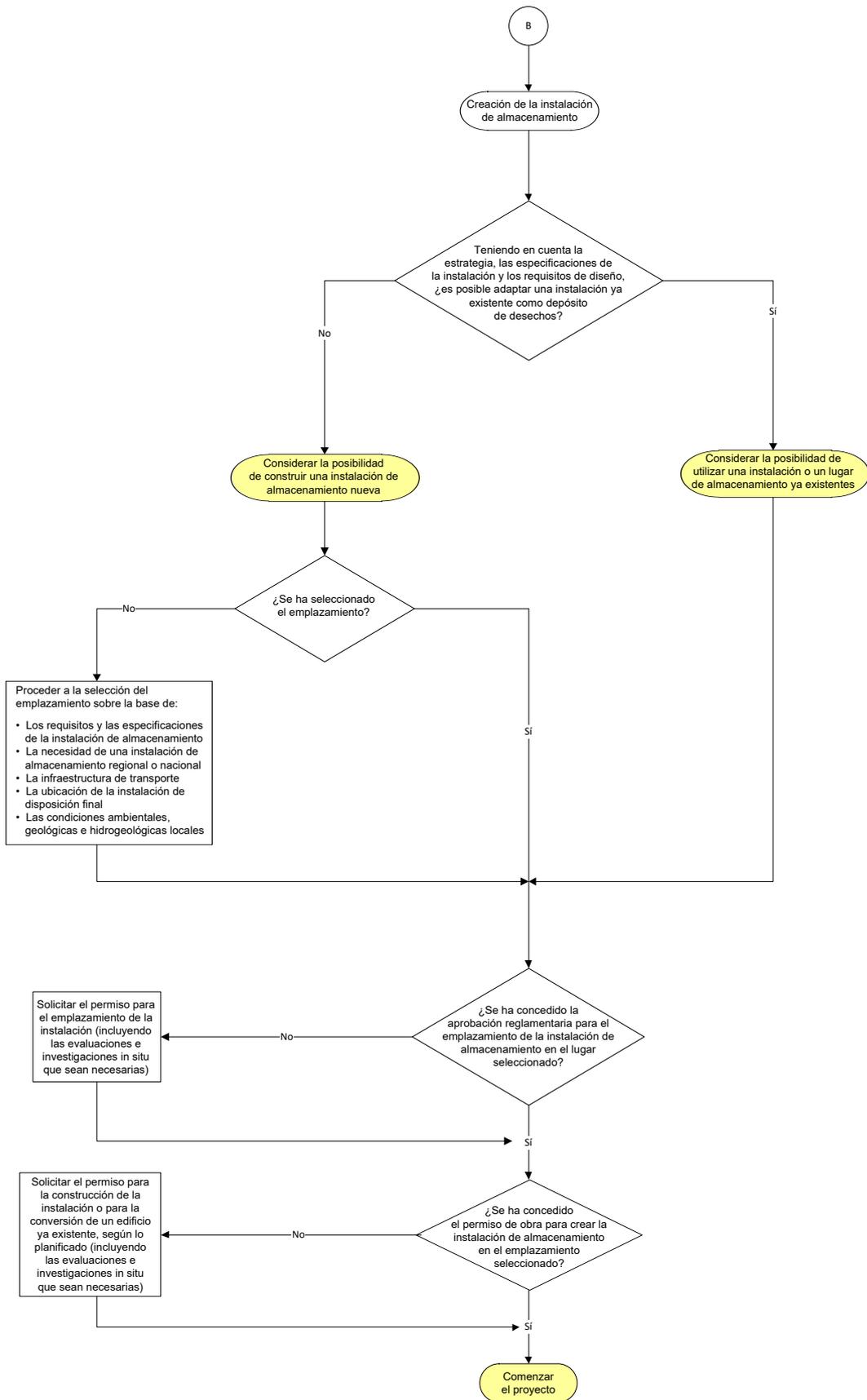


Fig. 9.6. Ejecución del proyecto de la instalación de almacenamiento.

9.6.3. ¿Se ha concedido la aprobación reglamentaria para el emplazamiento de la instalación de almacenamiento en el lugar seleccionado?

La aprobación reglamentaria será necesaria para obtener el permiso de crear una instalación de almacenamiento de desechos radiactivos en un emplazamiento dado. Deberán realizarse evaluaciones e investigaciones *in situ* para demostrar la seguridad física y la seguridad tecnológica de la instalación de almacenamiento en lo que respecta a la protección de la salud humana y del medio ambiente y al cumplimiento de la reglamentación vigente.

9.6.4. ¿Se ha concedido el permiso de obra para crear la instalación de almacenamiento en el emplazamiento seleccionado?

Se requerirá un permiso de obra para construir la instalación de almacenamiento o convertir un edificio ya existente con arreglo a lo planificado. También en este caso deberán realizarse evaluaciones e investigaciones *in situ* para respaldar la solicitud del permiso.

REFERENCIA DE LA SECCIÓN 9

- [9.1] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Almacenamiento de desechos radiactivos*, Colección de Normas de Seguridad del OIEA N° WS-G-6.1, OIEA, Viena, 2009.

10. INFORMACIÓN SOBRE EL DISEÑO Y LAS ESPECIFICACIONES DE LOS MÓDULOS DE ALMACENAMIENTO

Una vez seleccionado el módulo de almacenamiento adecuado, habrá que disponer lo necesario para la adquisición o construcción de ese módulo (un armario de almacenamiento, un contenedor ISO, un edificio nuevo construido para este fin, etc.). En la presente sección se ofrece información sobre el diseño y las especificaciones para ayudar al usuario a adquirir/construir los módulos de almacenamiento apropiados.

De las opciones para el almacenamiento indicadas en la sección 8, la más grande y compleja es el edificio nuevo construido para ese fin. A título de ejemplo, se proporcionan a continuación los detalles relativos a un edificio nuevo construido para el almacenamiento. Esta información se presenta en forma de descripciones que pueden adaptarse y utilizarse como especificaciones en los pliegos de condiciones para la adquisición. La finalidad de estas descripciones es ayudar al usuario a determinar sus necesidades, especificar sus requisitos para adquirir los módulos de almacenamiento apropiados y, por último, explotar esos módulos de almacenamiento.

El ejemplo que sigue debería servir de orientación con respecto a la diversidad de aspectos que habrán de tomarse en consideración y detallarse al elaborar las especificaciones para los otros módulos de almacenamiento.

10.1. EDIFICIO NUEVO CONSTRUIDO PARA EL ALMACENAMIENTO

10.1.1. Requisito funcional general

La función fundamental del edificio de almacenamiento es ofrecer un almacenamiento tecnológica y físicamente seguro, con posibilidades de recuperación y monitorización, para los bultos de desechos radiactivos acondicionados a la espera del envío a una instalación de disposición final adecuada.

La seguridad se refiere a la seguridad de los operadores que tendrán que acceder a la instalación de almacenamiento para cumplir sus tareas, y a la del público. También supone crear un ambiente en que los bultos de desechos no se degraden durante el período de almacenamiento, a fin de que puedan recuperarse y trasladarse a la instalación de disposición final en condiciones de seguridad.

10.1.2. Alcance de la obra

El edificio de almacenamiento incluirá lo siguiente:

- a) el edificio principal;
- b) los sistemas de manipulación de los bultos de desechos;
- c) sistemas auxiliares.

El edificio principal comprende:

- los cimientos y la losa del edificio;
- las paredes y el techo del edificio;
- las puertas de acceso;
- las estructuras de blindaje;
- las terminaciones de las superficies.

Los sistemas de manipulación de los bultos de desechos comprenden:

- el equipo de manipulación mecánica para la descarga de los vehículos de transporte, la transferencia de los bultos de desechos al edificio de almacenamiento, y su apilamiento (si es necesario);
- el equipo de monitorización de los bultos de desechos para controlar tanto la radiación como la contaminación;
- los materiales de descontaminación de los bultos de desechos, el equipo y la zona.
- Los sistemas auxiliares comprenden:
 - el sistema de monitorización radiológica;
 - el suministro de energía para el equipo eléctrico, el alumbrado eléctrico, la conexión a tierra y la protección antirrayos;
 - la comunicación y las alarmas;
 - el sistema de detección y alarma de incendios;
 - el sistema de lucha/protección contra incendios;
 - el sistema de ventilación;
 - la protección/seguridad físicas.

10.1.3. Ubicación del edificio de almacenamiento

Deberá describirse la ubicación propuesta del edificio de almacenamiento, incluyendo los planos de referencia pertinentes.

10.1.4. Descripción de los desechos

Los tipos de bultos de desechos, su tamaño y peso, sus características radiológicas y las cantidades por año se examinaron en la sección 7. En general, la mayoría de los bultos procedentes de la instalación o los módulos de procesamiento de desechos consistirán en bidones de 200 L, que contendrán ya sea desechos sólidos y líquidos generales acondicionados, o fuentes selladas en desuso en sus sobreembalajes blindados de transporte y almacenamiento. Ocasionalmente podrá recibirse algún cofre blindado de almacenamiento a largo plazo con fuentes de actividad alta procedente del módulo de celda caliente.

10.1.5. Período de almacenamiento

Lo ideal es que el período de almacenamiento de los bultos de desechos a la espera de la disposición final sea lo más breve posible. Sin embargo, con la ausencia de instalaciones de disposición final en algunos Estados Miembros en el presente y en el futuro previsible, es un hecho que el almacenamiento provisional prolongado (>10 años) puede ser inevitable.

La falta de una instalación de disposición final será más problemática aún cuando se trate de radionucleidos de período largo. Por lo tanto, para estos radionucleidos debería preverse un período de almacenamiento de varios decenios.

10.1.6. Requisitos operacionales (condiciones normales y anormales)

Los principales requisitos operacionales son los siguientes:

- a) recepción de los vehículos que transporten bidones/bultos de desechos;
- b) monitorización radiológica y de la contaminación del vehículo de transporte y de los bidones/bultos de desechos a la llegada;
- c) puesta en cuarentena y posterior descontaminación del vehículo de transporte y de los bidones/bultos de desechos, si se ha detectado contaminación;
- d) descarga de los bidones/bultos de desechos del vehículo de transporte;

- e) transferencia de los bidones/bultos de desechos al edificio de almacenamiento;
- f) aceptación y colocación de los bidones/bultos de desechos en su lugar de almacenamiento dentro del edificio;
- g) almacenamiento de los bidones/bultos de desechos durante todo el período previsto;
- h) mantenimiento de registros del almacenamiento;
- i) inspección y monitorización radiológica periódicas del edificio de almacenamiento y de los bidones/bultos de desechos;
- j) puesta en cuarentena de los bidones/bultos de desechos dentro del edificio de almacenamiento, si se detecta contaminación;
- k) envoltura/ensacado de los bidones/bultos de desechos en cuarentena y transferencia a una zona adecuada para su descontaminación, si se ha detectado contaminación;
- l) mantenimiento del edificio de almacenamiento y de todo el equipo conexo;
- m) protección física del edificio de almacenamiento;
- n) garantía de la seguridad radiológica de los operadores, por ejemplo mediante la monitorización del personal de operación y de mantenimiento a la salida del edificio de almacenamiento.

La intención del diseño es que el edificio de almacenamiento esté disponible para cumplir estos requisitos operacionales durante 250 días de funcionamiento al año (aunque no todas las operaciones deberán ejecutarse 250 días por año).

Durante el período de almacenamiento será necesario revisar periódicamente los bidones mediante visitas de inspección, para vigilar las condiciones físicas de los bultos y poder adoptar medidas tempranas si se detectan problemas. La propia instalación de almacenamiento también debería ser objeto de una monitorización radiológica periódica con el fin de:

- 1) verificar que los niveles de radiación sean aceptables (e identificar los bidones/bultos que puedan tener que reubicarse o situarse detrás de un blindaje, si los niveles no son aceptables);
- 2) monitorizar los niveles de contaminación aerotransportada y de las superficies, a fin de adoptar oportunamente las medidas adecuadas para reducir al mínimo la propagación de la contaminación y la dosis recibida por los operadores.

Por estas razones, es necesario almacenar los bidones de modo que:

- 1) sea relativamente fácil acceder a ellos e inspeccionarlos visualmente;
- 2) no sea necesario mover un gran número de bidones para acceder a uno de ellos en particular.

Deberían utilizarse métodos de descontaminación en seco para los vehículos, los bidones/bultos, el equipo y las zonas de trabajo.

La instalación de almacenamiento debería ser gestionada y explotada por personal debidamente cualificado y experimentado. Típicamente, deberá tener:

- 1) un director de operaciones: un radioquímico o radiofísico experimentado con un título de nivel universitario y experiencia en gestión de desechos radiactivos;
- 2) un supervisor de protección radiológica: una persona con experiencia en procedimientos y reglamentos de protección radiológica;
- 3) un supervisor: una persona que tenga experiencia práctica en la manipulación de desechos radiactivos y el control de calidad y que supervise las operaciones cotidianas;
- 4) operadores cualificados: personas con experiencia en operaciones de manipulación mecánica.

10.1.7. Información y registros

Debería reunirse y conservarse información sobre los desechos y las diferentes etapas del proceso de acondicionamiento. La ubicación de los bidones en la instalación de almacenamiento provisional debe quedar registrada. Para poder efectuar la planificación detallada, será necesario disponer de todos los datos pertinentes sobre los desechos, a saber:

- a) El identificador exclusivo de cada bulto de desechos.
- b) La ubicación de los bultos de desechos en la instalación de almacenamiento.
- c) Una descripción del contenido de los bultos de desechos:
 - i) características físicas;
 - ii) características químicas;
 - iii) características biológicas;
 - iv) contenido de radiactividad.
- d) El productor de los desechos (es decir, el usuario que los generó), con el nombre y la dirección.
- e) Los resultados y la fecha de la última inspección de los bultos de desechos.
- f) La tasa de dosis medida (por lo general, a 1 m distancia y en contacto con la superficie).

La información sobre los bultos de desechos debería obtenerse del explotador de la instalación de procesamiento que embolsó los desechos.

10.1.8. Requisitos funcionales de la construcción

Todos los edificios y estructuras civiles deberían diseñarse utilizando normas reconocidas, y la reglamentación edilicia aplicada debería constar en la documentación de la base de diseño del contratista. Los documentos del diseño deberían incluir los cálculos, las especificaciones y los planes de control de calidad de todos los aspectos de las obras estructurales y civiles, para su examen por el cliente.

El edificio debería ser una estructura sencilla, con una vida de diseño de 50 años. El contratista debería realizar los estudios del emplazamiento que sean necesarios, y no basarse en la información proporcionada por el cliente.

10.1.8.1. Construcción en general

El edificio de almacenamiento debería construirse con materiales incombustibles. El método de construcción de una instalación de almacenamiento en un Estado Miembro dependerá de diversos factores, incluidas las costumbres y prácticas desarrolladas en función del medio ambiente, los conocimientos de construcción existentes y la disponibilidad de materiales. Las opciones podrían incluir:

- a) Un edificio con armazón de hormigón armado y paredes y techo plano, también de hormigón, construido *in situ* (figura 10.1), que sería adecuado para un clima cálido y árido.
- b) Un edificio con armazón de hormigón armado, paredes de hormigón y techo inclinado para favorecer el escurrimiento, construido *in situ* (figura 10.2), que sería adecuado para un clima cálido y húmedo.
- c) Un edificio con armazón de acero, revestimiento de metal y aislamiento térmico, de techo inclinado (figura 10.3), que sería adecuado para un clima frío.

10.1.8.2. Condiciones del terreno

Las condiciones particulares del terreno en un lugar dado pueden crear la necesidad de cimientos más complejos. El sector edilicio local del Estado Miembro debería ser capaz de asesorar sobre el diseño de los cimientos. Las zonas anegadas deben evitarse, en general. Pero si es necesario construir la

instalación en una zona propensa a las inundaciones repentinas, la tradición edilicia local podría dictar la necesidad de elevar el piso sobre el suelo con pilares o estacas.



Fig. 10.1. Edificio con armazón de hormigón armado y techo plano construido in situ.



Fig. 10.2. Edificio con armazón de hormigón armado y techo inclinado construido in situ.



Fig. 10.3. Edificio con armazón de acero, revestimiento de metal y aislamiento térmico, de techo inclinado.

10.1.8.3. Construcción de la losa de cimentación/piso

- a) Un diseño básico de los cimientos sería una simple losa de hormigón armado, que constituya también la superficie de trabajo de la instalación de almacenamiento.
- b) La resistencia a la penetración del agua desde el suelo debería estar dada por una membrada hidrófuga de polietileno en la cara inferior de la losa.
- c) El edificio de almacenamiento debería estar dotado de un sistema interno de drenaje del piso que dirija todo líquido que se genere internamente hacia un colector de desagüe apropiado. El piso deberá tener la inclinación adecuada para facilitar el escurrimiento del líquido hacia los desagües. Debería haber disposiciones para la inspección del colector de desagüe y la toma de muestras del líquido acumulado.
- d) Internamente, el edificio debería estar construido de un modo que reduzca al mínimo el riesgo de fuga de líquidos hacia el exterior.
- e) Si es necesario, la losa del piso podrá incluir uno o más búnkers de almacenamiento bajo tierra para la colocación de los bidones/bultos de desechos de actividad alta. Estos búnkers deberían ser accesibles a través de paneles blindados extraíbles e intertrabados.
- f) Deberá prestarse particular atención a la impermeabilización de los búnkers construidos bajo el suelo, para evitar la entrada de aguas subterráneas.

10.1.8.4. Estructura del edificio

- a) La estructura del edificio y la infraestructura civil conexas deberían estar diseñadas para hacer frente a los fenómenos ambientales externos, tomando en consideración, por ejemplo, los que tengan una frecuencia de retorno de 1 en 50 años, según los datos locales.
- b) Los cimientos, las columnas, las paredes y el techo deberían estar diseñados de modo que soporten todas las cargas estructurales superpuestas, así como todas las cargas permanentes aplicables.
- c) La estructura debería diseñarse de modo que resista a todas las cargas variables que se apliquen, como los terremotos, el viento y la nieve.
- d) La losa del piso debería poder soportar las cargas puntuales concentradas de los contenedores de desechos, las cargas por choque que pudiera causar la caída accidental de esos contenedores y las cargas variables correspondientes a los vehículos utilizados para cargar los desechos.
- e) Si se utiliza hormigón para la construcción de las paredes, la losa deberá estar engrosada localmente en todo el perímetro del edificio, para soportar las paredes, y también en torno a todos los montantes internos.
- f) El agua de lluvia no debería poder entrar en ninguna zona de contención radiológica secundaria del edificio de almacenamiento.

10.1.8.5. Terminaciones

- a) La losa del piso tendrá un acabado flotante de acero revestido con una pintura de epoxi que ofrezca una superficie de poco desgaste y fácil de descontaminar.
- b) El contratista debería proponer terminaciones para las superficies de toda la planta que tengan en cuenta los peligros posibles y los requisitos de contención y descontaminación.
- c) El contratista debería ser responsable de dar a todas las estructuras, tuberías y equipos el acabado de pintura necesario para prevenir la corrosión. Los sistemas de pintura deberían ser compatibles con la vida de diseño requerida de la planta, y acordes con las recomendaciones de los fabricantes.
- d) Cuando haya conductos, tuberías o cables que atraviesen paredes, pisos y tabiques antiincendios, el contratista debería prever un medio adecuado para una posible ampliación y/o la debida resistencia contra incendios, y proporcionar un acabado prolijo. Todas las penetraciones a través de los tabiques antiincendios deberían estar selladas de modo que ofrezcan el mismo grado de protección que el tabique que atraviesen, lo que debe quedar demostrado con la documentación adecuada. En el punto

de entrada del edificio debería aplicarse un medio de impermeabilización patentado. El contratista debería cuidar, y demostrar, que ninguna entrada de tuberías a través de la estructura del edificio ponga en peligro la integridad estructural o la estanqueidad al fuego del edificio.

10.1.8.6. Blindaje

La estructura del edificio de almacenamiento debería ofrecer un blindaje radiológico que limite la exposición en el exterior.

Los distintos bidones pueden blindarse con otros bidones de desechos o con bloques de hormigón. Si el número de bidones que necesitan blindaje es mayor, podrá crearse una zona blindada, con una entrada de laberinto, dentro del edificio de almacenamiento (figura 10.4).

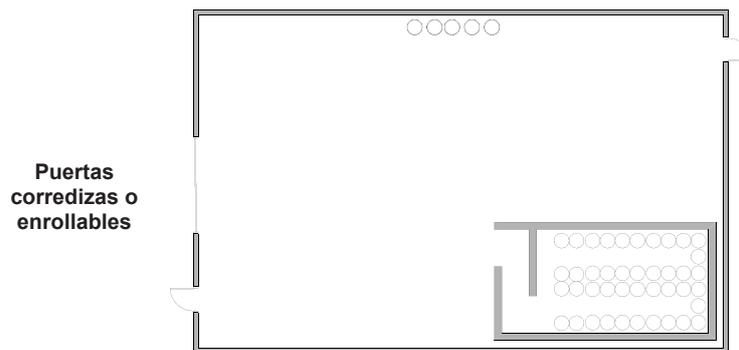


Fig. 10.4. Zona con entrada de laberinto y blindaje adicional para los bidones dentro del edificio de almacenamiento.

El edificio completo podría estar dotado de paredes externas blindadas y dividido internamente en varios compartimentos blindados, cada uno de ellos con una entrada de laberinto (figura 10.5). Las paredes blindadas serán de hormigón armado o de bloques de hormigón. Como ejemplo típico, para la radiación de una fuente o un bulto de desechos que contenga ^{137}Cs , un espesor de hormigón de 17 cm reducirá la tasa de dosis a una décima parte de su valor inicial. La duplicación del grosor del hormigón a 34 cm reducirá la tasa de dosis a una centésima parte del valor inicial.

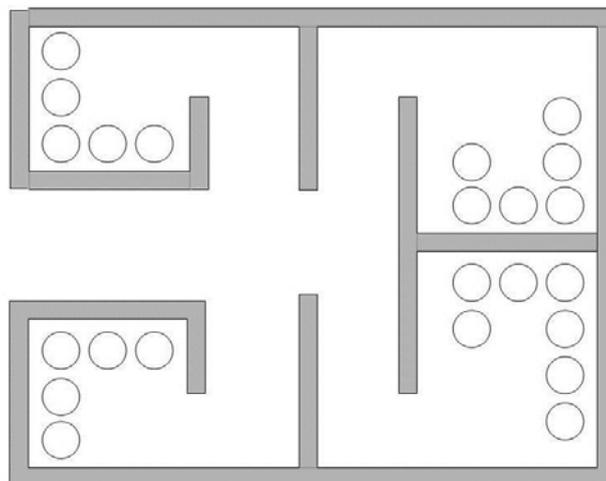


Fig. 10.5. Edificio de almacenamiento dividido en cuatro laberintos blindados.

Otra opción es almacenar los bidones/bultos de actividad alta en búnkers construidos en el subterráneo del edificio de almacenamiento (figura 10.6). Estos búnkers tendrán cubiertas extraíbles e intertrabadas para reducir los niveles de radiación encima de ellos. Los bidones/bultos de desechos se introducirán utilizando, por ejemplo, un puente grúa móvil o una carretilla de horquilla elevadora conectada a un brazo de grúa (véase, más adelante, la sección sobre la manipulación mecánica).

El concepto de diseño debería permitir la instalación y el uso de un blindaje temporal local para el personal de mantenimiento. Este blindaje deberá tener en cuenta los límites de carga de la losa del piso, si se aplica encima de los bultos de desechos.

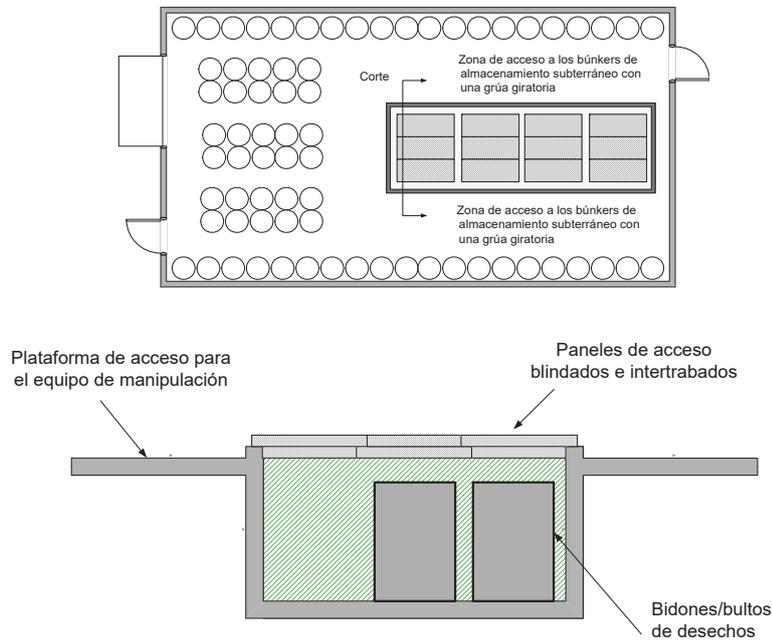


Fig. 10.6. Búnker subterráneo del edificio de almacenamiento.

10.1.8.7. Acceso

- El edificio tendrá por lo general una puerta de acceso vehicular (típicamente, una puerta corrediza o enrollable) para la entrada con una carretilla de horquilla elevadora cargada con un bidón de desechos. También debería existir una puerta aparte para el personal, a fin de separar al personal de los movimientos de vehículos. Pueden ser necesarias una o varias salidas de emergencia del personal. En aras de la seguridad física, estas puertas de emergencia deberían poder abrirse solo desde el interior.
- Las diferencias de nivel deberían estar reducidas al mínimo en todas las superficies, para no restringir la entrada o salida de vehículos y personas del edificio de almacenamiento.
- El contratista debería proporcionar los caminos y aceras necesarios para el acceso seguro a la planta del personal, los vehículos de servicio y los vehículos de manipulación y transporte de desechos.
- El edificio no debería tener ventanas, que pueden representar puntos débiles tanto para el blindaje como para la seguridad física.
- No habrá ninguna penetración en el techo: para reducir la exposición ocupacional, el techo debería estar diseñado de modo que requiera una actividad mínima de inspección y mantenimiento durante la vida útil de la instalación.
- En la entrada principal del edificio habrá un espacio y una toma de corriente para el equipo de monitorización radiológica del personal.

10.1.8.8. Construcción modular

Debería examinarse si es necesario construir la instalación de almacenamiento completa desde el comienzo, o si podría utilizarse un diseño modular, que pueda ampliarse en el futuro para obtener un espacio de almacenamiento adicional y que ofrezca una mejor relación costo-eficacia o por lo menos ayude a escalonar el gasto de capital.

Con un diseño modular simple (figura 10.7), podrán añadirse el segundo módulo y los módulos subsiguientes aumentando la longitud del edificio sin perturbar el uso de la zona de almacenamiento ya existente.

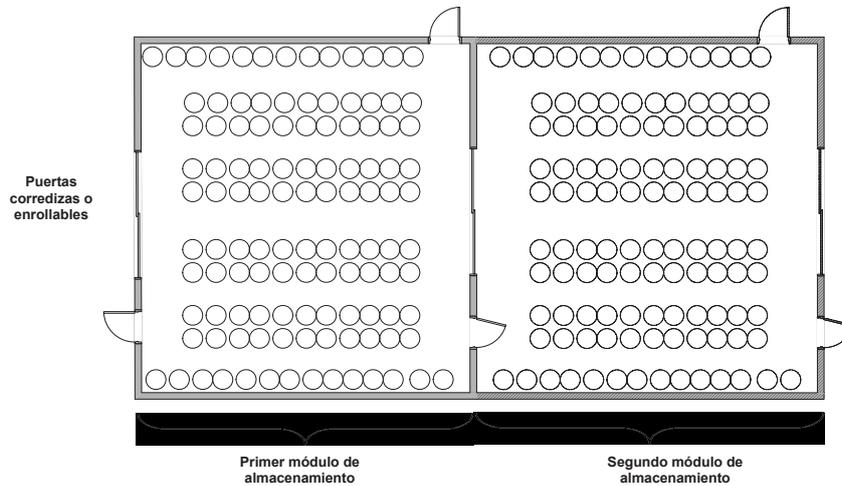


Fig. 10.7. Diseño modular del edificio de almacenamiento.

10.1.8.9. Apilamiento de los bidones/bultos de desechos

- Los bidones/bultos de desechos se apilarán de modo que no estén en contacto con la superficie interna de las paredes del edificio. El diseño debería permitir a los operadores la inspección visual, ya sea directa o a distancia, de las superficies de las paredes para verificar que no haya filtraciones de agua, y de las pilas de desechos adyacentes para detectar la posible degradación de los embalajes.
- Los bidones pueden colocarse en pilas de dos unidades en la instalación de almacenamiento, a condición de que tengan todos la misma altura. El apilamiento de bidones de alturas diferentes no se recomienda, porque puede no ser estable y representar un peligro para el operador. Si es necesario almacenar un gran número de bidones, podrá aumentarse la altura de apilamiento para minimizar la superficie requerida. Sin embargo, habrá que tener cuidado de asegurar la estabilidad de los bidones apilados.
- Los bidones deberían colocarse en filas, con pasillos intermedios que permitan el acceso de los operadores para la inspección de cada unidad y, si es preciso, la retirada de aquellas que requieran una inspección más a fondo o una reparación, o de las que deban despacharse para su disposición final, sin necesidad de mover un número importante de bidones.
- Pueden instalarse estanterías robustas para almacenar los bidones en dos niveles, aunque esto aumenta el costo y no representa un aprovechamiento óptimo del espacio.
- Los bultos de desechos y los sistemas de apilamiento deberían mantener su integridad de manipulación física durante los 50 años de la vida de diseño.
- Las operaciones de la instalación de almacenamiento, como la manipulación y el apilamiento, deberían minimizar el contacto de los trabajadores con los bultos de desechos a fin de reducir la exposición a la radiación y el riesgo de contaminación.

10.1.8.10. *Protección contra incendios*

Al planificar la disposición en planta de la instalación de almacenamiento y construir el edificio, será necesario prestar atención a la protección contra incendios. Este es un ámbito especializado, con respecto al cual el arquitecto del edificio podrá ofrecer asesoramiento para que se cumplan las normas de construcción del Estado Miembro de que se trate.

Los bidones de desechos acondicionados por solidificación o encapsulamiento no plantean un peligro de incendio importante. En cambio, los desechos compactables suelen ser papel y plásticos, que estarán compactados dentro del bidón y no encapsulados. Por lo tanto, presentan un peligro mayor de incendios y aumentarán la carga de fuego del edificio.

Las consideraciones en la etapa de planificación comprenderán lo siguiente:

- a) la protección de la estructura del edificio para que resista a un incendio;
- b) las vías de evacuación y las salidas de emergencia para el personal;
- c) los sistemas de detección de incendios;
- d) los sistemas de lucha contra incendios;
- e) la contención y la recuperación de los medios de extinción de incendios contaminados.

Cláusulas opcionales:

- 1) El edificio de almacenamiento debería tener un sistema de detección de incendios y un sistema de extinción por medios distintos del agua para detectar y combatir el fuego.
- 2) El sistema de detección de incendios y los paneles de acceso para los bomberos deberán encontrarse en el punto de acceso al edificio principal;
- 3) Las puertas y penetraciones del edificio deberían estar normalmente cerradas, y los sistemas de ventilación, si existen, deberían desconectarse manualmente cuando el edificio vaya a estar sin uso.

10.1.9. Requisitos referentes a la manipulación mecánica

Debería evitarse el equipo de manipulación especializado y optarse de preferencia por equipo fácil de conseguir, como las horquillas elevadoras con pinzas alzapidones y las horquillas portapalés. Dado el número relativamente pequeño de bidones previsto (de 30 a 40 por año), estos bidones podrán introducirse y retirarse de la instalación de almacenamiento con carretillas de horquilla elevadora y portapalés manuales, a condición de que la losa del piso sea lisa y plana.

El diseño y la disposición de la instalación de almacenamiento deberán tener en cuenta los requisitos para el uso de equipo de manipulación, entre ellos:

- a) el tamaño que deban tener las puertas de acceso;
- b) el espaciamiento requerido entre los bidones y entre las filas adyacentes de bidones;
- c) la separación de los accesos vehiculares y del personal;
- d) la necesidad de superficies razonablemente planas, lisas y con la capacidad de soporte de carga requerida.

Si es necesario transportar los bidones por un terreno más irregular, se precisará una horquilla elevadora eléctrica.

Lo ideal es utilizar equipo eléctrico, a fin de evitar la emisión de gases causada por los motores de combustión interna. Debería preverse una estación de recarga eléctrica alejada de la zona de almacenamiento principal. Si no puede evitarse el uso de carretillas de horquilla elevadora autoalimentadas, por ejemplo a gas licuado de petróleo, deberá prestarse atención a la ventilación de los gases de escape en la instalación.

El almacenamiento en búnkers bajo el suelo requerirá la manipulación de los bidones desde lo alto, con puentes grúa y con eslingas y pinzas. Esto puede aumentar la complejidad y el costo del diseño de la instalación de manipulación y almacenamiento, por razones como las siguientes:

- 1) Los bidones/bultos podrían requerir elementos de izado particulares y tener que ser diseñados especialmente para la instalación de almacenamiento.
- 2) La instalación de almacenamiento podría requerir elementos especiales, por ejemplo carriles para un puente grúa.
- 3) Los bidones/bultos se elevarán generalmente a alturas mayores, por lo que las consecuencias de una caída podrían ser más importantes.

Debería evitarse la instalación de grúas complejas. Una simple estructura móvil en 'A' o una carretilla de horquilla elevadora conectada a una grúa giratoria deberían ser adecuadas, por ejemplo, para introducir los bidones/bultos de desechos por arriba en una cámara acorazada o un búnker construidos bajo el suelo. Este equipo será adecuado también para levantar la cubierta blindada de la instalación de almacenamiento bajo el suelo.

10.1.10. Requisitos referentes al equipo mecánico

- a) Todas las estructuras y los equipos mecánicos deberían estar diseñados de conformidad con normas reconocidas, que se harán constar en la documentación de la base de diseño del contratista.
- b) Los documentos del diseño deberían incluir los cálculos, las especificaciones y los planes de control de calidad de todos los aspectos de las obras mecánicas, para su examen por el cliente.
- c) El equipo debería tener una vida de diseño de 25 años, con sujeción a los requisitos normales de sustitución de piezas establecidos en un régimen de mantenimiento.
- d) El equipo de proceso, mecánico, de calefacción, ventilación y aire acondicionado, eléctrico y de control situado en las zonas designadas como radiológicas debería reducirse al mínimo.
- e) Todos los elementos que requieran mantenimiento deberían tener una disposición ergonómica que permita el acceso a ellos sin necesidad de una escalera o plataforma temporal.
- f) Todas las instalaciones que requieran mantenimiento deberían tener a su alrededor suficiente espacio para un acceso seguro durante el mantenimiento y en caso de retirada de la instalación. Las vías de acceso y salida estarán definidas y deberá disponerse del equipo de manipulación mecánica apropiado.
- g) Debería existir equipo de izaje y transporte seguro y adecuado que permita trasladar elementos de la planta a un lugar determinado para su mantenimiento sin conexión al resto del equipo.
- h) El contratista debería suministrar toda herramienta especial que se necesite para explotar y mantener el equipo.
- i) Todo el equipo mecánico, incluidas las tuberías, debería estar debidamente etiquetado y marcado con un código de color de conformidad con las normas reconocidas.

10.1.11. Requisitos referentes al equipo eléctrico

- a) Toda la instalación y el equipo eléctricos deberían estar diseñados de conformidad con normas reconocidas, que se harán constar en la documentación de la base de diseño del contratista.
- b) Los documentos del diseño deberían incluir los cálculos, las especificaciones y los planes de control de calidad de todos los aspectos de las obras eléctricas, para su examen por el cliente.
- c) Todo el equipo eléctrico debería tener el grado de protección IP adecuado al entorno en que se encuentre, de conformidad con las normas reconocidas.
- d) Debería existir un equipo de conexión a tierra del edificio, y todas las instalaciones y los equipos, incluidas las bandejas portacables, deberían tener un sistema de compensación de potencial y conexión con la toma de tierra del edificio.

- e) Debería mantenerse una adecuada separación y segregación entre los cables de alimentación de energía eléctrica y los cables de los instrumentos y los sistemas de control.
- f) Los cables utilizados en toda la instalación deberían ser de baja emisión de humo y gases.
- g) Todo el equipo debería tener la certificación completa del cumplimiento de los requisitos de compatibilidad electromagnética definidos en los reglamentos y la legislación del Estado Miembro.
- h) Debería realizarse una evaluación del riesgo para determinar si se requiere una protección antirrayos de conformidad con las normas reconocidas. De ser así, el contratista deberá proporcionar la protección antirrayos.
- i) Toda la instalación y el equipo eléctricos deberían estar debidamente etiquetados y marcados con códigos de color con arreglo a un procedimiento que será preparado por el contratista y aprobado por el cliente.
- j) Todos los tableros de distribución y paneles de control deberían tener una lista de circuitos, con un acabado permanente y no inflamable, lavable y fácil de retirar, adherida a la superficie interna de la tapa. Los detalles de la lista de circuitos deberían describir adecuadamente la potencia correcta del dispositivo protector, la carga nominal y la ubicación de la fuente de alimentación de cada circuito.
- k) Los dispositivos de accionamiento eléctricos deberían estar provistos de un medio de aislamiento local que se pueda cerrar con llave.
- l) Se requerirá una iluminación adecuada para ejecutar las operaciones de la instalación de almacenamiento. El contratista debería encargarse del alumbrado del edificio, proporcionando niveles de iluminación de las salas que sean conformes con las normas reconocidas. Todos los dispositivos portalámparas tendrán una ubicación y un diseño que permitan reemplazar las bombillas desde el suelo o utilizando una escalera o plataforma temporal de no más de 2 m de altura.
- m) También deberían proporcionarse dispositivos de iluminación portátiles para la inspección visual periódica de los bidones.
- n) El alumbrado fijo de naves altas debería evitarse, a causa de la dificultad de acceso para el mantenimiento.

Cláusulas opcionales:

- 1) Debería instalarse un sistema de alumbrado de emergencia no permanente, que ilumine las vías de salida, con una señalización adecuada.
- 2) El contratista debería diseñar, instalar y poner a prueba los principales suministros de energía eléctrica del edificio desde el punto de terminación de red acordado.
- 3) Todo el equipo de distribución eléctrica y los recorridos de los cables deberían tener alrededor de un 30 % de capacidad excedente para la puesta en servicio y las modificaciones futuras.

10.1.12. Control ambiental

La instalación de almacenamiento debe proteger los bidones contra la degradación durante el período de almacenamiento. Esto significa que debe protegerlos de las condiciones meteorológicas, a fin de que la lluvia, la condensación y la humedad no conduzcan a la corrosión de los bultos de desechos. En su forma más simple, podría tratarse de un recinto impermeable con cierta ventilación natural que impida la acumulación de aire estancado en su interior. En este caso, el edificio de almacenamiento no requerirá ni ventilación forzada ni calefacción. En condiciones más extremas, la instalación de almacenamiento puede necesitar calefacción o refrigeración, junto con el control de la humedad.

10.1.13. Condiciones ambientales

Deberán determinarse y especificarse las condiciones ambientales previstas en el lugar en que se encontrará la instalación de almacenamiento, por ejemplo:

- a) las temperaturas máximas y mínimas;
- b) la humedad y/o las temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo;
- c) la pluviosidad máxima;
- d) las nevadas máximas;
- e) la fuerza máxima del viento;
- f) la posibilidad de inundaciones.

Esta información debería tener en cuenta el riesgo de recurrencia expresado como frecuencia de retorno, por ejemplo una frecuencia de retorno de 1 en 50 años (o un período mayor), determinado utilizando los datos locales.

10.1.14. Sismicidad

Deberán establecerse los requisitos de diseño antisísmico para el lugar de la instalación de almacenamiento y para la propia instalación, y es posible que deba demostrarse el comportamiento adecuado del equipo y las estructuras utilizados para los bultos de desechos (incluidas las pilas o estanterías) en lo que respecta a la estabilidad y, en definitiva, a la dosis que recibirían los operadores y el público en el caso de un suceso sísmico previsto en la base de diseño.

También en este caso, los requisitos deberían tener en cuenta el riesgo de recurrencia expresado como frecuencia de retorno, por ejemplo una frecuencia de retorno de 1 en 50 años (o un período mayor), determinado utilizando los datos locales.

10.1.15. Requisitos referentes a la calefacción, la ventilación y el aire acondicionado — optativos

- a) La ventilación de las zonas radiactivas debería determinarse mediante una evaluación del riesgo y ser conforme, en general, con las normas reconocidas y con la evaluación de la seguridad.
- b) Deberían establecerse medios de ventilación eléctrica para reducir los niveles de contaminación aerotransportada del edificio a un nivel aceptable.
- c) Todo el equipo de ventilación debería estar diseñado de conformidad con normas reconocidas, que se harán constar en la documentación de la base de diseño del contratista.
- d) Los documentos del diseño deberían incluir los cálculos, las especificaciones y los planes de control de calidad de todos los aspectos de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado, para su examen por el cliente.
- e) Toda la planta y los equipos de calefacción, ventilación y aire acondicionado deberían estar debidamente etiquetados de conformidad con las normas reconocidas pertinentes.
- f) Debería disponerse lo necesario para el ensayo *in situ* de los filtros HEPA de conformidad con las normas reconocidas.
- g) Los filtros HEPA deberían ser de manga y del tipo ‘de sustitución segura’.
- h) El contratista debería indicar las medidas adoptadas en el diseño para reducir al mínimo el nivel de ruido de los ventiladores en las zonas normalmente ocupadas de la planta. Cuando sea viable, deberán calcularse los niveles normales de ruido.
- i) Deberían adoptarse disposiciones para reducir la condensación dentro y en el exterior de los conductos.
- j) La necesidad de ventiladores y filtros de reserva y de cambio automático debería determinarse en la evaluación de la seguridad.

- k) Las zonas normalmente ocupadas deberían tener calefacción para mantener una temperatura de por lo menos 18 °C durante el invierno, suponiendo una temperatura exterior mínima (de saturación) de X °C (la temperatura efectiva en el Estado Miembro en cuestión). La temperatura máxima en las zonas normalmente ocupadas no debería exceder de 25 °C.
- l) El sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado debería mantener el ambiente adecuado en todas las demás zonas de la planta de proceso, para poder realizar las actividades de mantenimiento en condiciones ambientales aceptables.
- m) Las chimeneas de ventilación deberían estar provistas de dispositivos de muestreo continuo para controlar la radiactividad, según dispongan las normas reconocidas.
- n) Cuando los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado atraviesen estructuras y paredes de compartimentos resistentes al fuego, deberían instalarse válvulas cortafuego de una piroresistencia equivalente a la de la estructura y acordes con las normas reconocidas.

10.1.16. Requisitos de seguridad radiológica

El edificio de almacenamiento estará normalmente desocupado. La exposición del personal a la radiación debería optimizarse reduciendo el tiempo de trabajo requerido dentro de la instalación para la realización de todas las operaciones. Cuando la instalación esté llena, los sistemas de apoyo no funcionarán continuamente, sino según un calendario que se basará en los requisitos de inspección o mantenimiento periódicos.

El siguiente es un conjunto de requisitos de diseño que podrían especificarse con respecto a la seguridad radiológica. Todos los niveles de radiación citados a continuación son solo ejemplos ilustrativos, para dar una idea de las magnitudes. Las cifras deberían examinarse y revisarse en función de la caracterización de los bidones/bultos de desechos y de los requisitos de protección radiológica establecidos por los propios Estados Miembros:

- a) El edificio de almacenamiento debería diseñarse para almacenar materiales radiactivos sólidos de baja actividad, con tasas de dosis de menos de 10 mSv/h a 300 mm de distancia.
- b) Con las correspondientes autorizaciones del diseño, la seguridad radiológica y la licencia, los edificios de almacenamiento podrán utilizarse para almacenar materiales con tasas de dosis superiores a 10 mSv/h, o para almacenar desechos líquidos radiactivos.
- c) El interior de un edificio de almacenamiento está clasificado como zona controlada, y deberían cumplirse todos los requisitos pertinentes establecidos en las disposiciones de protección radiológica del Estado Miembro para el control del acceso, la señalización, el control de la contaminación, la detección de peligros, y la monitorización y las alarmas.
- d) En el caso de un edificio lleno, las tasas de dosis, medidas en contacto con la superficie exterior de sus paredes, deberán ser inferiores o iguales a 0,025 mSv/h.
- e) En un edificio de almacenamiento en la fase de carga activa, las tasas de dosis localizadas medidas en contacto con la superficie exterior de las paredes (o en las penetraciones) podrán superar los 0,025 mSv/h, pero deberán ser inferiores a 3 mSv/h. En estos casos, deberían aplicarse los requisitos de señalización establecidos en las normas reconocidas pertinentes.
- f) La tasa de dosis en la valla perimetral del emplazamiento adyacente al edificio de almacenamiento debe ser inferior a 0,0005 mSv/h como promedio mensual.
- g) La tasa de dosis media medida a 1 m sobre el techo del edificio de almacenamiento tras 15 años de servicio no debería superar los 0,1 mSv/h.
- h) Tiene que haber controles operacionales que permitan cumplir las tasas de dosis señaladas. Por ejemplo, para reducir la tasa de dosis debería utilizarse el autoblandaje, consistente en colocar bultos con tasas menores al lado o encima de cada bulto con una tasa más alta. Las áreas deberían tener marcados los requisitos de protección radiológica que se deban cumplir.

- i) Deberían existir controles operacionales para verificar el cumplimiento de las tasas de dosis exteriores prescritas en todas las zonas accesibles adyacentes a penetraciones de las paredes del edificio, como las puertas y los ventiladores.
- j) Los procedimientos de inspección y mantenimiento interior del edificio deberían estar concebidos de modo que se reduzca al mínimo la exposición y la proximidad de los trabajadores a los desechos almacenados.
- k) En los puntos de acceso al edificio debería haber monitores de manos y pies y/o medidores de la contaminación.

10.1.17. Requisitos de seguridad industrial

10.1.17.1. Seguridad operacional

- a) El interior del edificio debería estar construido de modo que se reduzcan al mínimo las interacciones poco seguras del tráfico vehicular y de personal.
- b) Las distancias de las columnas y paredes del edificio deberían ser suficientes para el desplazamiento seguro de los vehículos y el personal autorizados dentro del edificio de almacenamiento.
- c) Todos los sumideros y pozos sépticos deberían estar dotados de cubiertas con un buen ajuste, y ya sea protegidos por balizas o diseñados para resistir a los pesos vehiculares previstos.
- d) Durante las operaciones, todo el personal debería seguir los procedimientos de protección radiológica del cliente y las normas de seguridad de la empresa.
- e) El emplazamiento en torno al edificio de almacenamiento debería estar construido de modo que se reduzcan al mínimo, o incluso se eliminen por completo, las interacciones inseguras entre el tráfico vehicular y de personal.
- f) Las distancias desde el perímetro y las vallas del edificio deberían ser suficientes para permitir el paso seguro de los vehículos y del personal autorizados en el recinto del edificio de almacenamiento.
- g) El edificio de almacenamiento debería tener toda la señalización relativa a la seguridad, y a los incendios, las salidas de emergencia, la identificación del edificio, etc.

10.1.17.2. Seguridad de la construcción

A continuación se señalan algunos requisitos de carácter general. Cada Estado Miembro podrá añadir los requisitos que estime apropiados.

- a) Durante la construcción y el funcionamiento, todo el personal debería llevar cascos, calzado de seguridad y gafas de seguridad con protección lateral.
- b) Todo el personal que trabaje en superficies elevadas debería llevar los arneses de protección contra caídas adecuados.
- c) El personal que maneje dispositivos de elevación de personas debería estar debidamente cualificado. Todo el personal que se desplace en estos dispositivos debería llevar los arneses de protección contra caídas adecuados.
- d) El personal que esté trabajando en torno a equipos en movimiento debería llevar chalecos de seguridad reflectantes.
- e) Todo el personal que trabaje en excavaciones de más de 1200 mm de profundidad debería llevar dispositivos de extracción de personas.
- f) Todas las obras de construcción deberían realizarse de conformidad con la reglamentación de seguridad y salud ocupacional pertinente del Estado Miembro para los proyectos de construcción, el manual de salud y seguridad del propio contratista, y los planes de gestión ambiental y protección del medio ambiente.

10.1.18. Requisitos de protección/seguridad físicas

El acceso a las zonas de procesamiento y almacenamiento de desechos debería estar controlado para garantizar la seguridad tecnológica y la protección física de los materiales. Para cumplir los requisitos operacionales de control del acceso, puede aplicarse un enfoque que divida el emplazamiento en zonas, desde las más externas y menos protegidas hasta las internas que requieran los controles más estrictos.

Las medidas de seguridad física deberían impedir la adquisición de desechos radiactivos por personas malintencionadas mediante:

- la disuasión del acceso no autorizado a las fuentes o al lugar en que se encuentren;
- la detección de la intrusión (por ejemplo, con sensores de movimiento, televisión en circuito cerrado y guardias);
- la evaluación de la intrusión (por ejemplo, con videocámaras y guardias);
- la demora del acceso (por ejemplo, con jaulas y sistemas de sujeción) hasta que llegue la respuesta de las fuerzas competentes;
- la disponibilidad de medios de respuesta (por ejemplo, personal de seguridad física o agentes del orden);
- la gestión de la seguridad física a lo largo del tiempo (por ejemplo, con recursos y procedimientos adecuados).

A este respecto se propone un enfoque graduado de la seguridad física, en que los niveles de seguridad física (A, B o C) se apliquen en función de la categorización del peligro (de 1 a 5) que plantee la fuente o el material radiactivo (cuadro 10.1). Véanse más orientaciones en la referencia [10.1].

10.1.19. Requisitos de mantenimiento e inspección

- a) El objetivo del diseño debería ser proponer solo actividades de mantenimiento programado y correctivo que correspondan a la base de capacidades de la organización del cliente.
- b) Sin embargo, cuando se considere que el mantenimiento *in situ* supera las capacidades de la organización del cliente, debería reconocerse esta situación y justificarse la necesidad de un apoyo de mantenimiento especializado.

10.1.20. Fiabilidad

- a) El edificio de almacenamiento y los distintos elementos del equipo deberían estar disponibles para cumplir los requisitos operacionales del almacenamiento durante los 250 días de funcionamiento al año previstos en el diseño.
- b) El equipo debería estar diseñado para garantizar una capacidad operativa de recepción de $X \text{ m}^3$ de desechos al año.
- c) Esto debería demostrarse durante el primer año de funcionamiento.
- d) El edificio de almacenamiento y el equipo deberían diseñarse de modo que se optimice la disponibilidad de los sistemas, se minimice la cantidad de mantenimiento requerido, y el mantenimiento que sea necesario pueda realizarse de manera fácil, rápida y segura y a un costo mínimo.

10.1.21. Normas aplicables

- a) Las normas que se utilizarán serán las necesarias para asegurar la explotación segura y eficiente de un edificio de almacenamiento idóneo durante los 50 años de su vida en servicio.
- b) El diseño debería cumplir con los reglamentos legales y la legislación vigente y garantizar la seguridad de la explotación.

- c) Podrán utilizarse normas comerciales, a condición de que no comprometan la seguridad convencional y nuclear.

CUADRO 10.1. ENFOQUE GRADUADO DE LA SEGURIDAD FÍSICA EN FUNCIÓN DE LA CATEGORIZACIÓN DEL PELIGRO

Categoría	Fuente	Nivel de seguridad física	Objetivo de seguridad física
1	Generadores termoeléctricos de radioisótopos. Irradiadores. Fuentes de teleterapia. Fuentes de teleterapia fija de haces múltiples (bisturís de rayos gamma).	A	Impedir la retirada no autorizada de una fuente.
2	Fuentes de gammagrafía industrial. Fuentes de braquiterapia de tasa de dosis alta/media.	B	Reducir al mínimo la probabilidad de la retirada no autorizada de una fuente.
3	Calibradores industriales fijos con fuentes de actividad alta. Calibradores para diagrafía de pozos.	C	Reducir la probabilidad de la retirada no autorizada de una fuente.
4	Fuentes de braquiterapia de tasa de dosis baja (salvo placas oculares e implantes permanentes). Calibradores industriales fijos sin fuentes de actividad alta. Aparatos de densitometría ósea. Eliminadores de electricidad estática.	Aplicar las medidas descritas en las Normas básicas de seguridad del OIEA.	
5	Fuentes de braquiterapia de baja tasa de dosis, placas oculares e implantes permanentes. Aparatos de análisis por fluorescencia de rayos X (XRF). Detectores por captura de electrones. Fuentes de espectrometría Mössbauer. Fuentes de examen mediante tomografía por emisión de positrones (PET).		

10.1.22. Sistema de gestión

- a) El contratista debería realizar los trabajos de conformidad con los requisitos de gestión de la calidad establecidos en el contrato (podrán establecerse requisitos específicos adicionales a los básicos aquí enunciados). Toda referencia al contratista en este contexto debería aplicarse asimismo a los subcontratistas o trabajadores por cuenta propia que el contratista emplee o contrate, o de cuyos servicios se valga de alguna otra forma.
- b) En los casos y en la medida en que los materiales, productos y obras no estén plenamente detallados o especificados, deberán ser de un nivel adecuado al trabajo que se esté suministrando e idóneos para los propósitos que se hayan declarado en los documentos del contrato, o que puedan razonablemente inferirse de estos.
- c) El contratista debería establecer y mantener un sistema de gestión de la calidad que se aplique de conformidad, por ejemplo, con la norma ISO 9001.

- d) La adhesión al sistema de gestión de la calidad debería garantizar que el contratista ejecute y termine los trabajos con arreglo a lo estipulado en el contrato, y que dé pruebas de ello al cliente.
- e) A tal fin, el contratista debería presentar al cliente un programa de calidad en que detalle cómo gestionará la calidad de los trabajos durante el contrato.

10.1.23. Capacitación

- a) El contratista debería recomendar cursos de capacitación para el personal técnico y de operación. Estos deberían ser cursos estructurados, que incluyan simulaciones de la planta con simuladores ya sea integrados, basados en computadoras personales, o conectados separadamente. Los cursos deberían incluir descripciones del equipo informático y de los *softwares* aplicados, los diagnósticos de averías y las rectificaciones, así como instrucciones sobre los métodos para modificar el *software* del equipo y las precauciones correspondientes. El curso debería utilizar el manual de operaciones y mantenimiento del sistema para la capacitación en el desarrollo de las operaciones paso a paso, lo que ayudará a verificar el manual para su uso futuro.
- b) Debería suministrarse una carpeta de documentación que contenga información explícita y fácil de comprender, y una descripción detallada de los procedimientos paso a paso.

10.1.24. Garantía

- a) La garantía debería comenzar en el momento de la terminación satisfactoria de la puesta en servicio no activa y la aceptación por el regulador de que la instalación de almacenamiento está lista para recibir bidones/bultos de desechos.
- b) El período de garantía debería ser de 12 meses contados a partir de su fecha de inicio.

REFERENCIA DE LA SECCIÓN 10

- [10.1] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Seguridad física de las fuentes radiactivas, Colección de Seguridad Física Nuclear del OIEA N° 11*, OIEA, Viena, 2019.

11. DIRECTRICES OPERACIONALES PARA UNA INSTALACIÓN DE PROCESAMIENTO Y ALMACENAMIENTO DE DESECHOS

En esta sección se presentan otro tipo de consideraciones sobre la creación de una instalación de procesamiento y almacenamiento de desechos. Se trata de cuestiones relacionadas con la gestión, a diferencia de los aspectos referentes al equipo a los que se ha dedicado la mayor parte de esta publicación. A continuación se resumen primero las responsabilidades del explotador y luego se describe el sistema de gestión necesario para cumplir esas responsabilidades.

11.1. RESPONSABILIDADES DEL EXPLOTADOR

El explotador debería tener las siguientes responsabilidades:

- velar por que la generación de desechos radiactivos se mantenga en el mínimo posible;
- establecer y aplicar un programa de gestión de desechos adecuado, con un sistema de gestión apropiado para garantizar el cumplimiento de las condiciones de la autorización;
- proveer a la gestión de los desechos radiactivos adoptando las disposiciones adecuadas para su recolección, segregación, caracterización, clasificación, tratamiento, acondicionamiento, almacenamiento y disposición final, incluida la transferencia oportuna de los desechos de una fase de la gestión a otra;
- velar por que haya equipo e instalaciones disponibles para realizar las actividades de gestión de los desechos radiactivos en condiciones de seguridad;
- velar por que el personal competente esté debidamente capacitado y cuente con procedimientos operacionales para desempeñar sus funciones de manera segura;
- mantener el conocimiento de las prácticas de gestión de desechos y asegurar la retroinformación sobre las experiencias operacionales pertinentes;
- realizar las evaluaciones de la seguridad que correspondan según la complejidad de la instalación y el impacto que pueda tener en la salud humana y el medio ambiente;
- establecer y llevar registros de la información sobre la generación, el procesamiento, el almacenamiento y la disposición final de los desechos radiactivos, incluido un inventario actualizado de los desechos radiactivos almacenados;
- velar por que las descargas se monitoricen, registren y notifiquen al órgano regulador con suficiente detalle y exactitud para demostrar el cumplimiento de las autorizaciones correspondientes;
- informar prontamente al órgano regulador de cualquier descarga o emisión que exceda de las cantidades autorizadas;
- proporcionar al órgano regulador un inventario de los desechos radiactivos mantenidos, las descargas efectuadas y el material radiactivo retirado de las instalaciones y actividades reglamentadas, con la periodicidad y de la forma y con el grado de detalle que ese órgano exija;
- evaluar la integridad de las medidas e instalaciones de control de desechos para garantizar su tolerancia a fallos;
- establecer planes de contingencia y procedimientos de emergencia;
- notificar los sucesos y accidentes al órgano regulador;
- proporcionar al órgano regulador cualquier otra información sobre los desechos radiactivos que pueda requerir.

11.2. SISTEMA DE GESTIÓN

El cumplimiento de estas responsabilidades se logra mediante la aplicación de un sistema de gestión, junto con la selección y provisión del equipo adecuado para el procesamiento y almacenamiento de los desechos radiactivos. Dado que el equipo ha sido el tema de gran parte de esta publicación, en la presente sección la atención se centra en el sistema de gestión. Lo que sigue es inevitablemente solo una visión general, y en varias otras publicaciones del OIEA [11.1, 11.2] se encontrarán orientaciones más detalladas al respecto.

Los aspectos particulares del sistema de gestión que se examinarán son:

- la gestión y la dotación de personal;
- los procedimientos de control de las operaciones.

11.2.1. Gestión y dotación de personal

La definición precisa de la estructura de gestión de una instalación de procesamiento y almacenamiento de desechos particular dependerá de las circunstancias locales, pero hay algunos principios que son de aplicación general y que deberían tenerse en cuenta al establecer la estructura de gestión de una instalación:

- Una persona, designada como jefe de la instalación, debería tener la responsabilidad completa y la obligación de rendición de cuentas con respecto a la explotación y seguridad de la instalación. La instalación debería ser dirigida y explotada por personal debidamente cualificado y experimentado.
- La instalación debería tener una plantilla suficiente para desempeñar las diferentes tareas definidas. Estas comprenderán la dirección general, la seguridad (incluido el cumplimiento de la reglamentación), la calidad, las operaciones y la administración.
- En una instalación pequeña, será probablemente prudente y eficaz concentrar las tareas en un grupo reducido de empleados.
- Es fundamental garantizar que las tareas referentes a la seguridad y la calidad sean independientes de las responsabilidades operacionales, y que la persona o las personas designadas para desempeñar esas tareas rindan cuentas directamente al jefe de la instalación.
- Las personas designadas para las tareas clave deberían tener la debida cualificación y experiencia. Si carecen de esa formación o de la experiencia, debería brindárseles la oportunidad de subsanar esa deficiencia antes de asumir el puesto.
- La estructura de gestión debe perdurar también cuando la instalación esté inactiva. Este será probablemente uno de los requisitos reglamentarios, pero, de no ser así, el mantenimiento de la estructura de gestión, con las responsabilidades y las líneas de rendición de cuentas definidas, será un enfoque prudente para la gestión de los materiales radiactivos.

Típicamente, la instalación deberá tener el siguiente personal en los distintos niveles:

11.2.1.1. Director (*jefe de la instalación*)

El director es la persona que tiene la responsabilidad y debe rendir cuentas de la explotación y la seguridad de la instalación, y de la política de calidad referente a la instalación, sus procesos y sus sistemas de gestión. El director debería establecer una estructura de gestión operativa e implantar una política de calidad con responsabilidades, rendición de cuentas y líneas jerárquicas definidas y adecuadas que le ayuden a desempeñar su función, y nombrar a personas debidamente cualificadas y experimentadas para los puestos clave.

11.2.1.2. Supervisor de protección radiológica

El supervisor de protección radiológica debería tener experiencia en los procedimientos y reglamentos de protección radiológica. Sus funciones y responsabilidades comprenderán:

- el establecimiento del régimen de monitorización necesario;
- la recepción y evaluación de los resultados del servicio de dosimetría;
- el mantenimiento de los registros de dosimetría durante el período de tiempo adecuado;
- la adopción de las medidas necesarias sobre la base de los registros de la radiación y la dosimetría.

11.2.1.3. Gestor de la calidad

El gestor de la calidad debería ser un radioquímico o radiofísico experimentado con un título de nivel universitario y experiencia en gestión de desechos radiactivos. Sus funciones y responsabilidades comprenderán:

- la puesta en práctica, la gestión y el mantenimiento del sistema de calidad definido;
- la auditoría interna y externa del funcionamiento del sistema de calidad;
- el pronto seguimiento de los casos de incumplimiento y de las medidas correctivas hasta su conclusión lógica y adecuada.

11.2.1.4. Director de operaciones

Las funciones y responsabilidades del director de operaciones comprenderán:

- la recepción, el almacenamiento y el acondicionamiento de todos los desechos radiactivos de conformidad con las disposiciones sobre la calidad;
- la adopción de decisiones con respecto al destino de los desechos radiactivos;
- el mantenimiento de los registros de la recepción, el almacenamiento y el acondicionamiento de los desechos radiactivos durante el período de tiempo adecuado;
- la gestión del personal de operación.

Además, la instalación necesitará:

- un supervisor con experiencia práctica en la manipulación de materiales radiactivos y el control de calidad, que supervise las operaciones cotidianas;
- operadores cualificados con experiencia en el equipo de proceso y en los instrumentos y el equipo eléctrico correspondiente, así como en las operaciones de manipulación mecánica.

Como se señaló anteriormente, en una instalación pequeña será probablemente prudente y eficaz concentrar las tareas en un grupo reducido de empleados, en que cada persona cumpla una o varias funciones.

11.2.2. Procedimientos de control de las operaciones

Las actividades operacionales típicas del procesamiento y almacenamiento de desechos son las operaciones ordinarias de recepción, procesamiento, colocación, almacenamiento y recuperación de los bultos de desechos y su preparación para la disposición final. Las actividades de apoyo comprenden: la protección radiológica; la monitorización y vigilancia; los ensayos y la inspección de los bultos de desechos; la inspección de los componentes de la instalación de almacenamiento; el mantenimiento y las reparaciones; y el etiquetado de los bultos de desechos y el mantenimiento de registros.

Las instalaciones de procesamiento y almacenamiento deberían funcionar con arreglo a los protocolos escritos para la manipulación, el tratamiento y el almacenamiento de los desechos radiactivos sólidos y líquidos contaminados. Estos protocolos deberían garantizar el cumplimiento de los límites y condiciones operacionales aprobados para la instalación de almacenamiento por el órgano regulador. También tienen el objetivo de reducir al mínimo el volumen final de desechos acondicionados que se deba almacenar con vistas a su disposición final ulterior. Los protocolos operacionales comprenden lo siguiente:

- los límites y condiciones operacionales;
- los procedimientos de trabajo;
- el mantenimiento, los ensayos y la inspección;
- la capacitación;
- la información y los registros;
- la protección radiológica;
- la seguridad física.

A continuación se examina cada uno de estos elementos.

11.2.2.1. Límites y condiciones operacionales

Las instalaciones de procesamiento y almacenamiento deberían funcionar de conformidad con un conjunto de límites y condiciones operacionales, establecido a partir de la evaluación de la seguridad de la instalación con el fin de fijar los límites de una explotación segura. Los límites y condiciones operacionales contienen especificaciones relativas a los bultos de desechos, los sistemas y procedimientos de seguridad, los criterios radiológicos y las necesidades de personal. En el caso de las instalaciones de procesamiento y almacenamiento, deben ser establecidos por el explotador y sometidos a la aprobación del órgano regulador. Una publicación del OIEA contiene orientaciones sobre la elaboración y aplicación de los límites y condiciones operacionales para las centrales nucleares [11.3]; buena parte de esas orientaciones se aplican también a las instalaciones de procesamiento y almacenamiento de desechos radiactivos.

Los límites y condiciones operacionales para el procesamiento y almacenamiento de desechos deberían incluir, según corresponda:

- las especificaciones de los bultos de desechos (cuerpo del desecho, contenido de radionucleidos y características del contenedor), de conformidad con los criterios de aceptación de desechos de la instalación de almacenamiento;
- los límites de concentración de los desechos líquidos, por ejemplo para evitar la precipitación de sólidos;
- los requisitos referentes a los sistemas de seguridad, por ejemplo la necesidad de ventilación, extracción del calor, agitación del tanque y monitorización de la radiación, incluida la disponibilidad de estos elementos en condiciones normales y anormales;
- los requisitos de ensayos periódicos del equipo, especialmente los sistemas de respaldo que deban estar disponibles en situaciones de emergencia;
- las tasas de dosis de radiación máximas, especialmente en la superficie de los contenedores;
- los niveles máximos de contaminación en la superficie de los contenedores;
- los requisitos de capacitación y cualificación del personal y la dotación mínima de personal;
- los límites del inventario de radionucleidos acumulado.

Los límites y condiciones operacionales iniciales deberían elaborarse normalmente en cooperación con los diseñadores de la instalación mucho antes del comienzo de las operaciones, a fin de que el órgano regulador disponga de suficiente tiempo para su evaluación.

Los límites operacionales incluyen los criterios de aceptación de desechos de la instalación de procesamiento y almacenamiento que regirán para la aceptación de los desechos de actividad baja e intermedia en la instalación. Esos criterios deberían ser compatibles con la estrategia nacional de gestión de desechos, el marco regulador y la base de diseño.

Los criterios de aceptación deberían comprender elementos radiológicos y no radiológicos, con inclusión de la forma física y el embalaje de los desechos. También deberían indicar los criterios de exclusión. El objetivo debe ser simplificar al máximo la aceptación de los desechos de actividad baja e intermedia ordinarios describiendo:

- el método que deberían aplicar los generadores de desechos para lograr la aceptación de sus desechos de actividad baja e intermedia;
- los enfoques que se aplicarán con respecto a los desechos de actividad baja e intermedia que se reciban y que no cumplan los criterios;
- los requisitos de evaluación periódica del cumplimiento, por parte de los generadores de desechos, de los criterios de aceptación establecidos.

Los criterios deberían incluir un proceso para el examen de la aceptación en los casos en que se presenten desechos no ordinarios.

11.2.2.2. Procedimientos de trabajo

Deberían elaborarse procedimientos para gestionar y explotar la instalación de procesamiento y/o almacenamiento en condiciones normales, en caso de incidentes y en las condiciones de los accidentes postulados. Los procedimientos deberían abordar cuestiones como las que se señalan para la evaluación de la seguridad en la sección 12, y prepararse de modo que la persona que tenga la responsabilidad de hacerlo pueda entender y ejecutar cada acción en la secuencia correcta.

11.2.2.3. Mantenimiento, ensayos e inspección

Antes del inicio de las actividades, el explotador debería preparar un programa de las labores periódicas de mantenimiento, ensayo e inspección de los sistemas que serán esenciales para la explotación segura. La necesidad de mantenimiento, ensayos e inspecciones debería abordarse desde la etapa del diseño. Los ensayos y la inspección apuntan a establecer y verificar que las funciones, el desempeño y las condiciones sean conformes con los criterios de aceptación. El mantenimiento tiene por objeto proteger la viabilidad a largo plazo de los sistemas operativos y del equipo de manipulación y transporte de los desechos radiactivos. Se utilizan estrategias de mantenimiento preventivo y predictivo para optimizar el sistema y el comportamiento y la fiabilidad del equipo.

Los sistemas y componentes que deberían incluirse en los trabajos periódicos de mantenimiento, ensayo e inspección comprenden:

- los sistemas de contención de desechos, incluidos los tanques y otros contenedores;
- los sistemas de manipulación de desechos, incluidas las bombas y válvulas;
- los sistemas de calefacción y/o refrigeración;
- los sistemas de monitorización radiológica;
- la calibración de los instrumentos;
- los sistemas de ventilación;
- los sistemas de suministro de energía eléctrica normales y de reserva;
- los servicios públicos y los sistemas auxiliares, como el abastecimiento de agua, gas y aire comprimido;
- el sistema de protección física;
- las estructuras del edificio y el blindaje contra la radiación;

- los sistemas de protección contra incendios.

11.2.2.4. Capacitación

La capacitación en el servicio es un método eficaz de proporcionar instrucciones prácticas estructuradas. Los procedimientos escritos basados en el riesgo son un recurso inestimable para determinar la base de la capacitación que deberá ofrecerse al personal de mantenimiento y de operaciones.

Una capacitación eficaz en el servicio debería incluir:

- la comprensión de lo que se espera de la ejecución de la tarea (paso a paso);
- la demostración de la ejecución de la tarea;
- la observación, y la aceptación de la ejecución correcta de la tarea.

11.2.2.5. Información y registros

Debería establecerse y mantenerse un sistema de rastreo de los bultos de desechos. Para las instalaciones de procesamiento y almacenamiento de grandes dimensiones, deberá tomarse en consideración un sistema de rastreo informático. Cuando sea viable, debería prepararse y mantenerse un plan de almacenamiento detallado que indique la configuración de los bultos de desechos almacenados, con la zonificación de los niveles de peligros.

Debería reunirse y conservarse información sobre los desechos y las diferentes etapas del proceso de acondicionamiento. También debería registrarse la ubicación de los bidones en la instalación de almacenamiento provisional.

Para poder efectuar la planificación detallada, será necesario disponer de todos los datos pertinentes sobre los desechos, a saber:

- El identificador exclusivo del bulto de desechos.
- La ubicación del bulto de desechos en la instalación de almacenamiento.
- Una descripción del contenido de los bultos de desechos:
 - características físicas;
 - características químicas;
 - características biológicas;
 - contenido de radiactividad.
- El productor de los desechos (es decir, el usuario que los generó), con el nombre y la dirección.
- Los resultados y la fecha de la última inspección de los bultos de desechos.
- La tasa de dosis medida (por lo general, a 1 m de distancia y en contacto con la superficie).

En lo posible, la información sobre el bulto de desechos deberá obtenerse del usuario que lo generó.

11.2.2.6. Protección radiológica

Los objetivos del programa de protección radiológica son evitar que las dosis de radiación recibidas por los trabajadores y los miembros del público a raíz del funcionamiento normal y posiblemente también anormal de la instalación de almacenamiento excedan de los límites reglamentarios, y optimizar la protección radiológica. Además, deberían controlarse las emisiones de materiales radiactivos al medio ambiente, de conformidad con los requisitos establecidos por el órgano regulador.

Se requerirán sistemas de gestión para controlar las actividades que repercutan en:

- la contaminación radiactiva;
- las prácticas de monitorización de la contaminación;
- la emisión de líquidos y gases radiactivos al medio ambiente;

- la dosis de radiación recibida por las personas;
- el control del acceso a las áreas de las instalaciones autorizadas que se consideren zonas de alta radiación.

La protección radiológica se trata con más detalle en otras publicaciones del OIEA [11.4, 11.5].

11.2.2.7. Seguridad física

El acceso a las zonas en que se procesan y almacenan desechos debería estar controlado, a fin de garantizar la seguridad tecnológica y la protección física de los materiales. Para cumplir los requisitos operacionales de control del acceso, puede aplicarse un enfoque que divida el emplazamiento en zonas, desde las más externas y menos protegidas hasta las internas que requieran los controles más estrictos.

En la sección 10.1.18 figura información sobre las medidas y los enfoques referentes a la seguridad física, y se remite a una publicación del OIEA que contiene información más detallada sobre el tema.

REFERENCIAS DE LA SECCIÓN 11

- [11.1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Management System for the Processing, Handling and Storage of Radioactive Waste, IAEA Safety Standards Series No. GS-G-3.3, IAEA, Vienna (2008).
- [11.2] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Aplicación del sistema de gestión de instalaciones y actividades*, Colección de Normas de Seguridad del OIEA N° GS-G-3.1, Viena, 2016.
- [11.3] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Límites y condiciones operacionales y procedimientos de operación en las centrales nucleares*, Colección de Normas de Seguridad del OIEA N° NS-G-2.2, OIEA, Viena, 2009.
- [11.4] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGIA ATOMICA, *Optimización de la protección radiológica en el control de la exposición ocupacional*, Colección de Informes de Seguridad N° 21, OIEA, Viena, 2004.
- [11.5] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Protección radiológica ocupacional*, Colección de Normas de Seguridad del OIEA N° RS-G-1.1, OIEA, Viena, 2004.

12. PLANIFICACIÓN Y PREPARACIÓN PARA LA CREACIÓN DE UNA INSTALACIÓN DE PROCESAMIENTO Y ALMACENAMIENTO DE DESECHOS

Las instalaciones para la gestión de los desechos radiactivos deben establecerse en el marco de la política y la estrategia, la legislación y el control reglamentario vigentes a nivel nacional. Para ejecutar satisfactoriamente un programa de gestión de desechos se requiere una cuidadosa planificación y preparación. A continuación se resumen algunos de los principales aspectos que deben tenerse en cuenta al planificar y preparar la creación de una instalación de procesamiento y almacenamiento de desechos.

12.1. POLÍTICA Y ESTRATEGIA NACIONALES

La política nacional de gestión de desechos radiactivos es una piedra angular del sistema de gestión de estos desechos [12.1]. La política establece los objetivos o requisitos que deben cumplirse para una gestión segura y eficiente de los desechos radiactivos en el país. Como tal, debería incluir los objetivos de seguridad tecnológica y seguridad física, disposiciones para destinar recursos a la gestión de los desechos radiactivos, la determinación de los principales enfoques de gestión que se aplicarán a las distintas categorías de desechos radiactivos, la política de exportación/importación de esos desechos, y las disposiciones para la información y participación del público. Además, debería definir las funciones y responsabilidades de las organizaciones que participen en su aplicación. La política es establecida principalmente por el gobierno nacional, y puede ser luego codificada en el ordenamiento legal del país.

La estrategia de gestión de los desechos radiactivos establece los medios para cumplir los objetivos y requisitos definidos en la política nacional. La formulación de la estrategia exige un conocimiento de los desechos generados en el presente y de los que podrían generarse en el futuro, sus características y su clasificación. Las etapas de la formulación y aplicación de la estrategia comprenden la selección de los procedimientos tecnológicos, la asignación de las responsabilidades de aplicación de esos procedimientos, el establecimiento de mecanismos de supervisión y la elaboración de los planes de ejecución. Un elemento fundamental de la estrategia es la decisión con respecto al establecimiento de instalaciones de gestión de desechos a nivel nacional o regional, en lugar de gestionar los desechos en los distintos lugares en que se generan. El uso de instalaciones especializadas a nivel nacional o regional tiene ventajas importantes en materia de seguridad. Sin embargo, la decisión debería adoptarse teniendo en cuenta, entre otras cosas, las cantidades y los tipos de desechos generados, y los conocimientos especializados disponibles y su distribución en la región o el Estado. Al seleccionar el emplazamiento de una o varias instalaciones de gestión de desechos radiactivos a nivel nacional o regional, puede ser adecuado aprovechar las instalaciones en que se traten cantidades mayores de desechos radiactivos, como los laboratorios nacionales que disponen de los conocimientos especializados requeridos. La estrategia es establecida normalmente por el explotador o propietario de los desechos interesado, que puede ser un organismo gubernamental o una entidad privada.

12.2. MARCO JURÍDICO Y REGLAMENTARIO

La existencia de un marco jurídico y reglamentario amplio es esencial para alcanzar y mantener un nivel elevado de seguridad en la gestión de las instalaciones y actividades nucleares [12.2]. Para la gestión de los desechos radiactivos, es probable que el órgano regulador deba complementar la reglamentación nacional primaria sobre la concesión de licencias a las instalaciones nucleares con una cobertura más

detallada de toda la secuencia de operaciones, que incluya la generación de los desechos, el transporte, el almacenamiento intermedio o de desintegración radiactiva, el tratamiento, la inmovilización, y el almacenamiento a largo plazo o provisional a la espera de la disposición final. El órgano regulador puede controlar el diseño y la explotación de todas las instalaciones de gestión y almacenamiento de desechos emitiendo directrices directas detalladas o exigiendo la presentación de informes de análisis de la seguridad pormenorizados.

12.3. PLANIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE LAS OPCIONES DE PROCESAMIENTO

Antes de comenzar a construir una instalación de gestión de desechos radiactivos es esencial contar con un plan de gestión de desechos coherente y bien pensado. Para ser eficaz, la planificación deberá basarse en un inventario correcto de los tipos y volúmenes de desechos que se estén generando en ese momento, así como de buenas proyecciones de la producción de desechos en el futuro.

En su versión más simple, un plan de gestión de desechos radiactivos a largo plazo debería especificar:

- cuáles instalaciones deberán crearse para el tratamiento, el acondicionamiento y la disposición final de los desechos;
- dónde y cuándo habrán de construirse esas instalaciones;
- qué capacidad deberán tener.

En una situación ideal, el último paso debería ser la disposición final de los desechos acondicionados en una instalación creada para ese fin lejos del entorno humano. Sin embargo, la planificación de esas instalaciones puede llevar muchos años, y en no pocos casos será necesario prever un almacenamiento provisional de los desechos, a la espera de la disposición final.

Las opciones disponibles son numerosas, y habrá que evaluarlas teniendo en cuenta una serie de criterios, a veces en conflicto entre sí, para determinar el plan general óptimo. Los criterios podrían incluir consideraciones políticas, el costo, el impacto ambiental, la fiabilidad técnica y la flexibilidad para hacer frente a un futuro incierto.

Los diagramas de flujo examinados en las secciones 4 y 9 ofrecen orientaciones para seleccionar las opciones de procesamiento y almacenamiento. En algunos casos, como el de los desechos sólidos no compactables, el proceso de tratamiento recomendado es uno solo. En otros, como el de los volúmenes altos de desechos acuosos, se requieren algunas evaluaciones adicionales para seleccionar el proceso o los procesos de tratamiento preferidos.

Sin embargo, un plan de gestión de desechos radiactivos no es un fin en sí mismo, sino solo el primer paso. El plan debe ejecutarse, y los avances deben vigilarse y examinarse regularmente para determinar si es necesaria una modificación. Algunos de los aspectos que requieren particular atención son:

- la reglamentación adecuada;
- la aplicación eficaz;
- la coordinación y cooperación con los productores de desechos;
- la gestión profesional de las instalaciones;
- la capacitación adecuada del personal.

12.4. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LAS INSTALACIONES

La presente publicación ofrece orientaciones no solo sobre la selección de los módulos de procesamiento y almacenamiento, sino también sobre los requisitos y especificaciones de diseño de esos módulos. Una vez seleccionados los requisitos de diseño de los módulos de procesamiento y/o

almacenamiento, será necesario determinar si es factible adaptar una instalación ya existente o si debe seleccionarse un emplazamiento y construirse una instalación nueva. Como se señaló en la sección 9.6.2, deberán tomarse en consideración varios factores al decidir la ubicación de la nueva instalación.

Puede ser necesario obtener un permiso de obra del organismo gubernamental competente para construir la instalación o convertir un edificio ya existente con arreglo a lo planificado. Habrá que realizar evaluaciones e investigaciones *in situ* para respaldar la solicitud del permiso de obra.

Además, se requerirá la aprobación reglamentaria para obtener el permiso de crear una instalación de procesamiento o almacenamiento de desechos radiactivos en un emplazamiento dado. También en este caso, deberán realizarse evaluaciones e investigaciones *in situ* para demostrar la seguridad física y la tecnológica de la instalación en lo que respecta a la protección de la salud humana y el medio ambiente.

12.5. AUTORIZACIÓN Y CONCESIÓN DE LA LICENCIA

Un factor importante que contribuye a la gestión segura de los desechos radiactivos es la concesión de la autorización y la licencia para las instalaciones y las actividades de gestión de desechos por parte del órgano regulador. La autorización consiste en el otorgamiento, por el órgano regulador, de un permiso escrito para que un explotador realice una actividad o un conjunto de actividades especificado que tenga que ver con la selección del emplazamiento, el diseño, la construcción, la puesta en servicio, la explotación, la clausura o el cierre de una instalación. La licencia es el principal documento emitido por el órgano regulador que relaciona el marco jurídico del sistema regulador (es decir, las leyes y reglamentos) con las responsabilidades del explotador de una instalación en cada etapa del proceso de autorización.

El órgano regulador tiene la responsabilidad de la autorización, el examen y la evaluación reglamentarios, la inspección y la aplicación coercitiva, y el establecimiento de los principios, criterios, reglamentos y guías de seguridad. Para cumplir su responsabilidad relativa a la autorización, el órgano regulador establece un proceso de examen de las solicitudes correspondientes. De conformidad con las normas de seguridad del OIEA, la responsabilidad primordial de la seguridad de una instalación de procesamiento y almacenamiento de desechos recae en el explotador. A fin de obtener la autorización de una instalación, el explotador debe presentar información adecuada, con una demostración detallada de la seguridad, que será examinada y evaluada por el órgano regulador con arreglo a procedimientos claramente definidos. La aprobación de una solicitud por el órgano regulador se formaliza otorgando al explotador una autorización conforme con las leyes y reglamentos del Estado Miembro interesado. Una vez expedida la autorización, sus términos y toda condición que conlleve serán vinculantes para el explotador, a menos o hasta que el órgano regulador la modifique, suspenda o revoque.

El proceso de autorización de una instalación de gestión de desechos previa a la disposición final, los requisitos de seguridad y la documentación de apoyo de la solicitud de autorización deben ser conformes con la legislación nacional pertinente. Aunque los detalles de las legislaciones nacionales pueden diferir, deberían estar en consonancia con las buenas prácticas internacionales expuestas en las normas del OIEA y otras normas internacionales.

Por lo general, la solicitud de autorización debería comprender lo siguiente:

- una demostración del nivel de seguridad requerido para la instalación;
- una demostración de la protección del medio ambiente tanto a corto como a largo plazo;
- una garantía de que la generación de desechos radiactivos secundarios en la instalación se mantendrá en el mínimo posible;
- una demostración de que se han tenido en cuenta las interdependencias de todos los pasos de la gestión de desechos radiactivos;
- una garantía de que el procesamiento al que se vayan a someter los desechos radiactivos será compatible con el tipo de almacenamiento planificado, su duración prevista y la necesidad de poder recuperar los desechos radiactivos almacenados;

- una estimación de los costos de las instalaciones de gestión de desechos, y la responsabilidad del explotador con respecto a la gestión de los desechos radiactivos a largo plazo;
- una garantía de que se han tenido en cuenta la generación de desechos prevista para el futuro, la rendición de cuentas por los desechos, las opciones de disposición final y las consideraciones de seguridad;
- una garantía de la aceptación/tolerancia de la instalación por el público;
- una garantía de la seguridad física adecuada.

En otra publicación del OIEA se ofrecen orientaciones sobre el contenido detallado de los documentos que deberían presentarse al órgano regulador para respaldar la solicitud de autorización de una instalación de procesamiento y almacenamiento de desechos, y sobre los modos de obtener la información requerida [12.3].

12.6. SEGURIDAD

La función general del órgano regulador en relación con la seguridad de la gestión de los desechos radiactivos consiste en establecer las normas de seguridad y garantizar su cumplimiento. Los requisitos referentes a la seguridad de los desechos pueden cumplirse de distintas maneras. El órgano regulador debería proporcionar orientaciones nacionales sobre la forma de hacerlo. También hay varias normas de seguridad del OIEA que deberían consultarse con respecto a las cuestiones de interés referentes al procesamiento y almacenamiento de los desechos [12.4 a 12.8].

El órgano regulador debería exigir que el usuario o el explotador presenten documentación sobre la seguridad en apoyo de la solicitud de una licencia u otro tipo de autorización que se refiera a la gestión de desechos radiactivos. La documentación debería incluir un informe de evaluación de la seguridad acorde con la complejidad de la instalación.

La documentación sobre la seguridad que se adjunte a la solicitud de licencia debería abordar, como mínimo, los siguientes aspectos:

- las características y los volúmenes previstos de los desechos que se procesarán y/o almacenarán, y los criterios de aceptación pertinentes;
- una descripción de las actividades de manipulación, procesamiento y almacenamiento;
- una descripción de la instalación y sus componentes, equipos y sistemas;
- la caracterización del emplazamiento;
- el control de las operaciones dentro de la organización;
- los manuales de procedimientos y operaciones relativos a las actividades con repercusiones importantes para la seguridad;
- la evaluación de la seguridad;
- los programas de monitorización;
- el programa de capacitación del personal;
- los aspectos relativos a las salvaguardias, cuando sea el caso;
- las disposiciones para la protección física de los materiales radiactivos;
- el plan de preparación y respuesta para casos de emergencia;
- el sistema de gestión;
- la clausura;
- los criterios de aceptación para los bultos de desechos.

La evaluación de la seguridad de la instalación de procesamiento y almacenamiento de desechos será necesaria para elaborar la justificación de la seguridad de la instalación, que demuestre el cumplimiento de los requisitos reglamentarios del Estado Miembro de que se trate. Los principales pasos de esta metodología suelen ser:

- la determinación de la exposición de los operadores y el público dimanante de las operaciones normales;
- la determinación de los peligros que podrían plantearse en caso de accidente;
- una evaluación de la frecuencia de los accidentes posibles;
- un cálculo de las consecuencias de estos accidentes, si llegaran a producirse;
- la combinación de las frecuencias y consecuencias evaluadas de los accidentes para obtener el riesgo;
- la suma de los riesgos de todos los escenarios de accidentes;
- la comparación de este riesgo total con los criterios reglamentarios o de otra índole;
- una reevaluación del diseño de la instalación, si el riesgo total calculado supera los criterios reglamentarios.

REFERENCIAS DE LA SECCIÓN 12

- [12.1] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Policies and Strategies for Radioactive Waste Management, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-G-1.1, IAEA, Vienna (2009).
- [12.2] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Infraestructura legal y estatal para la seguridad nuclear, radiológica, de los desechos radiactivos y del transporte*, Colección de Normas de Seguridad del OIEA N° GS-R-1, OIEA, Viena, 2004.
- [12.3] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, License Applications for Low and Intermediate Level Waste Predisposal Facilities: A Manual for Operators, IAEA-TECDOC-1619 (2009).
- [12.4] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Almacenamiento de desechos radiactivos*, Colección de Normas de Seguridad del OIEA N° WS-G-6.1, OIEA, Viena, 2009.
- [12.5] 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.
- [12.6] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Clasificación de desechos radiactivos*, Colección de Normas de Seguridad del OIEA N° GSG-1, OIEA, Viena, 2015.
- [12.7] ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA, *Gestión de desechos procedentes de la utilización de materiales radiactivos en medicina, industria, agricultura, investigación y educación*, Colección de Normas de Seguridad del OIEA N° WS-G-2.7, OIEA, Viena, 2009.
- [12.8] 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.

13. CONCLUSIONES

En esta publicación se ha presentado un enfoque modular del diseño de una instalación de procesamiento y almacenamiento de desechos con el fin de atender a las necesidades de los Estados Miembros que no tienen reactores nucleares de potencia ni instalaciones del ciclo del combustible, pero que generan pequeñas cantidades de desechos radiactivos de actividad baja e intermedia y fuentes selladas en desuso procedentes de las aplicaciones de técnicas nucleares. Este enfoque es una solución flexible y eficaz en relación con el costo, que permite una fácil adaptación a los cambios en las necesidades de capacidad y de tratamiento de diferentes corrientes de desechos. Comprende un conjunto de diseños de ingeniería, elaborado y presentado en esta publicación al objeto de ofrecer orientaciones específicas sobre la solución modular que pudiera ser más adecuada para responder a las necesidades de gestión antes de la disposición final en esas situaciones. La publicación incluye una sección sobre las directrices operacionales y un panorama general de los principales requisitos para establecer una instalación de procesamiento y almacenamiento de desechos.

El conjunto de diseños de procesamiento comprende 11 módulos prediseñados para diferentes métodos de tratamiento y acondicionamiento de bajos volúmenes de desechos líquidos y sólidos, y de fuentes selladas en desuso. Los módulos prediseñados estarán montados en plataformas y podrían construirse y ensayarse en una fábrica, de modo que el usuario final solo tenga que ocuparse de la conexión a los servicios (como la energía eléctrica y el agua). El conjunto incluye orientaciones sobre la selección de las opciones técnicas adecuadas para el procesamiento de los desechos. Ofrece información sobre el diseño y las especificaciones de cada módulo de procesamiento, lo que incluye la base de diseño, un diagrama de flujo del proceso, la lista y descripción del equipo, la descripción y el funcionamiento del proceso, y los requisitos de interconexión e integración. En la mayoría de los casos se necesitará una combinación de módulos, y no uno solo, para procesar una corriente de desechos. A fin de ilustrar las posibilidades de integración de los módulos, se han incluido algunas combinaciones típicas. En los anexos figuran orientaciones sobre la forma de especificar los requisitos para la adquisición de los distintos módulos, junto con ejemplos de un pliego de condiciones para la compra de uno de ellos.

El procesamiento de los desechos suele dar lugar a un bulto adecuado para el almacenamiento y/o la disposición final. El conjunto de diseños para el almacenamiento comprende una variedad de conceptos, desde un simple armario, pasando por los contenedores ISO estándar, hasta un edificio construido específicamente para ese fin. En función del volumen de desechos que se deba almacenar, podrá seleccionarse el concepto más apropiado, utilizando los diagramas de decisiones como orientación. Para el caso del edificio construido específicamente con ese fin, se ofrece información sobre el diseño y las especificaciones, detallando los requisitos funcionales de la construcción y el almacenamiento, los requisitos operacionales, mecánicos y eléctricos, y los requisitos de control ambiental, ventilación, seguridad tecnológica, seguridad física, y mantenimiento e inspección, entre otros. Esta información consiste en descripciones presentadas de modo que puedan adaptarse para su uso como especificaciones de compra en el diseño detallado y la construcción de una instalación de almacenamiento.

En resumen, la presente publicación ofrece principalmente orientaciones prácticas que permitirán a los usuarios determinar sus necesidades de procesamiento y almacenamiento de desechos, especificar sus requisitos para poder adquirir los módulos de procesamiento y almacenamiento adecuados, e instalar y, por último, explotar esos módulos. Aunque la premisa es que los módulos de procesamiento serán adecuados para bajos volúmenes de desechos, es posible, en cierta medida, alcanzar una capacidad de procesamiento mayor aumentando la frecuencia o la duración del uso de cada módulo. Asimismo, es posible añadir nuevos módulos de almacenamiento, o ampliar los ya existentes, para aumentar la capacidad. Se espera que este conjunto de diseños modulares permita a los usuarios finales seleccionar y combinar diversos módulos de procesamiento y almacenamiento de desechos para satisfacer sus necesidades del momento de manera rápida y eficaz en relación con el costo, con la posibilidad de introducir fácilmente los ajustes requeridos para una futura expansión.

Anexo I

ORIENTACIONES SOBRE LA PREPARACIÓN DE LOS PLIEGOS DE CONDICIONES TÉCNICAS PARA LA ADQUISICIÓN

La información requerida para preparar las especificaciones técnicas de compra de los módulos de procesamiento y almacenamiento está disponible, en su mayor parte, en el cuerpo de la presente publicación. En este anexo figuran orientaciones sobre el formato y los epígrafes de un pliego de condiciones para los módulos de procesamiento. En el anexo II se ofrecen ejemplos de las especificaciones técnicas para la adquisición de un módulo de proceso, con el fin de ilustrar los aspectos que deben tratarse en ellas y el modo de obtener esta información. Cabe señalar que las especificaciones serán parecidas ya sea que se refieran a un único módulo de proceso o a toda una instalación de procesamiento y almacenamiento de desechos compuesta por varios módulos. El objetivo del pliego de condiciones es proporcionar una definición clara de:

- el alcance de los trabajos requeridos, es decir, lo que el contratista deberá hacer y también lo que no deberá hacer (porque lo hará otra persona);
- los requisitos técnicos, es decir, lo que el diseño, el equipo o la instalación deberán poder realizar;
- el modo en que se habrá de efectuar el trabajo, por ejemplo, las normas de garantía de calidad, las normas aplicables a los planos y a la documentación, y los requisitos de examen, aceptación o aprobación de los trabajos antes de pasar a la etapa siguiente;
- los modos en que el contratista deberá demostrar que ha cumplido los requisitos técnicos, por ejemplo, la inspección, el ensayo y la puesta en servicio del equipo, así como la entrega de la documentación;
- la información que el contratista necesitará para realizar el trabajo o, por lo menos, para presentar su oferta a la licitación.

A continuación figura un resumen de los epígrafes y el contenido típicos de un pliego de condiciones técnicas.

Sección y descripción	Contenido
1. INTRODUCCIÓN Breve descripción del proyecto para establecer el contexto.	Deberá redactarse específicamente para cada proyecto.
2. ALCANCE E INTERCONEXIONES Definición detallada y cuidadosa del alcance del suministro. Esta sección debería comprender una descripción pormenorizada de los elementos o servicios que el contratista habrá de proporcionar, como equipos, programas informáticos, informes, etc. Definición de las delimitaciones, los límites de las baterías, los puntos de terminación de red, las interrelaciones con una lista de propietarios y las responsabilidades. Mención específica de las exclusiones, para mayor claridad.	El alcance general podría incluir el diseño, la construcción, el ensayo, la entrega en el emplazamiento, la instalación y la puesta en servicio. El alcance del suministro podría abarcar solo un módulo, varios módulos, o una instalación completa de procesamiento y almacenamiento de desechos, con un edificio y un depósito de almacenamiento. La especificación de las interconexiones indica los requisitos de conexión a servicios (electricidad, agua, aire), iluminación, medios de drenaje, calefacción, ventilación y aire acondicionado y comunicación de cada módulo.

Sección y descripción	Contenido
<p>3. DEFINICIONES Definición de los términos que no sean de uso común.</p>	<p>Deberá redactarse específicamente para cada proyecto.</p>
<p>4. REQUISITOS TÉCNICOS Estos requisitos variarán según el alcance de los trabajos del contratista; por ejemplo, si debe diseñar y construir, los requisitos técnicos se centrarán en las funciones, los conceptos y las interconexiones, y si debe fabricar, se centrarán en las normas de fabricación y los planos. Esta sección comprenderá, según proceda:</p> <ul style="list-style-type: none"> — La especificación del código de diseño, por ejemplo, las normas específicas del país o normas internacionales, estadounidenses, del Reino Unido, etc., y las normas, especificaciones, parámetros de rendimiento y requisitos funcionales de carácter obligatorio y reglamentario que existan. — Una descripción de los requisitos aplicables a la tarea, la modificación, la máquina o el sistema. — Una descripción de las condiciones de diseño y de funcionamiento, como las temperaturas, las presiones, la radiación, etc. — La vida de diseño, fiabilidad, disponibilidad, posibilidad de mantenimiento, etc. — La pintura, los acabados especiales, los requisitos de ensamblaje, la limpieza, etc. 	<p>De las descripciones contenidas en el cuerpo de este documento puede obtenerse la siguiente información:</p> <p>Base de diseño: esta es una información importante que debe proporcionarse al contratista, ampliándola de modo que describa completamente cada corriente de desechos. Indica los desechos que habrán de tratarse, el rendimiento requerido y los servicios que se necesitarán o deberán proporcionarse para la explotación de los módulos de proceso solicitados.</p> <p>Diagrama de flujo del proceso: un diagrama de flujo que ilustra el equipo requerido.</p> <p>Lista del equipo: una lista resumida del equipo, con las dimensiones, los rendimientos y los materiales de construcción.</p> <p>Descripción del equipo: una imagen de un módulo típico, junto con una descripción del equipo que lo conforma (tipos de equipo, materiales de construcción, dimensiones, rendimiento).</p>
<p>5. SISTEMA DE GESTIÓN Definición de la norma de gestión de la calidad que se aplicará.</p>	<p>Deberá redactarse específicamente para cada proyecto.</p>
<p>6. APROBACIÓN DE LOS DOCUMENTOS, CÁLCULOS Y PLANOS Definición del régimen de aprobación de los documentos, cálculos y planos del contratista.</p>	<p>Deberá redactarse específicamente para cada proyecto.</p>
<p>7. INSPECCIÓN Y ENSAYOS Detalles de los requisitos de inspección y ensayo durante la fabricación, el montaje y la instalación. Normas o criterios de aceptación/aprobación de los productos. Especificación de los ‘puntos de aviso’, en que deberá notificarse al cliente la realización inminente de inspecciones y ensayos, y de los ‘puntos de espera’, en que no podrá proseguir la fabricación o construcción sin la aprobación del cliente. Definición de los requisitos de ensayo en obra y de las pruebas de comportamiento. Suministro del equipo y las instalaciones de ensayo.</p>	<p>Deberá redactarse específicamente para cada proyecto. Véase un ejemplo típico en las especificaciones presentadas a título ilustrativo en el anexo II.</p>

Sección y descripción	Contenido
<p>8. EMBALAJE Y ENTREGA Especificación de la responsabilidad del contratista de proteger los elementos durante el transporte y el almacenamiento en el emplazamiento. Definición de todo requisito de embalaje especial. Definición de la responsabilidad por el transporte, la entrega y la descarga en el emplazamiento, incluidos los gastos de grúa y la supervisión.</p>	<p>Deberá redactarse específicamente para cada proyecto. Véase un ejemplo típico en las especificaciones presentadas a título ilustrativo en el anexo II.</p>
<p>9. REQUISITOS RELATIVOS A LA INSTALACIÓN EN EL EMPLAZAMIENTO Definición de los requisitos relativos a la instalación.</p>	<p>Deberá redactarse específicamente para cada proyecto. Véase un ejemplo típico en las especificaciones presentadas a título ilustrativo en el anexo II.</p>
<p>10. REQUISITOS RELATIVOS A LA PUESTA EN SERVICIO, LAS PRUEBAS Y EL TRASPASO EN EL EMPLAZAMIENTO Definición de los requisitos relativos a la puesta en servicio, con las pruebas que sean necesarias y los criterios para el traspaso, incluida la documentación completa.</p>	<p>Deberá redactarse específicamente para cada proyecto. Véase un ejemplo típico en las especificaciones presentadas a título ilustrativo en el anexo II.</p>
<p>11. DOCUMENTACIÓN DEL PRODUCTO Indicación de la documentación que deberá suministrarse y de su propósito (es decir, para información o para aprobación), utilizando el calendario de presentación de documentos, si se desea. Lista de los requisitos específicos referentes a los planos/documentos revisados o conformes a obra, la documentación del traspaso, los manuales de operaciones y mantenimiento, el certificado de conformidad, el expediente de compatibilidad electromagnética, el expediente técnico, y los expedientes de salud, seguridad, etc., para cumplir los requisitos fundamentales en estos ámbitos. Documentación del equipo, por ejemplo planos, cálculos de diseño, aprobaciones de la autoridad certificadora, descripciones del diseño, instrucciones operacionales, instrucciones de mantenimiento, requisitos relativos a los ensayos y la puesta en servicio, garantías. Documentación del <i>software</i>, por ejemplo especificaciones de diseño, validación, listados del código fuente, principios de funcionamiento, diagramas de flujo, procedimientos de depuración, instrucciones de introducción de datos, formatos de salida de datos, procedimientos de garantía de calidad, procedimientos de mantenimiento, manuales del usuario, instrucciones para la instalación. Estilo y contenido de la documentación, si es necesario.</p>	<p>La documentación exigida se indica en las especificaciones funcionales de cada módulo. Normalmente se exigirá un expediente técnico, con arreglo a las directrices nacionales pertinentes, que incluya:</p> <ul style="list-style-type: none"> — los planos conformes a obra; — los registros de calidad; — el informe de seguridad; — el informe de la puesta en servicio; — las instrucciones operacionales; — las instrucciones de mantenimiento; — el programa de mantenimiento; — los manuales de operaciones y mantenimiento; — los preparativos para el almacenamiento del equipo y las instrucciones para la nueva puesta en servicio; — la lista de las piezas de recambio.

Sección y descripción	Contenido
<p>12. SEGURIDAD, SALUD Y MEDIO AMBIENTE Definición de cualquier control o riesgo relativo a la seguridad, la salud y el medio ambiente que se relacione con el cliente o el emplazamiento.</p>	Deberá redactarse específicamente para cada proyecto.
<p>13. CONDICIONES DEL EMPLAZAMIENTO Descripción de todo requisito del cliente en relación con la seguridad, la salud y el medio ambiente y de las obligaciones del contratista al respecto. Declaración que defina las condiciones radiológicas y/o ambientales específicas del trabajo en el emplazamiento. Servicios e instalaciones que proporcionará el cliente. Interacción con otros contratistas. Condiciones particulares del emplazamiento y restricciones específicas del acceso del contratista (los términos y condiciones generales del trabajo en el emplazamiento figurarán en el contrato).</p>	Deberá redactarse específicamente para cada proyecto. Si las especificaciones se refieren a un único módulo de proceso que se integrará en una instalación ya existente, esta sección podrá remitir a la documentación disponible sobre el trabajo en esa instalación.
<p>14. DATOS APORTADOS Lista de los planos, informes y otros datos suministrados al licitante.</p>	Deberá redactarse específicamente para cada proyecto. Véase un ejemplo típico en las especificaciones presentadas a título ilustrativo en el anexo II.
<p>15. GARANTÍA</p>	Deberá definirse la fecha de inicio y el período de duración de la garantía.
<p>16. CRITERIOS PARA LA ADJUDICACIÓN DEL CONTRATO</p>	Pueden incluir el precio, el programa, la experiencia en el suministro de equipo parecido, el cumplimiento de las especificaciones.

Esta información sobre las especificaciones cubre en gran medida el suministro de los propios módulos de proceso. Además de ello, se requerirá un trabajo de preparación considerable para acoger y explotar el módulo o los módulos de proceso, y el conjunto de diseños de ingeniería ofrece información y orientaciones a ese respecto. Por ejemplo:

- Para alojar el módulo o los módulos de proceso se necesitará una instalación, que podría ser un edificio ya existente, un edificio nuevo o incluso un contenedor ISO. Para este último se requerirá una base firme.
- Deberán existir servicios, como energía eléctrica y agua, y posiblemente un sistema de desagüe de los efluentes tratados.
- También pueden necesitarse operadores cualificados, personal de protección radiológica, un laboratorio de análisis, equipo de monitorización, y artículos fungibles tales como contenedores de desechos, medios de filtración, etc.

Anexo II

EJEMPLOS DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA ADQUISICIÓN DE MÓDULOS DE PROCESAMIENTO

Notas sobre el uso de los tiempos verbales en estos ejemplos de especificaciones.

Es práctica habitual del OIEA reservar el uso de la forma verbal ‘deberá’ y del futuro simple para sus publicaciones ‘normativas’, como las de la *Colección de Normas de Seguridad del OIEA*, donde se utilizan en el enunciado de los requisitos, responsabilidades y obligaciones, y evitarlo en las publicaciones orientativas, como el presente informe técnico. Sin embargo, esos tiempos verbales son también de uso normal en los contratos de compra, donde definen lo que el contratista tendrá la obligación de hacer o proporcionar en virtud del contrato, y así se emplean en el presente anexo. Este uso *no* debe interpretarse como un requisito estipulado por el OIEA.

II-1. INTRODUCCIÓN

Esta sección contendrá una breve descripción del proyecto, que establecerá el contexto y que deberá redactarse específicamente para cada caso.

II-2. ALCANCE E INTERCONEXIONES

En esta sección figurará una definición detallada y cuidadosa del alcance del suministro, con una descripción pormenorizada de los elementos o servicios que el contratista deba proporcionar, como equipos, programas informáticos, informes, etc.

También se incluirán definiciones de las delimitaciones, los límites de las baterías, los puntos de terminación de red y las conexiones en el emplazamiento del propietario, así como las responsabilidades. Podrán mencionarse específicamente las exclusiones, para mayor claridad.

El alcance general del contrato podría incluir el diseño, la construcción, el ensayo, la entrega en el emplazamiento, la instalación y la puesta en servicio. El alcance del suministro podría abarcar solo un módulo, varios módulos, o una instalación completa de procesamiento y almacenamiento de desechos, con un edificio y un depósito de almacenamiento. La especificación de las conexiones indicará los requisitos de conexión a servicios (electricidad, agua y aire), iluminación, medios de drenaje, calefacción, ventilación y aire acondicionado y comunicaciones de cada módulo.

En las secciones siguientes figuran algunos ejemplos.

II-2.1. Alcance

Ejemplo.

En estas especificaciones se detallan los requisitos relativos al diseño, la fabricación, el ensayo en obra, el embalaje y la entrega en el emplazamiento de los módulos de proceso para la instalación de tratamiento de desechos. En resumen, esos módulos de proceso son:

- un módulo de tratamiento químico;
- un módulo de filtración;
- un módulo de intercambio iónico;
- un módulo de hormigonado;

- módulos de almacenamiento provisional de contenedores de desechos líquidos y bidones de desechos solidificados;
- módulos de almacenamiento de productos químicos de tratamiento, cemento en polvos y artículos fungibles.

El contratista deberá:

- detallar el diseño mecánico, eléctrico y de la instrumentación;
- detallar el diseño de las estructuras civiles y/o las interconexiones;
- presentar los planos de diseño;
- adquirir todos los materiales y artículos patentados necesarios;
- adquirir e instalar los instrumentos;
- fabricar y/o montar el equipo;
- proveer a la inspección completa de las obras y autorizar la inspección por el cliente;
- demostrar el cumplimiento de los requisitos funcionales y de rendimiento mediante ensayos en la obra;
- proporcionar toda la documentación conforme a obra que sea necesaria;
- desmantelar, embalar y entregar el equipo al cliente;
- encargarse de la instalación y la puesta en servicio en el emplazamiento del cliente;
- proporcionar los manuales del diseño;
- suministrar las piezas de recambio y los artículos fungibles para un año de funcionamiento;
- proporcionar instrucciones de uso y mantenimiento basadas en el riesgo;
- impartir capacitación al personal técnico, de operación y de mantenimiento.

Todo ello deberá ser conforme con el presente pliego de condiciones y con los requisitos del contrato principal. El diseño y suministro de todo el equipo deberá cumplir todos los requisitos pertinentes de las leyes y reglamentos vigentes en el país. Todo el equipo deberá tener la marca CE (si se suministra dentro de la Unión Europea) y acompañarse de una declaración de conformidad.

Si el cliente no tiene la intención de realizar otros trabajos de diseño, el contratista será responsable de completar el diseño y la distribución espacial de conformidad con las especificaciones. El cliente mantendrá la responsabilidad del diseño del proceso proporcionado hasta ese momento.

Este contrato comprende la descarga e instalación del producto terminado en el emplazamiento del cliente. El contratista deberá tener en cuenta en el diseño los requisitos y restricciones que se apliquen a la instalación del equipo en la posición especificada del edificio.

El contratista deberá velar por que todo el trabajo realizado sea conforme con el presente pliego de condiciones y con todas las disposiciones legales, en particular con los reglamentos vigentes en el país. Además, deberá cumplir plenamente con los requisitos del fabricante de todo equipo patentado que se haya incorporado en el diseño final.

Nada de lo que figura en este pliego de condiciones eximirá al contratista de sus responsabilidades de realizar, además de lo requerido para cumplir los requisitos de este pliego de condiciones, los análisis, pruebas, inspecciones y otras actividades que se consideren necesarios para garantizar que los detalles del diseño, los materiales, la fabricación y la obra presten satisfactoriamente los servicios requeridos o que exija la buena práctica. Salvo indicación en contrario, todas las actividades incluidas en este pliego de condiciones serán conformes con la edición más reciente de las normas pertinentes del país.

Cuando se haga referencia a especificaciones, códigos y normas, competará al contratista obtener estos documentos y familiarizarse con los requisitos que contengan. En caso de conflicto entre los requisitos de cualesquiera de las condiciones o documentos que formen parte del contrato, el asunto se someterá a la decisión del cliente.

El presente pliego de condiciones deberá leerse conjuntamente con los detalles, términos y condiciones contenidos en el contrato principal.

II-2.2. Alcance del suministro

Ejemplo.

El producto suministrado será el módulo de tratamiento químico (Módulo B1) para el procesamiento de volúmenes de desechos acuosos. El módulo comprenderá todo el equipo indicado en el diagrama de flujo del proceso que figura en la sección 5.2.3 de (*esta publicación*), a saber:

- las válvulas;
- las tuberías y conexiones hasta los puntos de terminación de red señalados;
- el tanque de tratamiento químico y el agitador;
- las estructuras de acero/armazones de soporte y bandejas de goteo;
- el tablero eléctrico y de control;
- las bandejas portacables para los cables/la instalación eléctrica;
- el recipiente de productos químicos de administración dosificada;
- los contenedores de efluentes de desecho (dos para fines de ensayo);
- los contenedores de efluentes tratados (dos para fines de ensayo);
- los recipientes de muestras (20 en total para las operaciones);
- la bomba de administración dosificada de productos químicos;
- la bomba de alimentación de desechos;
- la bomba de trasiego del efluente tratado;
- el embudo para la administración dosificada de productos químicos sólidos.

Todo lo anterior será conforme con este pliego de condiciones y con los requisitos establecidos en el contrato principal.

II-2.3. Terminaciones e interconexiones

Ejemplo.

El módulo de tratamiento químico estará separado físicamente de los otros posibles módulos de tratamiento, con los que interactuará por medio de contenedores que suministrarán los desechos acuosos al proceso y recolectarán los efluentes tratados. Sin embargo, el módulo de tratamiento químico estará interconectado con los siguientes servicios suministrados e instalados por otros:

- Suministro de energía eléctrica (400 V CA, 50 Hz, pH 3 y neutro) al panel de control/aislador del módulo de proceso. Todos los suministros de energía internos del módulo se derivarán de esta conexión, a través de un pequeño cuadro de distribución.
- Servicios. Suministro de agua de proceso: el encaminamiento de los servicios desde el punto de conexión con el equipo, en el ámbito del presente pliego de condiciones, correrá a cargo del contratista, quien velará por que sea ordenado y seguro y no obstaculice el acceso, la limpieza o las operaciones de la planta. Ese encaminamiento deberá ser presentado oficialmente al cliente y aceptado antes de su ejecución.

El módulo de tratamiento químico deberá estar montado, sin fijaciones, sobre una plataforma de hormigón y será colocado finalmente sobre una superficie plana adecuada con la debida capacidad de soporte de carga.

O bien:

El módulo de tratamiento químico deberá estar fijado al piso del contenedor que lo vaya a alojar. El contratista deberá diseñar elementos adecuados para la fijación de los módulos y proporcionar todos los pernos de sujeción. También deberá suministrar al cliente los elementos de ingeniería civil y de fijación que sean necesarios.

Los puntos de terminación de red deberían estar situados donde se indique en los planos suministrados. La distribución en planta del equipo deberá tener en cuenta los requisitos de acceso para el uso y el mantenimiento. Los espacios libres circundantes serán los que se indiquen en los planos suministrados.

II-3. DEFINICIONES

Esta sección, en que se definirán todos los términos que no sean de uso común, deberá redactarse específicamente para cada proyecto.

II-4. REQUISITOS TÉCNICOS

Los requisitos técnicos variarán según el alcance de los trabajos del contratista. Por ejemplo, si el contratista debe diseñar y construir, los requisitos técnicos se centrarán en las funciones, los conceptos y las interconexiones; si debe fabricar, se centrarán en las normas de fabricación y los planos. Esta sección comprenderá, según proceda:

- La especificación del código de diseño, por ejemplo, las normas específicas del país o normas internacionales, y las normas, especificaciones, parámetros de rendimiento y requisitos funcionales de carácter obligatorio y reglamentario que existan.
- Una descripción de los requisitos aplicables a la tarea, la modificación, la máquina o el sistema.
- Las condiciones de diseño y de funcionamiento, como las temperaturas, las presiones y la radiación.
- La vida de diseño, fiabilidad, disponibilidad, posibilidad de mantenimiento, etc.
- La pintura, los acabados especiales, los requisitos de ensamblaje, la limpieza, etc.

II-4.1. Descripción y requisitos técnicos del módulo de proceso

En esta sección se describirán los principales componentes del equipo y los requisitos y normas pertinentes. El contenido podrá basarse en la información sobre el diseño y las especificaciones presentada en el cuerpo de esta publicación, que comprende lo siguiente:

- La base de diseño: esta es una información importante que debe proporcionarse al contratista, ampliándola de modo que describa completamente cada corriente de desechos. Indicará los desechos que se tratarán, los requisitos de rendimiento, y los servicios que serán necesarios y que deberán proporcionarse para el funcionamiento de los módulos de proceso de que se trate.
- El diagrama de flujo del proceso: este diagrama ofrece una ilustración del equipo.
- La lista del equipo: una lista resumida del equipo requerido, con las dimensiones, los rendimientos y los materiales de construcción.
- Una descripción del equipo: una imagen de un módulo típico, junto con una descripción del equipo que lo conforma (tipos de equipo, materiales de construcción, dimensiones, rendimiento, etc.).
- Las secciones específicas del documento (descritas a continuación) pueden utilizarse para describir el Módulo B1-Tratamiento químico. Si se precisan también otros módulos, podrán describirse

tomando la información pertinente de este documento e insertándola en secciones aparte, una para cada módulo.

II-4.1.1. Descripción del proceso

En esta sección debería proporcionarse una descripción de cómo está previsto utilizar el módulo. Esa descripción comprenderá parámetros operativos tales como:

- los valores normales y anormales;
- los límites de diseño del equipo.

Esta información puede tomarse de la descripción del proceso en la sección 5.2.1 de la presente publicación.

II-4.1.2. Base de diseño

Véase la sección 5.2.2 de la presente publicación.

II-4.1.3. Diagrama de flujo del proceso

Véase la sección 5.2.3 de la presente publicación.

II-4.1.4. Lista del equipo

El equipo está indicado en el diagrama de flujo del proceso. En esta sección debería introducirse la lista del equipo presentada en la sección 5.2.4 de la presente publicación.

II-4.1.5. Descripción del equipo

La descripción del equipo, con texto e ilustraciones, puede tomarse de la sección 5.2.5 de la presente publicación.

II-4.1.6. Descripción y funcionamiento del proceso

Esta parte puede basarse en la sección 5.2.8 de la presente publicación.

II-4.1.7. Estructuras mecánicas del módulo

Ejemplo.

Se deberá diseñar un armazón que sostenga todo el equipo indicado en el diagrama de flujo del proceso y en la documentación sobre los servicios de apoyo y otros elementos. Los componentes del armazón estarán fijados y ubicados de modo que puedan retirarse y sustituirse con rapidez y facilidad, reduciendo al mínimo la necesidad de alineación y ajustes; esto significa que todos los elementos que requieran mantenimiento habrán de basarse en los principios del diseño modular. Deberá considerarse la posibilidad de suministrar una bancada antivibración para todo el equipo que pueda generar vibraciones.

Todos los armazones deberán tener integrada una bandeja de goteo de acero inoxidable, del tamaño adecuado para contener cualquier fuga/derrame del equipo montado encima de ella y de los contenedores de desechos. La capacidad de la bandeja de goteo equivaldrá al 110 % del recipiente más grande, o al 25 % del inventario total de equipos y contenedores de desechos del módulo de proceso, si este volumen es mayor. La bandeja de goteo tendrá desniveles de no menos de 1:50 para recoger los fluidos, y esquinas

redondeadas para facilitar la descontaminación. Debería haber un margen de altura de al menos 50 mm entre la bandeja de goteo y el armazón de soporte, y entre la cara inferior de la bandeja de goteo y el piso, para poder efectuar la limpieza y las pruebas de frotis.

Cuando se requieran aceites/grasas de lubricación, el diseño garantizará que este material no pueda entrar en la corriente de proceso, ni por filtración en un flujo del proceso, ni por fugas que penetren en el tanque directamente o a raíz del lavado/enjuague del equipo.

Los soportes de la planta, las placas de montaje y otros elementos similares que en circunstancias normales no entrarán en contacto con el líquido del proceso serán de acero inoxidable (de tipo 304 o 316). Las orejetas de izado para la entrega, la instalación y el mantenimiento estarán incorporadas en el diseño. Cuando estén soldadas, deberán someterse a un examen no destructivo, como el que se aplica a las soldaduras que soportan cargas, y acompañarse de una certificación.

El módulo de proceso deberá estar fijado al piso, en el caso de un contenedor, pero podrá estar libre sobre una base de hormigón, si se trata de un edificio. El contratista deberá diseñar elementos adecuados para fijar los módulos y proporcionar todos los pernos de sujeción. También deberá suministrar al cliente los elementos de ingeniería civil y de fijación que sean necesarios.

II-4.2. Vida operacional

Ejemplo.

El equipo deberá diseñarse para una vida operacional de 25 años. El contratista deberá demostrar que el período de funcionamiento seguro previsto (la vida de diseño) excede de esa duración en al menos un 10 %.

II-4.3. Fiabilidad

Ejemplo.

El módulo de proceso y los distintos elementos del equipo deberán estar disponibles para la ejecución del proceso de conformidad con los requisitos operacionales durante los 250 días por año previstos en el diseño. El equipo estará diseñado para garantizar una capacidad operativa de proceso de $X \text{ m}^3$ de desechos al año. Esto deberá demostrarse durante el primer año de funcionamiento.

II-4.4. Disposición

En esta sección se indicará todo requisito especial que se aplique a la distribución de la planta y el equipo, con ejemplos de módulos de proceso similares.

Incumbirá al contratista diseñar una disposición adecuada para todo el equipo suministrado. Esa disposición deberá cumplir con las buenas normas profesionales y tener en cuenta lo siguiente:

- Los módulos se instalarán y explotarán en contenedores ISO/en un edificio ya existente (dar detalles del edificio).
- Deberá ser posible retirar los módulos de proceso de los contenedores ISO en el futuro, para poder reubicarlos en otro lugar.
- La disposición deberá ser acorde, en general, con las imágenes incluidas en el pliego de condiciones.
- El tamaño de cada módulo de proceso debería ser tal, que pueda caber en los contenedores ISO o en el edificio ya existente (dar detalles de cualquier restricción del acceso que se aplique).
- La disposición del equipo y de las tuberías deberá permitir el acceso a todos los componentes, en particular a las válvulas e instrumentos, para la puesta en servicio, el ensayo, el mantenimiento y la sustitución. Tendrá que haber suficiente espacio para la retirada y el reemplazo de estos elementos. Cuando sea factible, deberá poderse acceder a por lo menos dos lados de cada equipo.

- La disposición deberá cumplir, como mínimo, las normas nacionales e internacionales pertinentes con respecto a las dimensiones del acceso. Obsérvese que esto, por sí solo, puede no proporcionar suficiente espacio para cumplir los requisitos de la puesta en servicio, el mantenimiento y la sustitución, que también deberán respetarse.
- Las tuberías tendrán un recorrido ordenado, con la longitud mínima y el mínimo de curvas que sean compatibles con su desmontaje para el mantenimiento. En general, donde coincidan, las tuberías de servicio (aire/agua) deberán desviarse para obviar las tuberías de proceso activas (y no al revés).
- Las tuberías tendrán recorridos paralelos y en disposición ‘isométrica’ (es decir, de norte a sur, de este a oeste y de arriba a abajo, y no en diagonal), donde sea posible.
- Cuando proceda, las tuberías deberán ser de autodrenaje y tener un desnivel de no menos de 1:50 (una pendiente de 1°).
- La disposición de los tubos y las bombas deberá reducir al mínimo las pérdidas de presión de admisión en las bombas.
- La disposición de las válvulas y de otros equipos deberá reducir al mínimo los ‘golpes de ariete’ y sus efectos.
- Todas las tuberías, válvulas y equipos deberán estar debidamente etiquetados.
- Tendrá que haber espacio de almacenamiento disponible para las piezas de recambio del equipo.
- Debería haber espacio de almacenamiento disponible para un máximo de X contenedores de desechos en espera de procesamiento e Y contenedores de desechos ya procesados.
- Debería haber una zona disponible para almacenar los desechos que se consideren no idóneos para el procesamiento.
- Deberá existir un medio de aislar el equipo eléctrico del módulo antes del mantenimiento.
- Deberá haber un botón de ‘parada de emergencia’ para detener todo el equipo situado sobre la plataforma.
- Las herramientas y los materiales inactivos almacenados deberán estar separados del equipo activo.

La disposición debería tener en cuenta los siguientes aspectos:

- el mantenimiento del alumbrado;
- el mantenimiento del sistema de ventilación desde el exterior;
- la nivelación del piso;
- la posibilidad de reparar y descontaminar fácilmente el piso;
- el acceso de la horquilla elevadora (traslación, rotación, etc.);
- las inspecciones;
- el equipo de detección de incendios;
- el equipo portátil de extinción de incendios;
- los detectores de radiación, las alarmas y los monitores de pies y manos.

II-4.5. Etiquetado

Ejemplo.

Todas las válvulas, bombas, instrumentos y otros equipos deberán estar claramente marcados con etiquetas. Estas serán de plástico (o un material similar, si el cliente lo acepta) de dos colores, con letras negras sobre un fondo blanco. Las etiquetas se fijarán mecánicamente utilizando tornillos de fijación no corrosivos. No se emplearán etiquetas adhesivas en estos elementos.

Todas las tuberías deberán estar marcadas con etiquetas adhesivas permanentes a intervalos adecuados para poder identificarlas fácilmente y seguir su recorrido. Las etiquetas indicarán, además de otra información, el fluido contenido en la tubería y la dirección o las direcciones del flujo. El texto de las etiquetas deberá tener un mínimo de 3 mm de altura y ser fácilmente legible cuando el equipo esté

instalado. En las etiquetas que se apliquen sobre acero inoxidable, los adhesivos no deberán contener cloro. El etiquetado deberá ser acorde con los códigos y normas pertinentes (*especificar*).

II-4.6. Piezas de recambio

Ejemplo.

El contratista deberá presentar una lista de piezas de recambio recomendadas para su aprobación. La lista indicará, en entradas separadas, las cantidades de piezas de recambio requeridas para la puesta en servicio y para la explotación, así como el nombre y la dirección del fabricante del componente, la información de contacto, el número de teléfono, la entrega y el costo unitario. El contratista señalará los componentes de los que tendrá existencias en fábrica, y recomendará un sistema de gestión de piezas para reducir al mínimo las existencias requeridas.

El contratista deberá declarar el período de tiempo durante el cual se podrá acceder fácilmente a las piezas de recambio, y ese período deberá ser aceptado. El contratista será responsable de dar aviso de los casos en que sea probable que los repuestos del equipo se vuelvan escasos antes del término de la vida útil de este.

II-4.7. Entorno operacional

La descripción del entorno operacional deberá redactarse específicamente para cada proyecto.

Ejemplo.

El equipo deberá diseñarse y suministrarse para funcionar en las condiciones ambientales externas del emplazamiento del cliente; por ejemplo, debería tener una protección y un sellado de impermeabilización; en los ambientes costeros marinos se requerirá una protección adicional contra la corrosión. Todo el equipo y los componentes del proceso y la instrumentación deberán poder funcionar a temperaturas de entre +25 °C y -10 °C (*introdúzcase el intervalo adecuado para el emplazamiento*).

II-4.8. Normas aplicables

Ejemplo.

Las normas que se utilizarán serán las necesarias para asegurar el funcionamiento seguro y eficiente de una planta idónea durante los X (*introdúzcase el valor adecuado*) años de su vida en servicio. El diseño deberá cumplir con las disposiciones reglamentarias y la legislación vigente, y garantizar la seguridad de la explotación. Podrán utilizarse normas comerciales, a condición de que no comprometan la seguridad convencional y nuclear.

Además, como mínimo, deberían respetarse los aspectos pertinentes de todas las normas aplicables, junto con los requisitos legislativos. Incumbirá al contratista seleccionar los códigos, especificaciones y normas adecuados que se apliquen al ámbito de trabajo. En caso de conflicto entre los requisitos de cualesquiera de las condiciones o documentos que formen parte del contrato, el asunto se remitirá al cliente para que lo resuelva. Si el cliente no conoce las normas adecuadas para el equipo, podrá pedir al proveedor que las proponga.

II-5. SISTEMA DE GESTIÓN

Esta sección deberá redactarse específicamente para cada proyecto.

Ejemplo.

El contratista y los subproveedores deberán tener y poder presentar la certificación de las normas ISO 9001:2000 o ISO 9002:1994 expedida por una autoridad acreditada. Dentro de las dos semanas siguientes a la adjudicación de la orden de compra, el contratista deberá elaborar un plan de calidad (plan de inspecciones y ensayos) para el sistema, y someterlo a las observaciones del cliente. El cliente debería completar el plan con indicaciones de los puntos de inspección, documentación y espera. También podrán añadirse requisitos detallados, como se describe más adelante.

II-5.1. Unidades de medida

Ejemplo.

Las mediciones consignadas en los documentos y planos estarán expresadas en unidades métricas, de conformidad con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

II-5.2. Soldaduras

Ejemplo.

Los procedimientos de soldadura deberán someterse a ensayos de aprobación, que se realizarán, registrarán y notificarán de conformidad con las normas pertinentes. Todas las soldaduras deberán efectuarse por un procedimiento que sea conforme con las normas adecuadas. Los soldadores serán personas con los niveles apropiados de capacitación, y todas las especificaciones/registros de calidad de los procedimientos de soldadura se presentarán para su examen antes de la construcción. Los inspectores de soldaduras poseerán el título reconocido a nivel nacional que corresponda para la aplicación de métodos de inspección visual y de detección de grietas superficiales.

II-5.3. Software CAD

Ejemplo.

Cuando se utilice un *software* de diseño asistido por computadora, el proveedor facilitará una copia del documento de verificación más reciente del programa utilizado. Además, el contratista deberá proporcionar resultados de verificaciones, respaldados por una certificación, que demuestren el cumplimiento de los procedimientos de diseño del programa.

II-6. APROBACIÓN DE LOS DOCUMENTOS, CÁLCULOS Y PLANOS

Esta sección, en que se definirá el régimen de aprobación de los documentos, cálculos y planos del contratista, deberá redactarse específicamente para cada proyecto.

II-7. INSPECCIÓN Y ENSAYOS

- Detallar los requisitos de inspección y ensayo durante la fabricación, el montaje y la instalación.
- Especificar las normas o criterios de aceptación/aprobación de los productos que se entregarán.
- Especificar los ‘puntos de aviso’, en que deberá notificarse al cliente la realización inminente de inspecciones y ensayos, y los ‘puntos de espera’, en que no podrá proseguir la fabricación o construcción sin la aprobación del cliente.

- Especificar los requisitos de ensayos en obra y las pruebas de comportamiento.
- Suministrar el equipo y las instalaciones de ensayo.

Esta sección deberá redactarse específicamente para cada proyecto.

Ejemplo.

El diseño del equipo será modular, para facilitar la expedición, el transporte y el montaje en el emplazamiento. Los módulos, los sistemas de control y el restante equipo auxiliar serán ensamblados, sometidos a ensayo y puestos en servicio fuera del emplazamiento, antes del transporte para su instalación y la puesta en servicio no activa. Los ensayos requeridos se determinarán y describirán en todos sus aspectos en los procedimientos detallados del contratista que aprobará el cliente. Los ensayos en obra comprenderán la puesta en marcha completa o una simulación de la función del equipo y la caracterización del comportamiento del sistema. El cliente tendrá la oportunidad de presenciar todos los ensayos realizados fuera del emplazamiento. Todos los resultados y los certificados de las pruebas se incluirán en los manuales técnicos.

II-7.1. Inspección y ensayos

Ejemplo.

El contratista deberá inspeccionar y poner a prueba las plataformas para demostrar que cumplen los requisitos del contrato y del presente pliego de condiciones. Las normas de aceptación de la inspección y los ensayos serán conformes con las normas nacionales, cuando proceda; en los otros casos, el cliente especificará la norma que se deba cumplir.

El cliente se reserva el derecho de realizar inspecciones, pero ello no eximirá al contratista de la responsabilidad de llevar a cabo las suyas propias de conformidad con su plan de calidad.

El contratista deberá proporcionar todo el equipo y las instalaciones para la inspección y los ensayos previos a la entrega. El contratista deberá obtener el marcado CE (u otro equivalente, según proceda) de las plataformas de montaje y deberá presentar un certificado de incorporación (en el esquema general del proceso). La certificación confirmará que las plataformas cumplen con las directivas sobre compatibilidad electromagnética, baja tensión y máquinas.

El cliente debería proporcionar al contratista los detalles de las directivas sobre compatibilidad electromagnética y baja tensión (en virtud de la participación temprana del contratista (ECI)), para que pueda aplicar el marcado CE (u otro equivalente, según proceda) a las plataformas de montaje.

II-7.2. Pruebas de aceptación en fábrica

Ejemplo.

El contratista deberá ofrecer una verificación independiente de la capacidad de procesar efectivamente X (*introdúzcase el valor adecuado*) m³/día. Todo el equipo mecánico y eléctrico será sometido a pruebas de función y comportamiento en los locales del contratista, antes de la entrega, en la medida en que sea factible. Las pruebas de aceptación en fábrica se aplicarán, en lo posible, a todo el equipo mecánico y eléctrico, para verificar su función y comportamiento antes de la entrega. Estas pruebas permitirán también al explotador familiarizarse con el equipo, y demostrarán que es posible realizar el mantenimiento de forma fácil y segura. Toda herramienta especial que se requiera para el mantenimiento del equipo será proporcionada con arreglo a las mismas condiciones del contrato. Todos los ensayos se realizarán de conformidad con los procedimientos redactados por el contratista y aprobados por el cliente. Los procedimientos detallarán todo equipo especial que el contratista deba fabricar, comprar o arrendar

para llevar a cabo los ensayos funcionales. El contratista deberá incluir el equipo especializado en su oferta de adquisición.

Las pruebas de aceptación en fábrica incluirán los ensayos de puesta en servicio funcional no activa, la familiarización del explotador con el equipo y la demostración del mantenimiento. Todas las actividades se realizarán con referencia a los documentos de operaciones y mantenimiento del contratista y de conformidad con ellos. La demostración probará que el mantenimiento puede realizarse fácilmente extrayendo y reensamblando los componentes.

Tras los ensayos funcionales, el equipo se inspeccionará visualmente en busca de señales de daño físico o desgaste excesivo, después de lo cual se presentará un informe al cliente, quien dará las instrucciones con respecto a las rectificaciones que deban aplicarse según las condiciones del contrato. El contratista tendrá la responsabilidad de realizar las pruebas eléctricas estándar de todo el equipo eléctrico, que deberán incluir la continuidad, el aislamiento y la conexión a tierra. En general, los componentes eléctricos serán sometidos a pruebas completas tanto por separado, antes de la conexión, como en los ensayos funcionales, junto con los componentes mecánicos que controlen o monitoricen.

Cuando proceda, y en particular en el caso de los componentes eléctricos, las pruebas deberán ser conformes con la norma pertinente. Si una norma particular no se aplica, los procedimientos de ensayo se acordarán con el cliente.

El cliente debería estar autorizado a presenciar los ensayos en obra. El contratista proporcionará todos los otros materiales y servicios y el equipo y el personal necesarios para realizar las pruebas, y propondrá una metodología eficaz en relación con el costo para efectuarlas.

Una vez hecha la demostración y obtenida la aceptación del cliente, el contratista presentará a este los registros de calidad, para que los examine. Si el examen resulta satisfactorio, el equipo junto con los registros de calidad constituirán el traspaso oficial. El contratista podrá presentar la documentación de aceptación del traspaso a la consideración del cliente, de conformidad con las condiciones del contrato.

II-8. EMBALAJE Y ENTREGA

El contratista es responsable de embalar los artículos para protegerlos durante el transporte y el almacenamiento en el emplazamiento. Esto debería especificarse en el pliego de condiciones, definiendo todo requisito de embalaje especial e indicando quién será responsable del transporte, la entrega y la descarga en el emplazamiento, incluidos los gastos de grúa y la supervisión. Esta sección deberá redactarse específicamente para cada proyecto.

Ejemplo.

El equipo será embalado y preparado para el envío por el contratista, con arreglo al procedimiento aprobado por el cliente. El embalaje será adecuado para el almacenamiento al aire libre por X (*introdúzcase el valor adecuado*) meses (si el módulo no se va a instalar inmediatamente).

El equipo que no pueda embalarsé fácilmente podrá enviarse montado y fijado en palés, pero los artículos delicados, las superficies de sellado u otras partes similares deberán protegerse con una cubierta 'rígida'. Todos los estratos del embalaje deberán contener la siguiente información:

- el nombre del equipo o número del plano;
- el número de la orden de compra del cliente;
- el nombre del contratista;
- el peso bruto y la posición aproximada del centro de gravedad (para el izaje);
- el número del albarán de entrega del contratista;
- las instrucciones especiales para la descarga, si es el caso.

El contratista es responsable del equipo hasta su traspaso en el emplazamiento del cliente. El contratista deberá dar aviso al cliente con dos semanas de antelación de su intención de entregar el equipo, indicando las instalaciones que se precisarán para la descarga. Los elementos necesarios para descargar, izar, manipular y depositar el equipo deberán ser proporcionados por el cliente. Este será informado de cualquier consideración especial que se aplique a la descarga, como la longitud, la altura y el peso, y de todo requisito especial de almacenamiento —por ejemplo, del equipo eléctrico, los paneles de control, etc.—, para que puedan adoptarse las precauciones adecuadas. Esas instrucciones para la descarga deberán estar indicadas en el embalaje exterior.

Los puntos de izaje, si existen, deberán ser de fácil acceso y estar claramente señalizados. El equipo se acompañará del certificado o los certificados de prueba de carga, junto con indicaciones de las limitaciones que se apliquen a la manipulación. Si se requieren viguetas de izada de pesos o distribuidores de carga, estos elementos deberán también acompañar al equipo, junto con las instrucciones de uso.

La máxima altura libre de paso en el emplazamiento es de X (*introdúzcase el valor adecuado*) metros. La restricción de anchura es de X (*introdúzcase el valor adecuado*) metros. La restricción de longitud es de X (*introdúzcase el valor adecuado*) metros. También rige una restricción de peso de X (*introdúzcase el valor adecuado*) toneladas. La descarga en el emplazamiento será realizada por el cliente/contratista (*según se aplique*).

II-9. REQUISITOS RELATIVOS A LA INSTALACIÓN EN EL EMPLAZAMIENTO

En esta sección, que se redactará específicamente para cada proyecto, deberían definirse los requisitos referentes a la instalación.

Ejemplo.

Los métodos de construcción y las marcas de identificación utilizados deberán detallarse en una declaración del método de instalación suministrada junto con el equipo para su uso en el emplazamiento. Salvo indicación en contrario, el contratista será responsable de todas las plantas y el equipo necesarios para realizar las obras de instalación.

Todas las plantas y equipos utilizados deberán ser conformes con la certificación fechada pertinente, que se conservará y mantendrá vigente durante todo el período del contrato. El contratista será responsable del suministro de todo el equipo de manipulación, así como de la documentación que se requiera para su uso durante el montaje del equipo. Esto comprenderá, entre otras cosas, estudios sobre el proceso de selección, documentación sanitaria y de seguridad y evaluaciones del riesgo. O bien, si el equipo será instalado por otra entidad contratada por el cliente, el contratista deberá incorporar una propuesta resumida para esa instalación en la sección sobre el alcance del suministro. Esa propuesta incluirá las pruebas funcionales de seguridad y las otras pruebas funcionales necesarias, y servirá de base para los procedimientos de instalación que preparará y aplicará el cliente o la entidad contratada para la instalación.

Si es preciso, se solicitará al contratista que preste asesoramiento técnico especializado y/o asistencia en este proceso y en la solución de problemas. El contratista debería dar un presupuesto aparte para la prestación de estos servicios durante el período de instalación y la puesta en servicio.

II-10. REQUISITOS RELATIVOS A LA PUESTA EN SERVICIO, LAS PRUEBAS Y EL TRASPASO EN EL EMPLAZAMIENTO

En esta sección deberían definirse los requisitos relativos a la puesta en servicio, con inclusión de las pruebas que sean necesarias, los criterios para el traspaso y la capacitación, y la documentación finalizada. Este contenido deberá redactarse específicamente para cada proyecto.

Ejemplo.

En las pruebas de aceptación en el emplazamiento se repetirán normalmente los resultados de las pruebas de aceptación en fábrica. En el emplazamiento, el contratista deberá impartir capacitación en el servicio al personal de operación.

II-10.1. Capacitación

Ejemplo.

El contratista deberá impartir cursos de capacitación al personal de ingeniería y de operación. Estos serán cursos estructurados, que incluirán simulaciones de la planta con simuladores ya sea integrados, basados en computadoras personales, o conectados separadamente. También incluirán descripciones del equipo informático y del *software* aplicado, los diagnósticos de averías y las rectificaciones. Los cursos deberán comprender instrucciones sobre los métodos para modificar el *software* del equipo y las precauciones correspondientes, y utilizarán el manual de operaciones del sistema para impartir capacitación en el desarrollo de las operaciones paso a paso, lo que ayudará a verificar el manual para su uso futuro. Se suministrará una carpeta de documentación, con información explícita y fácil de comprender, y descripciones detalladas de los procedimientos paso a paso.

II-11. DOCUMENTACIÓN DEL PRODUCTO

En esta sección se indicarán los documentos que deberán presentarse y su propósito (es decir, para información o para aprobación), utilizando el calendario de presentación de documentos, si se desea. Se enumerarán los requisitos específicos referentes a los planos/documentos revisados o conformes a obra, la documentación del traspaso, los manuales de operaciones y mantenimiento, el certificado de conformidad, el expediente de compatibilidad electromagnética, el expediente técnico, los expedientes de salud, seguridad, etc., para cumplir los requisitos fundamentales en estos ámbitos, y otra documentación. Como ejemplos cabe citar la documentación del equipo, los planos, los cálculos de diseño, las aprobaciones de la autoridad certificadora, las descripciones del diseño, las instrucciones operacionales, las instrucciones de mantenimiento, los requisitos relativos a los ensayos y la puesta en servicio y las garantías.

La documentación del *software* comprende las especificaciones de diseño, la validación, los listados del código fuente, los principios de funcionamiento, los diagramas de flujo, los procedimientos de depuración, las instrucciones de introducción de datos, los formatos de salida de datos, los procedimientos de garantía de calidad, los procedimientos de mantenimiento, los manuales del usuario y las instrucciones para la instalación.

Si es necesario, se especificará el estilo y contenido de la documentación.

Ejemplo.

La documentación exigida se indica en las especificaciones funcionales generales de cada módulo. Normalmente se exigirá un expediente técnico (con arreglo a las directivas de la Unión Europea o a directrices equivalentes, según corresponda), que incluya:

- los registros de calidad;
- los planos conformes a obra;
- los manuales de operaciones y mantenimiento;
- el informe de seguridad;
- el informe de la puesta en servicio;
- las instrucciones operacionales;

- las instrucciones de mantenimiento;
- el programa de mantenimiento;
- los preparativos para el almacenamiento del equipo y las instrucciones para la nueva puesta en servicio;
- la lista de las piezas de recambio.

A continuación figura un ejemplo de un texto que describe en detalle los tres primeros elementos.

II-11.1. Registros de calidad

Ejemplo.

El contratista deberá proporcionar tres ejemplares impresos de la siguiente documentación:

- certificados de los materiales;
- el informe de la realización y los resultados de cada ensayo de presión hidrostática y neumática, si es el caso;
- el informe de la realización y los resultados de cada ensayo de prueba de carga, si es el caso;
- el informe de la realización y los resultados de cada prueba funcional;
- el informe de cada examen no destructivo, si es el caso;
- una lista de todas las concesiones aprobadas por el cliente;
- la Declaración de Conformidad de la CE (u otra equivalente) y la documentación de calidad de los componentes patentados;
- los planes de calidad del contratista aprobados por el cliente;
- los procedimientos del contratista aprobados por el cliente;
- el certificado de conformidad del contratista para el suministro.

II-11.2. Planos de diseño

Ejemplo.

Los planos de fabricación y los documentos de diseño serán preparados, controlados y aprobados por el contratista y presentados al cliente para su aprobación. Los planos contendrán toda la información necesaria para fabricar los elementos y construir los conjuntos, y se elaborarán utilizando un sistema de diseño asistido por computadora (CAD). El contratista se pondrá en contacto con el cliente para verificar que el sistema CAD sea adecuado.

Los planos producidos específicamente para el contrato serán de propiedad exclusiva del cliente. Se prepararán en papel de dibujo de la serie ISO A estándar, y el contratista recibirá copias electrónicas de los modelos del cliente. Cuando así se solicite, el cliente asignará al contratista una serie de numeración de planos para el contrato. Todos los planos se revisarán y actualizarán a satisfacción del cliente de modo que representen el producto conforme a obra después de la puesta en servicio no activa. Al término del contrato se suministrarán tres conjuntos de planos revisados y conformes a obra en formato impreso y un conjunto electrónico.

Los planos de los proveedores se incluirán en el manual de operaciones y mantenimiento. Estos planos responderán a las normas de los proveedores y no necesitarán ser conformes con los requisitos de la norma de diseño.

II-11.3. Manuales de operaciones y mantenimiento

Ejemplo.

Los manuales de operaciones y mantenimiento deberán contener toda la información necesaria para que el personal del cliente utilice y mantenga el sistema instalado. Comprenderán los manuales del fabricante, los planos, los detalles de la configuración, la documentación de diseño del *software*, y los procedimientos operacionales y de mantenimiento. El contratista velará por que los documentos finales se elaboren durante el proyecto. El formato de la información se decidirá junto con el cliente. El contratista deberá incluir lo siguiente:

- instrucciones completas y detalladas para el uso y mantenimiento del equipo;
- instrucciones para las paradas de emergencia;
- recomendaciones sobre el mantenimiento de rutina y las precauciones de seguridad necesarias;
- detalles de cualquier equipo o herramienta especial que se necesite para el mantenimiento;
- una lista de piezas de recambio recomendadas para un año y para cinco años de explotación;
- una indicación de los componentes que deberán reemplazarse en un plazo inferior a un año debido a su vida útil limitada, a que no pueden ser reutilizados o a la posibilidad de ruptura;
- una estimación del tiempo necesario para reparar los fallos probables e inevitables;
- el tiempo aproximado de entrega en la compra de las piezas de recambio con períodos de espera largos;
- los manuales técnicos y las hojas de datos del equipo patentado comprado para el contrato, que figurarán en los apéndices;
- una instrucción de mantenimiento para reemplazar cada uno de los principales elementos de la planta de la plataforma, que indique los componentes que habrá que retirar para tener acceso al elemento en cuestión.

Los borradores de los manuales se presentarán para su examen y aceptación oficiales como parte de las pruebas de aceptación del cliente.

II-12. SEGURIDAD, SALUD Y MEDIO AMBIENTE

Esta sección, en que se definirán todos los controles o riesgos relativos a la seguridad, la salud y el medio ambiente que se relacionen con el cliente o el emplazamiento, deberá redactarse específicamente para cada proyecto.

II-13. CONDICIONES DEL EMPLAZAMIENTO

En esta sección se proporcionará una descripción de todo requisito del cliente relativo a la seguridad, la salud y el medio ambiente, y de las obligaciones del contratista al respecto. Se requerirá una declaración que defina las condiciones radiológicas y/o ambientales específicas para el trabajo en el emplazamiento, los servicios e instalaciones suministrados por el cliente, la interacción con otros contratistas, las condiciones particulares del emplazamiento y las restricciones específicas del acceso del contratista (los términos y condiciones generales del trabajo en el emplazamiento figurarán en el contrato). La sección deberá redactarse específicamente para cada proyecto.

Si el pliego de condiciones se refiere a módulos de proceso individuales que se introducirán en una instalación ya existente, esta sección podrá remitir a la documentación disponible sobre el trabajo en esa instalación.

II-14. DATOS APORTADOS

En esta sección, que deberá redactarse específicamente para cada proyecto, se incluirá una lista de los planos, informes y otros datos suministrados al licitante. La información aportada podría comprender lo siguiente:

- si corresponde, planos de la zona o el edificio ya existente en que se ubicará el módulo, a fin de ilustrar el espacio libre disponible y la vía de acceso para la instalación, incluidas las restricciones que se apliquen, por ejemplo la altura de las puertas, las limitaciones de la carga de los pisos, y las cargas de trabajo seguras de los equipos de izado que el contratista podrá utilizar;
- información tomada del conjunto de diseños de ingeniería, por ejemplo el diagrama de flujo del proceso y las listas de equipos e instrumentos.

Si se suministran planos preliminares para ayudar al contratista a entender los requisitos, podría añadirse que el contratista será responsable de finalizar el diseño de esos componentes para que cumplan los requisitos del pliego de condiciones.

II-15. GARANTÍA

Ejemplo.

La garantía comenzará a regir a partir de la terminación satisfactoria de la puesta en práctica no activa y la aceptación por el regulador de que la instalación está lista para recibir desechos activos. El período de garantía será de 12 meses contados a partir de su fecha de inicio.

II-16. CRITERIOS PARA LA ADJUDICACIÓN DEL CONTRATO

Estos criterios podrían incluir el precio, el programa, la experiencia en el suministro de equipo parecido y el cumplimiento del pliego de condiciones.

COLABORADORES EN LA REDACCIÓN Y LA REVISIÓN

Alves Reis, L.C.	Centro de Desarrollo de Tecnología Nuclear (Brasil)
Balan, I.	Organismo Nacional de Reglamentación de las Actividades Nucleares y Radiológicas (República de Moldova)
Benítez Navarro, J.C.	Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (Cuba)
Bergman, C.	Consultor (Suecia)
Bouih, A.	Centro Nacional de Energía, Ciencias y Tecnologías Nucleares (Marruecos)
Burakov, B.	Instituto del Radio V.G. Khlopin (Federación de Rusia)
Dinner, P.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Drace, Z.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Dragalici, F.	Instituto Nacional Horia Hulubei de Investigación y Desarrollo en Física e Ingeniería Nuclear (Rumania)
Fellingham, L.	NUKEM (Reino Unido)
Ghose, S.	Comisión de Energía Atómica de Bangladesh (Bangladesh)
Gichuhi, F.M.K.	Junta de Protección Radiológica (Kenya)
Gisca, I.	Instalación de Disposición Final de Desechos Radiactivos (República de Moldova)
Jamison, J.	Laboratorio Nacional del Pacífico Noroeste (Estados Unidos de América)
Jovanovic, S.	Facultad de Ciencias, Universidad de Montenegro (Montenegro)
Kahraman, A.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Kamande, J.	Junta de Protección Radiológica (Kenya)
Karlin, Y.	Empresa pública de Moscú, MosNPO “Radon” (Federación de Rusia)
Keene, D.	Nuvia Ltd. (Reino Unido)
Kelly, J.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Lee Gonzales, H.M.	Autoridad Regulatoria Nuclear (Argentina)
Leuner, B.	Necsa (Sudáfrica)
Luycx, P.	Belgoprocess (Bélgica)
Marcelo, E.	Instituto Filipino de Investigaciones Nucleares (Filipinas)
McManus, J.	Ontario Power Generation, Inc. (Canadá)
Momenzadeh, S.	Departamento de Gestión de Desechos (República Islámica del Irán)
Ndiritu, S.M.	Ministerio de Obras Públicas (Kenya)
Nguyen, B.T.	Instituto de Tecnología de Elementos Radiactivos y Tierras Raras (Viet Nam)

Padilla Silva, U.R.	Comisión Chilena de Energía Nuclear (Chile)
Reslan, A.M.	Comisión de Energía Atómica (Líbano)
Robin, B.	Technicatome (Areva) (Francia)
Romero de González, V.	Comisión Nacional de Energía Atómica (Paraguay)
Salgado, M.	Centro de Protección e Higiene de las Radiaciones (Cuba)
Samanta, S.K.	Organismo Internacional de Energía Atómica
Sanhueza Mir, A.	Comisión Chilena de Energía Nuclear (Chile)
Satya Sai, P.M.	Centro Bhabha de Investigaciones Atómicas (India)
Saunders, P.	SunCoast Solutions (Estados Unidos)
Seitkasymov, M.	Organismo Estatal para la Protección del Medio Ambiente y la Silvicultura (Kirguistán)
Sinha, P.K.	Centro Bhabha de Investigaciones Atómicas (India)
Tello, C.	Centro de Desarrollo de Tecnología Nuclear (Brasil)
Thiangtrongjit, S.	Programa de Gestión de Desechos Radiactivos (Tailandia)
Tomczak, W.	Planta de Gestión de Desechos Radiactivos (Polonia)
Tsyplenkov, V.	Consultor (Federación de Rusia)
Van Velzen, L.P.M.	Grupo de Investigación Nuclear y Consultoría (Países Bajos)
Wisnubroto, D.S.	Agencia Nacional de Energía Nuclear (Indonesia)

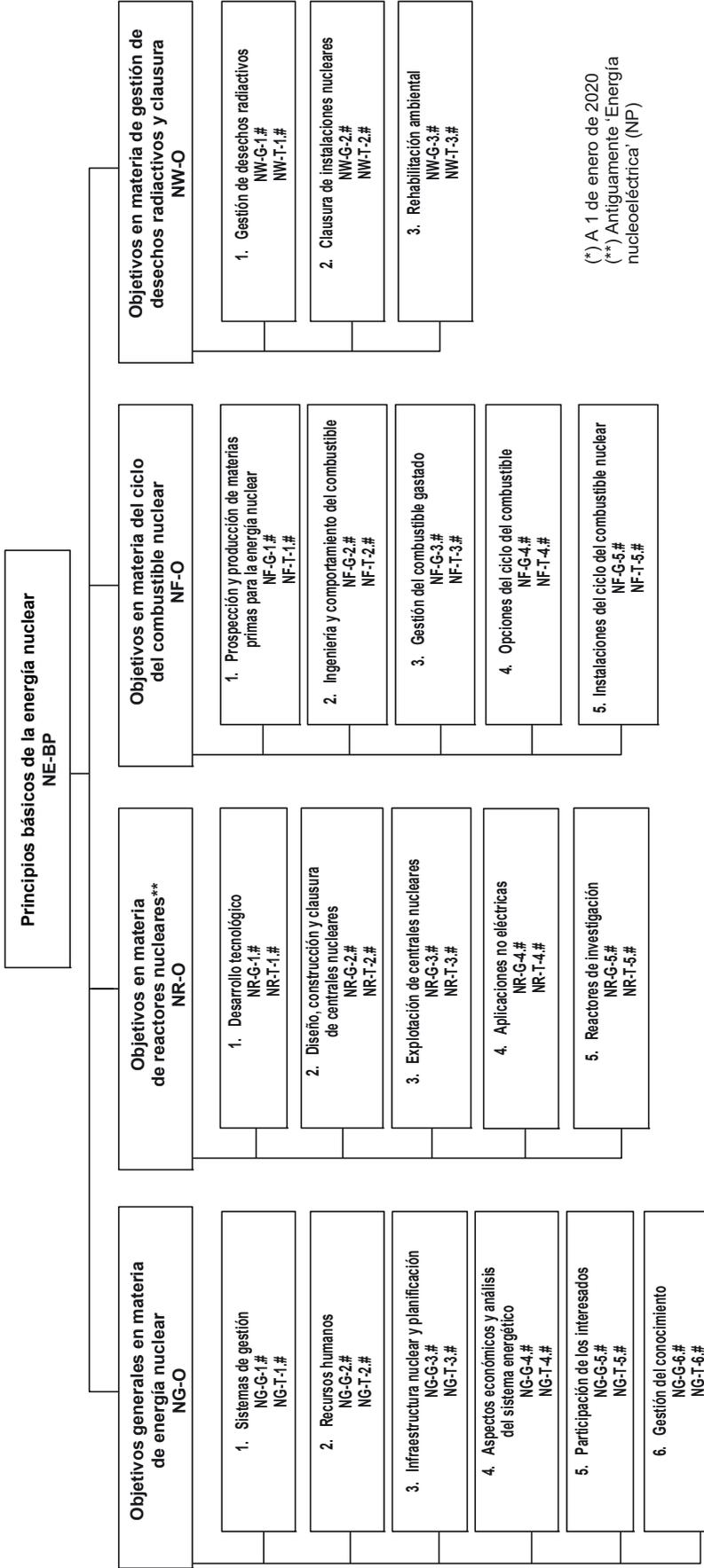
Reuniones de consultores

Viena (Austria): 30 de octubre a 3 de noviembre de 2006, 22 a 26 de enero de 2007,
25 a 28 de marzo de 2008, 10 a 14 de noviembre de 2008

Reuniones técnicas

Viena (Austria): 30 de octubre a 1 de noviembre de 2006, 10 a 13 de noviembre de 2008

Estructura de la Colección de Energía Nuclear del OIEA *



Leyenda

BP: Principios básicos
O: Objetivos
G: Guías y metodologías
T: Informes técnicos
N^{os} 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: orders@rowman.com • Sitio web: www.rowman.com/bernan

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>

**ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
VIENA**